

# 板级波导光互联技术研究现状及发展趋势

杨伟 毛久兵\* 冯晓娟

中国电子科技集团公司第三十研究所, 四川 成都 610041

**摘要** 光互联技术相对于传统的电互联技术具有高速、高带宽、低功耗、低损耗和抗电磁干扰等优势, 在高性能计算机、高速交换系统及波分复用(WDM)终端等方向都具有巨大的应用前景。板级电路在电子系统中占据主导地位, 就国内外板级波导光互联技术研究现状进行了阐述与分析, 并对光电印制电路板(EOPCB)国内外发展水平进行了对比, 为我国在该技术领域未来的主要研究方向及重点提供参考。最后对板级光电互联技术的发展趋势进行了展望。

**关键词** 光计算; 光互联; 光波导; 光电印制电路板

**中图分类号** TN256; TN41 **文献标识码** A

**doi**: 10.3788/LOP53.060004

## Research Status and Developing Tread for Waveguide-Based Board-Level Optical Interconnects Technology

Yang Wei Mao Jiubing Feng Xiaojuan

No. 30 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** Compared to the conventional electrical interconnects, the optical interconnects has the advantages of higher speed, higher bandwidth, lower power, lower propagation loss and anti-electromagnetic interference. This make the optical interconnects have the potential application prospects in many fields, such as high performance computer, high speed switching system, wavelength division multiplex (WDM) terminal and so on. The board-level circuits play a leading role in the electronic systems. Hence, the state of the art of waveguide-based board-level optical interconnects is introduced and analyzed. Moreover, through comparing the development status of the optical-electrical printed circuit board (EOPCB) in domestic and abroad, a reference of the main research direction and focus is provided for our country. Finally, the future development of the board-level optical interconnect technology is prospected.

**Key words** optics in computing; optical interconnects; optical waveguide; optical-electrical printed circuit board

**OCIS codes** 200.4650; 230.7370; 250.5460; 060.4510

## 1 引言

电互联技术具有工艺成熟、成本低廉、连接简便等优点, 但随着高性能计算和高速通信等技术的飞速发展, 信息量呈指数增长。宽带、高速、大容量的信息处理和传输对系统内印制电路板(PCB)之间、板到背板之间、芯片之间的互联速率、带宽和密度提出了更高的要求。而传统的电互联方式由于其固有物理特征, 铜导线上存在 R、L、C 分布参数, 在高频情况下, 这些寄生效应将导致严重的信号延迟、衰减与串扰、时钟歪斜、带宽受限、输入/输出(I/O)扩展能力弱及功耗急剧增加<sup>[1-2]</sup>。为了提升电互联的性能, 科研学者开展了大量的研究工作<sup>[3-6]</sup>, 如利用低  $k$  介电常数的电介质材料、减小导体长度使互联铜导线更光滑、优化互联布线的几何尺寸及结构, 以及采用更优的信号调整技术(预加重、去加重、均衡技术)等。然而, 这些方法或者成本过高, 或者以牺牲功耗为代价, 且无法从根本上解决电互联自身的物理局限性, 传统的电互联方式已成为限制高速通信系统快速发展的瓶颈, 必须引入新的互联机制。

收稿日期: 2015-12-30; 收到修改稿日期: 2016-02-05; 网络出版日期: 2016-05-20

作者简介: 杨伟(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电气互联方面的研究。E-mail: 26690323@qq.com

\* 通信联系人。E-mail: maojiubing@126.com

光互联是用光子取代电子作为信息载体实现各功能单元之间的信息传递与交换<sup>[7]</sup>。它把以超大规模集成电路(IC)为代表的先进电子技术与光通信技术相结合,以消除电子系统信息传输过程中所遇到的技术瓶颈,旨在实现一种高速率、大容量、高密度以及柔性信息的传输<sup>[8]</sup>。板级光互联相比于传统的电互联技术具有潜在的巨大优势<sup>[3,8-10]</sup>。光互联具有高的时间与空间带宽,传播时彼此无串扰,且不受外部电磁波辐射干扰(EMI),可实现高密度、大规模、低功耗互联。而且随着微型发射器阵列与探测器阵列产品的问世,还可实现三维结构光互联。

## 2 光电互联技术简介及其分类

### 2.1 光电互联技术简介

光互联优势明显,但目前无法对光信息进行直接处理,仍需转换为电信号,因此光互联仍不能完全替代电互联。光电互联技术即是将电子系统各功能模块之间的连接采用传输介质(自由空间、光纤或光波导)作为信号传输信道,替代传统的铜导线连接模式。其工作原理如图 1 所示,电信号由发射部分通过发射光源(如 LD、LED)调制成光信号,耦合至光传输介质,并与接收部分相连,由光电探测器(PD)、放大器将光信号转换为电信号进行后期处理。

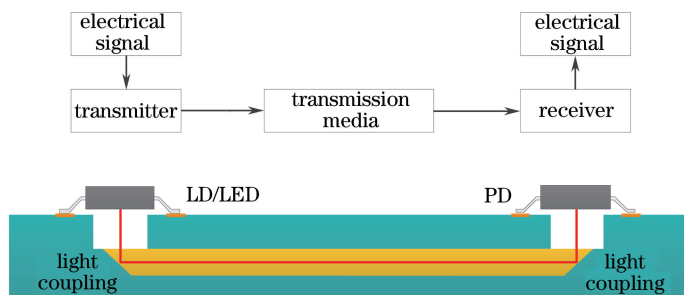


图 1 光电互联工作示意图

Fig. 1 Working schematic diagram of optical-electrical interconnects

### 2.2 光电互联技术分类

#### 2.2.1 按互联层次分类

在短距离通信范围内(小于 100 m),按互联器件类型与互联距离可分为 6 级<sup>[11]</sup>,如表 1 所示。

表 1 按互联器件与互联距离分类

Table 1 Classification according to the interconnected components and distance

Level	Interconnected component	Interconnected distance
Chip	Intra-chip	0~10 mm
Multi-chip-module(MCM)	Intra-MCM or chip-to-chip	1~100 mm
Board	MCM-to-MCM or chip-to-chip	10~300 mm
Backplane	Board-to-board	0.1~1 m
Cabinet	Rack-to-rack	0.3~5 m
System	Cabinet-to-cabinet	1~100 m

机柜级和系统级的光通信互联产品已商业化,但背板级<sup>[12-15]</sup>、板级、多芯片组件级和芯片级<sup>[16-20]</sup>的商业化光互联产品非常少,多处于研发阶段。

#### 2.2.2 按互联传输介质分类

##### 1) 自由空间光互联方式

自由空间光互联是指光信号从光源发出后在自由空间中传播,经过一些光学器件,如透镜、反射镜等控制光束和改变光路后,到达接收端的互联方式,图 2 为板级自由空间光互联方式<sup>[21]</sup>。科研学者对自由空间光互联开展了大量的研究<sup>[22-27]</sup>,主要集中在芯片级和背板级。自由空间光互联的优点是其可充分利用三维空间,构成各种拓扑结构的互连网络,理论上来说不受 I/O 引脚限制,可以充分发挥光的宽频带和光波独立传播无干扰的特性,大大提高数据传输速率和互联密度。

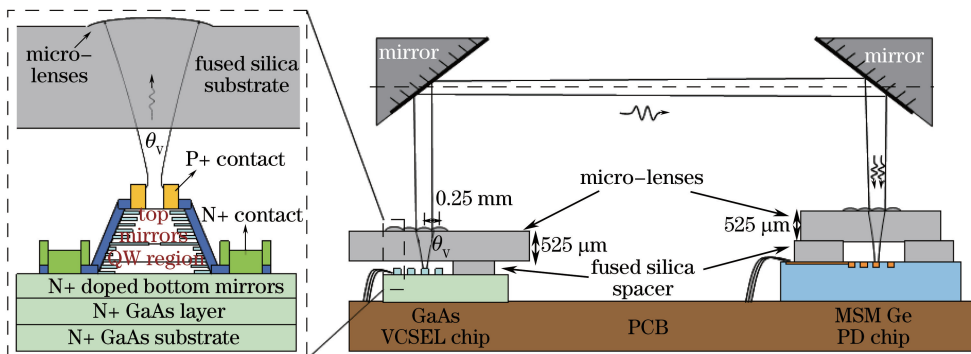


图2 板级自由空间光互联示意图

Fig. 2 Schematic diagram for board-level free space optical interconnect

自由空间光互联应用难度较大,因为所有的光学器件都必须精确定位与安置。另外,该互联方式的另一个缺点是易受环境如震动、灰尘等干扰,且系统维护也异常困难。

### 2) 光纤光互联方式

光纤光互联是以光纤作为传输介质,基于光纤自身的优点及已非常成熟的技术,光纤光互联得到了广泛而深入的研究。板级光纤光互联是将光纤埋入印制板内,如图3所示,图中光纤的两端通过对准机构分别与光源和探测器直接耦合,从而实现模块间的高速光互联<sup>[28]</sup>。

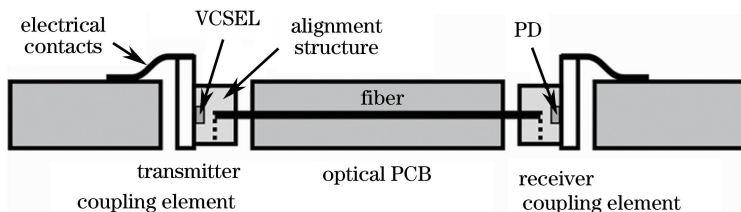


图3 板级光纤光互联示意图

Fig. 3 Schematic diagram for board-level fiber optical interconnects

虽然光纤具有非常低的传输损耗(几个 dB/km),但是光电印制板(EOPCB)需通过 V 型或 U 型槽对光纤进行埋入式固定,难以批量制作,只能一根根地对槽放置,如图4所示。而且光纤埋入方式与传统的 PCB 制作工艺兼容性不强;PCB 板制作过程需在 1 小时 170~180 °C 高温和 15 kP/cm<sup>2</sup> 压强下进行<sup>[29]</sup>,这易造成光纤的受力变形、受高温氧化降解及光纤间隔变化,从而造成安装误差及光纤损耗增大。目前,玻璃纤维(GOF)具有较高的熔融温度(250 °C),但其端面处理复杂,易造成唇形、剥皮等缺陷,且易脆裂;聚合物光纤(POF)的抗高温能力差,普通的有机玻璃(PMMA)芯 POF 极限温度约为 80 °C,氟化 PC 芯 POF 玻璃化温度可达 165 °C,但也无法满足 PCB 制作的工艺要求<sup>[2]</sup>。

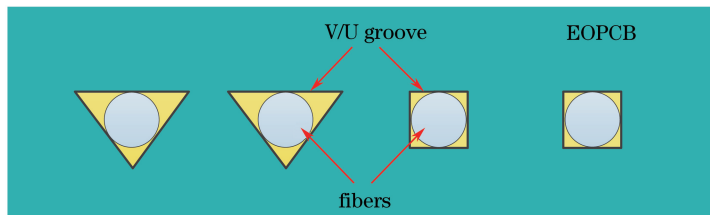


图4 光纤埋入式光电印制板示意图

Fig. 4 Schematic diagram for EOPCB embedded fibers

### 3) 光波导光互联方式

光波导光互联是采用光学波导作为光束(光信号)传输介质,光束的传输方向完全由传输介质控制。光波导一般具有双层或多层结构,其中芯层材料的折射率大于包层的折射率,满足全反射条件,光束可沿波导

进行传播。图 5 为典型的嵌入光波导 EOPCB 示意图<sup>[30]</sup>, 集成电路产生的电信号经过驱动芯片作用于垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 阵列, 将电信号转换为光信号, 光信号直接或通过微透镜传输到 45° 反射镜耦合进入光波导中, 然后通过另一端 45° 反射镜耦合进入到光电探测器阵列中转换为电信号, 再通过接收芯片进行信号调理, 满足集成电路的处理要求, 这样芯片与芯片之间便通过光波导实现了高速光互联, 从而提高系统的整体性能。

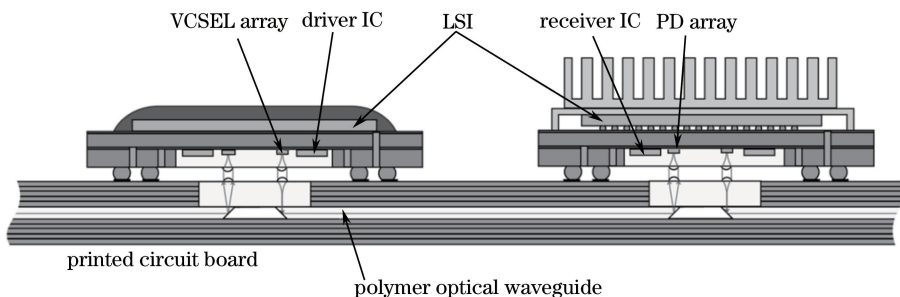


图 5 板级光波导互联示意图

Fig. 5 Schematic diagram for waveguide-embedded board-level optical interconnect

聚合物是目前最常见的光互连波导材料, 具有良好的电学与机械特性, 电光耦合系数大, 响应时间短, 损耗低。其可直接制作到 FR4 板上, 嵌入到传统的 PCB 中, 作为光信号传输层, 加工制造成本低, 容易实现, 与传统的 PCB 制造技术及表面组装技术 (SMT) 技术兼容。

### 3 板级波导光电互连国内外研究现状

光电互联技术具有无可比拟的优势, 为了满足板级不断提升的高速信息处理要求, 采用高性能聚合物波导作为光束传输层已受到科研学者广泛关注, 并对 EOPCB 开展了深入的研究。

目前, 板级聚合物波导光电互联技术的研究主要集中在美国、德国、芬兰、日本、韩国和中国等国家和地区, 经过近几十年的不断研究, 成果显著。下面对板级光电互联技术的国内外研究现状进行详细阐述与对比, 分析我国在该技术领域未来的研究方向及重点。

#### 3.1 国外研究现状

随着电子技术的不断发展, 元器件封装工艺水平获得显著提升, 而且, 随着 SMT 技术的应用, PCB 装配成本也大大降低。2003 年, 日本 NTT 微系统及集成实验室提出了与 SMT 技术完全兼容的“OptoBump”光 I/O 封装形式来降低互联板的封装及装配成本, 如图 6(a) 所示<sup>[30-32]</sup>。大尺度集成 (LSI) 芯片贴装在具有球栅阵列 (BGA) 封装的基底之上, VCSEL 和光电检测器贴装于基底内部, 基底底部则分别贴装收发聚合物微透镜阵列, 另一组透镜阵列在 PCB 板表面, 用来对光束进行准直, 提升 SMT 贴装误差的容限, 如图 5 所示。该 I/O 封装尺寸为 15 mm × 15 mm × 2.4 mm, 如图 6(b) 所示, 与其他集成芯片一样可自动表面贴装于嵌入光波导层的 PCB 板上。聚合物波导尺寸为 50 μm × 50 μm, 其端面具有 45° 全内反射 (TIR) 镜耦合机构, 采用 90°V 型金刚石刀切割而成。

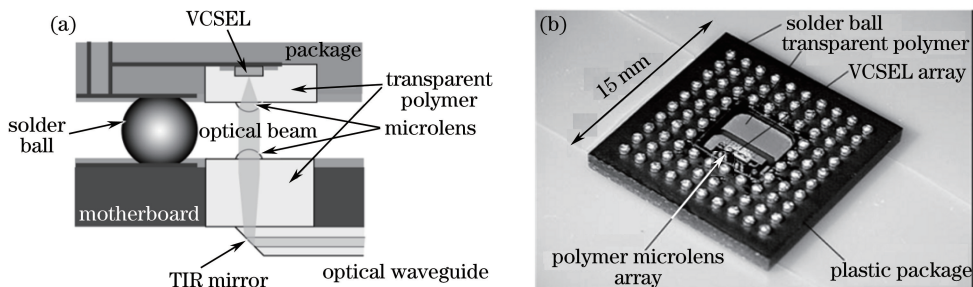


图 6 (a) OptBump 示意图; (b) 光 I/O 封装图

Fig. 6 (a) Schematic diagram of OptBump; (b) optical I/O packaging diagram

2006年,日本电子系统集成技术研究部为减少组件的数目,不使用透镜,而是直接将 VCSEL 光源信号耦合进光波导,使主动封装基板(Active Interposer)与光波导之间距离减小到  $60\ \mu\text{m}$ ,如图 7 所示<sup>[33]</sup>,光波导薄膜通过叠压嵌入到传统 PCB 板内。VCSEL、PD 及集成电路通过堆叠封装至基板上,并由通孔电极完成高速及高密度封装,具有任意焊盘形式的 LSI 可组装在基板之上。安装于基板底部的金属柱则保证基板与波导之间的距离具有足够的光耦合度,通过方向标记进行定位。光波导阵列间隔  $250\ \mu\text{m}$ ,芯层尺寸为  $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ ,上下包层厚度分别为  $35\ \mu\text{m}$  和  $65\ \mu\text{m}$ ,光波导端面的  $45^\circ$  镜同样通过切割而成。

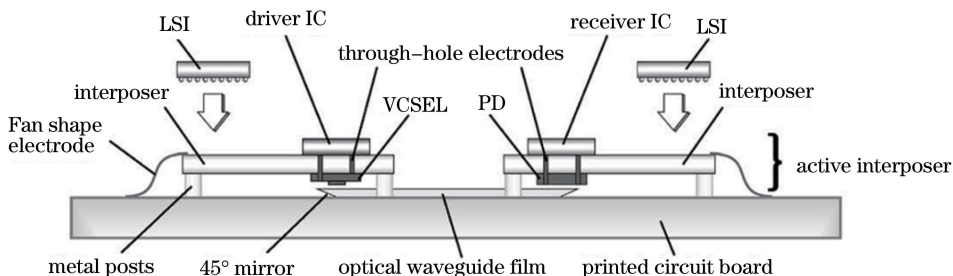


图 7 具有主动封装基板的光电 PCB 板示意图

Fig. 7 Schematic illustration of an active interposer assembled on EO PCB

韩国早期主要采用光纤带进行芯片间的光互联,后期也转向于光波导进行光信号的传输,其利用弯曲光纤实现光收发模块与光波导之间的耦合<sup>[34-35]</sup>,如图 8(a)所示,图(b)为多层  $90^\circ$  光纤耦合连接器,图(c)为连接器的制造过程,上部件带 U 型槽,用于固定光纤,间隔为  $250\ \mu\text{m}$ 。为了不损坏光纤,其具有  $1.5\ \text{mm}$  的圆弧倒角,并与 L 型下部件进行粘结,整个部件的尺寸为  $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ ,光纤两端通过机械光滑打磨,可直接与光收发模块和传输波导进行耦合。

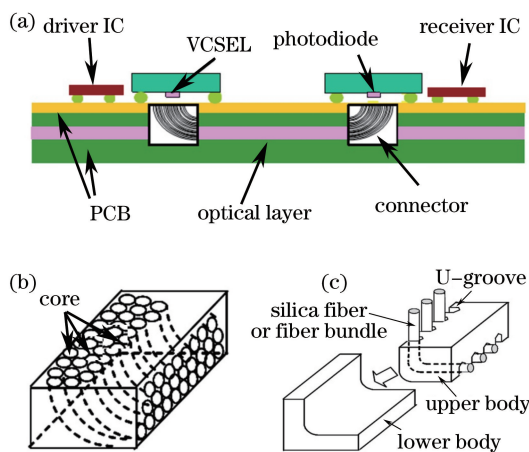


图 8 韩国板级光互联方式。(a) 具有  $90^\circ$  弯曲光纤耦合器的 EO PCB 结构图; (b) 光纤耦合器示意图; (c) 耦合器的制造过程

Fig. 8 Board-level optical interconnect of Korea. (a) Architecture using  $90^\circ$  bent fiber bundle connector and EO PCB;

(b) schematic of the fiber bundle connector; (c) fabrication process of the connector

德国的德累斯顿工业大学电子封装实验室是德国较早开始对光电互联技术进行研究的机构之一。图 9 为其所提出的多芯片组件混合光电印制板图<sup>[36-38]</sup>,BGA 陶瓷多芯片组件上集成了 VCSEL 和 PD 阵列及其相应的驱动和放大电路,设计的光电调制频率为  $10\ \text{GHz}$ 。采用焊料凸点倒装焊接工艺,可利用其自对准功能装配光电器件阵列。陶瓷 BGA 封装成本低,且与标准 SMT 工艺兼容。

该电路板引入多模石英光纤带,一端采用湿法研磨与抛光工艺加工的  $45^\circ$  TIR 并与光波导进行间接耦合,另一端则直接和光电器件耦合,如图 10 所示,耦合机构插入陶瓷载台上的通孔并与其胶合。采用光纤制作的光耦合机构使得光源、光探测器与光波导之间的轴向距离误差不会导致光束加宽,仅需调整光纤长度即可适应埋入印制板中光波导层的深度。该方案的优点是增大了无安装偏差时的耦合效率,缺点是由于多模光纤段的引入,波导以及光源和接收器之间安装程序多,易导致安装误差。

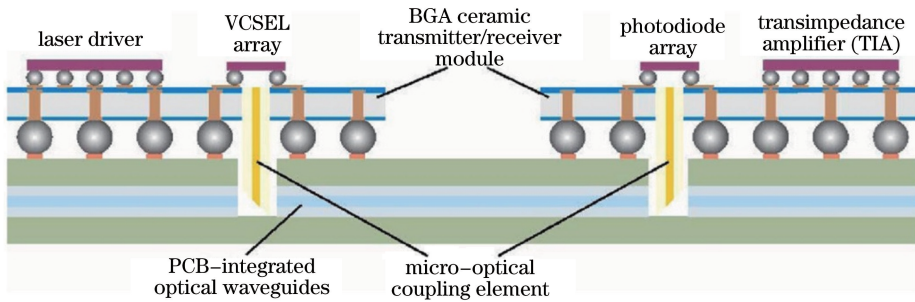


图 9 多芯片组件光电混合电路板示意图

Fig. 9 Schematic of PCB integrated optical interconnects

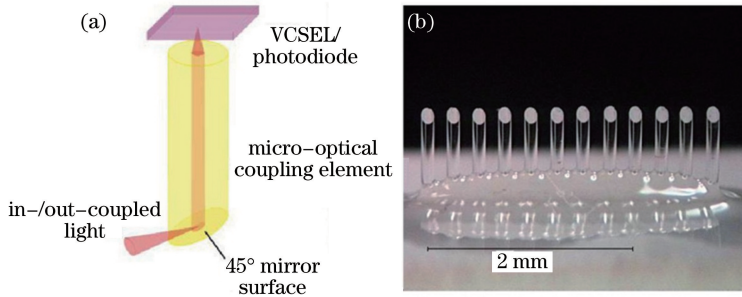


图 10 (a) 间接耦合示意图; (b) 1×12 光纤阵列插入棒耦合机构

Fig. 10 (a) Schematic of the indirect coupling element; (b) 1×12 array of coupling rods

美国国防部高等研究计划局(DARPA)曾致力于计算机互联的高速光纤数字通道的研究,并以光纤背板的制作技术和具有容错功能的背板结构为研究重点,而后将重心转移到芯片间光互联(C2OI)。该项目从2003年开始,其中以IBM与Agilent共同承担的子项目“Terabus”最为重要。Terabus提出,把以硅材料为载台的光电封装模块(Optochip)直接安装在集成光波导的有机板上(Optocard),如图11所示<sup>[39-43]</sup>。4×12阵列的VCSEL和PD通过倒装焊接到驱动和接收CMOS集成电路上,集成电路再通过倒装装配到1.2 cm<sup>2</sup>的硅载台上,进而形成Optochip。IBM在2005年宣布已经实现48路并行传输,每路光发射模块和接收模块传输速率分别为20 Gb/s和14 Gb/s,有机板上的光波导间隔为62.5 μm,芯层尺寸为35 μm×35 μm,采用干膜热压法制作。耦合机构通过微透镜阵列和45°端面实现,45°端面采用激光烧结,并在其表面进行镀金处理。

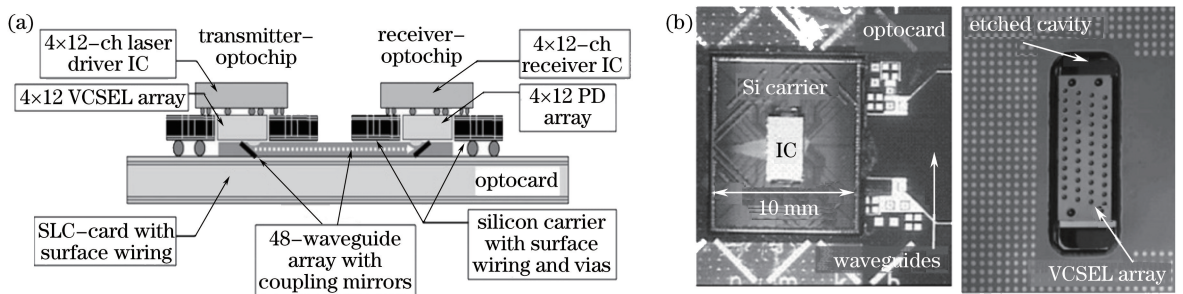


图 11 (a) Terabus 光电互联结构示意图; (b) 硅载台实物图

Fig. 11 (a) Schematic view of optical interconnect with the Terabus package; (b) photo of the silicon carrier

2008年,IBM又提出了光电模块的多芯片组件形式,其制作流程和前文叙述的硅载台一致,不过该光电组件采用BGA封装的形式,如图12所示<sup>[44-48]</sup>。

2006年,芬兰技术研究中心(VTT)提出以低温共烧陶瓷(LTCC)为载台的光收发多芯片组件,光源和探测器以倒装形式焊接到LTCC上,与驱动、接收芯片进行引线键合<sup>[49]</sup>。该组件通过0.35 mm无铅SnAgCu焊料球BGA封装并贴于PCB板上,组件的大小为10 mm×10 mm。图13(a)为其制作的光电PCB板实物图,图中两个蓝色方块分别为收发模块,两者之间为4×10 Gp/s光波导层,波导间隔为250 μm,长度为83 mm。图13(b)为其耦合机构,采用商用玻璃高折射率(1.82)微镜阵列,其曲率半径为275 μm,基底

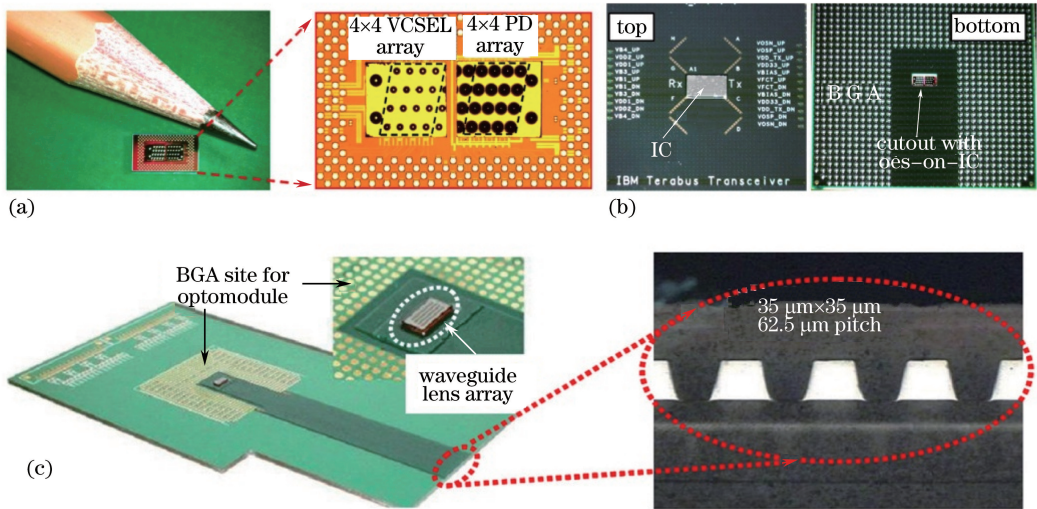


图 12 (a) 收发光电芯片, VCSEL 和 PD 阵列通过倒装焊接到 CMOS IC 上;

(b) BGA 封装的光电收发模块; (c) 集成了光波导和微镜 Optocard

Fig. 12 (a) Picture of transceiver Optochip showing the flip-chip attached VCSEL and PD arrays on the CMOS IC;

(b) optomodule with BGA packaging; (c) optocard with integrated polymer waveguides and waveguide lens array

厚度为 0.3 mm, 通过对薄玻璃一端进行打磨、抛光及金属处理制作成 45° 反射镜。其在 LTCC 与光波导加工过程中制作标记和结构进行被动光学校准, 其校准容限主要受表面贴装工艺精度的限制。

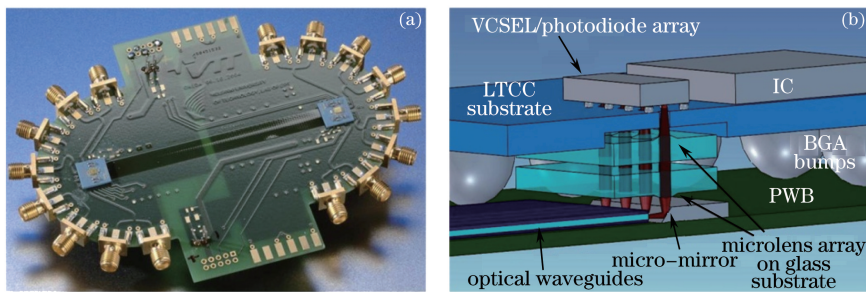


图 13 VTT 实验光电互联 PCB 板。(a) 实物图; (b) 组件结构及光电耦合示意图

Fig. 13 Optical interconnect demonstrator on PCB of VTT. (a) Photo of the EOPCB;

(b) schematics of the optical coupling and module structures

2010 年德国弗劳恩霍夫可靠性与微集成研究所提出了以玻璃材质 (厚度为 500  $\mu\text{m}$ , Schott BOROFLOAT<sup>®</sup>33) 为载台的光收发模块<sup>[50-52]</sup>。同理, 载台表面集成了光源、探测器及其驱动调理电路, 光束直接通过玻璃入射到光波导层的 45° TIR 进行耦合, 如图 14 所示。其中, 芯片与 PCB 板之间的电连接通过在玻璃载台上穿孔并填充导体钨。玻璃材料具有透明与绝缘的特性, 但其选择标准非常严格, 既要保证在热负荷下具有很好的尺寸稳定性, 且其膨胀系数要与硅 IC 相匹配, 而且还必须进行玻璃通孔操作。

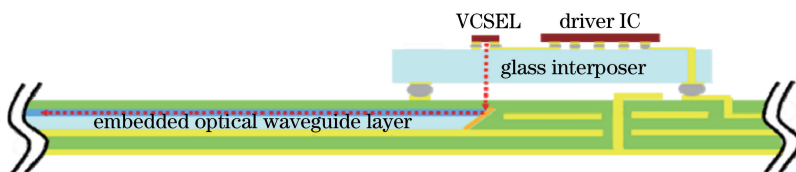


图 14 基于玻璃载台的光收发模块的 EOPCB 示意图

Fig. 14 Schematic diagram of EOPCB with embedded thin glass based optical waveguide layer

为了进一步提升光互联密度, 增加光通道数, 降低一维光波导因交叉互连节点多而导致的光功率衰减及通道间串扰, 2006 年, 富士通美国实验室开展了光电印制电路板 3D 布线方式的研究<sup>[53-54]</sup>, 如图 15 所示。其

通过三种  $45^\circ$  TIR 波导耦合镜完成光信号在 3D 波导中的传播,如图 16 所示,侧镜可实现光信号在平面光波导中  $90^\circ$  水平转向,上下垂直耦合镜则实现光信号在波导层间耦合。

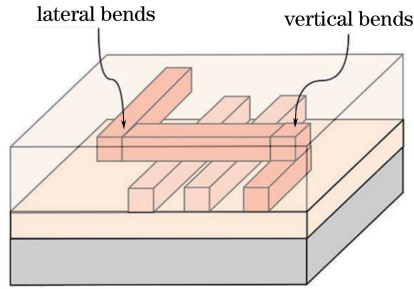


图 15 光电印制板的 3D 布线

Fig. 15 3D routing for the EOPCB

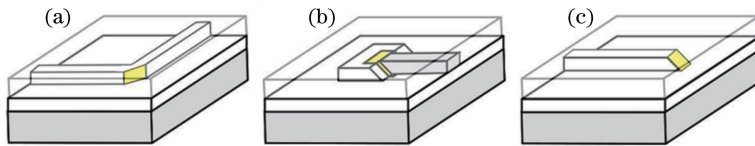


图 16 三种  $45^\circ$  波导微镜。(a) 侧镜; (b) 向上耦合镜; (c) 向下耦合镜

Fig. 16 Three types of  $45^\circ$  waveguide mirrors. (a) Lateral mirror; (b) upward coupling mirror; (c) downward coupling mirror

由以上阐述可知,光波导嵌入到传统的 PCB 中,并配合光收发组件模块化设计,不仅能充分利用现有 PCB 制作与器件贴装工艺的优势,还能发挥波导光互联技术较高的连接密度、更好的封装灵活性,及安装可靠性。

### 3.2 国内研究现状

华中科技大学(HUST)激光技术国家重点实验室是国内较早涉足板级光电互联技术的单位,如图 17 (a)所示,是其提出的芯片间光电印制电路板的布局原理图<sup>[55-56]</sup>。光信号通过固热(MT)耦合定位器中的  $45^\circ$  端面光纤耦合到光波导中,发射和接收模块通过定位针和 MT 耦合器进行连接,并通过 BGA 封装于电路板上,图 17(b)为光电互联 PCB 俯视图。后来,其主要研究重点集中在聚合物光波导的制作与加工工艺上。

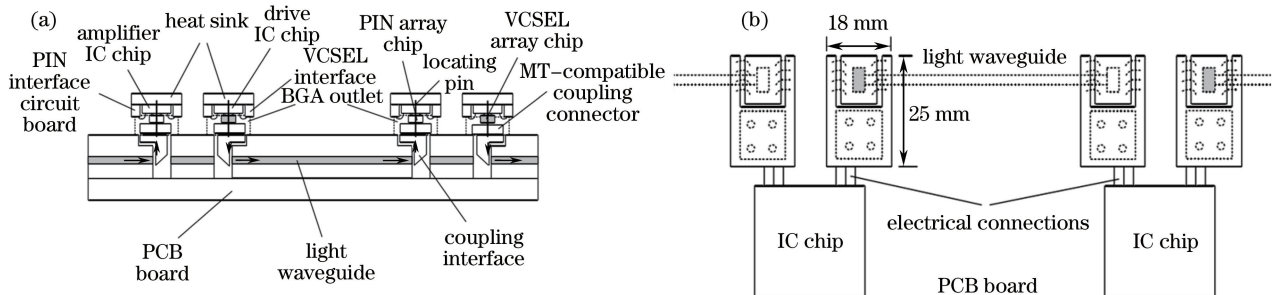


图 17 (a) 华中科技大学光电互联 PCB 原理图; (b) EOPCB 俯视图

Fig. 17 (a) Schematic diagram for the PCB integrated optical interconnect of HUST; (b) vertical view of the EOPCB

国防科学技术大学主要研究了应用于板级光电互联的变栅距光栅耦合器和微型光路转向耦合器及光波导的制作与加工<sup>[57-59]</sup>。变栅距光栅耦合器具有输入输出垂直耦合器和聚集透镜的功能,能够将 VCSEL 阵列发出的光通过光栅耦合器垂直耦合进入光波导,再从波导垂直耦合进入接收器阵列,如图 18 所示,但其只进行了理论分析,并未进行光栅耦合器的制作与加工。

微型光路转向耦合器由微透镜阵列和微型直角棱镜组合装配而成,其结构如图 19(a)所示,实物图如图 19(b),透镜直径与中心间距均为  $250 \mu\text{m}$ ,整个元件的尺寸为  $2.6 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ,棱镜斜面镀有金反射膜。其实现板级光互联转向的原理如图 19(c)所示。

2006 年,浙江大学开始研究基于软光刻的单层和多层光互连线路<sup>[60]</sup>。在单层光互连中提出了新型耦合



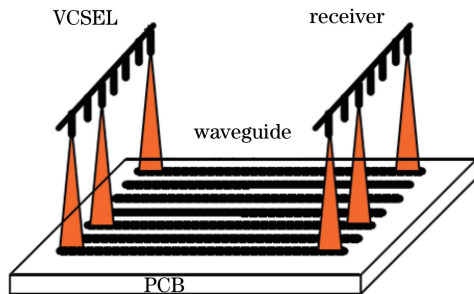


图 18 国防科学技术大学光栅耦合器 EOPCB 原理图

Fig. 18 Schematic illustration for EOPCB with grating coupler of National University of Defense Technology



图 19 国防科学技术大学微型转向元件。(a) 结构示意图；(b) 实物图；(c) 光电印制板互连示意图

Fig. 19 Micro steering devices of National University of Defense Technology. (a) Architecture schematic diagram; (b) physical photo; (c) schematic view of optical interconnect for PCB

机构,如图 20(a)所示,其扩大了反射镜面耦合部分的尺寸,同时保持了传输波导的小尺寸,在两者之间增加了光束过渡适配段(Beam Duct)。图 20(b)为放在传统 PCB 板上的具有新型耦合结构的光互连线路,均匀覆盖低折射率(1.48)软性预聚物,再进行光传输性能测试。

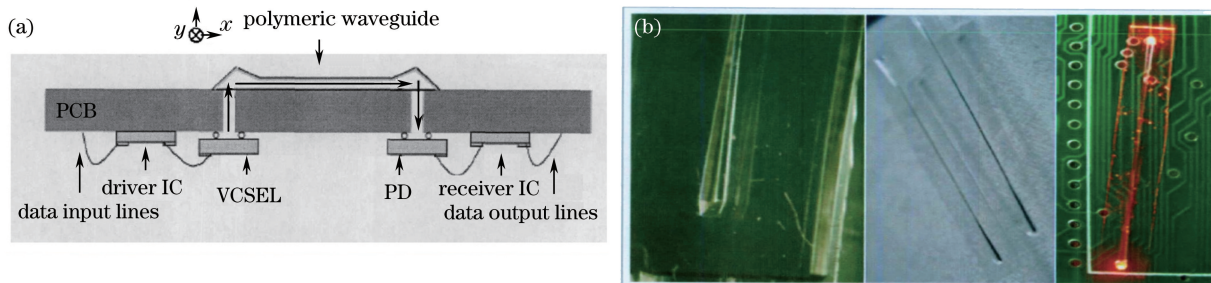


图 20 (a) 浙江大学单层光互连示意图；(b) 放置在 PCB 上的耦合波导工作图

Fig. 20 (a) Schematic of single optical interconnect layer on PCB of Zhejiang University; (b) working photo of the waveguide on the PCB

浙江大学多层光互连方案在线路中引入了 S 形弯曲层间耦合结构,如图 21(a)所示,S 形弯曲波导在坡面结构的支撑下完成了第 1 层到第 3 层光束信号渐变式  $90^\circ$  转折,且不影响同层的光互连。图 21(b)为 S 形弯曲波导耦合结构实现的多层光互连的配置方案,为了实现其在不同层之间的穿越,必须在板上预留空腔,这要求对波导的参数及布线进行合理设计与安排。图 21(c)为通过软光刻技术设计的 S 形层间耦合结构实物,其中,S 形弯曲坡面结构和波导是设计的重点与难点,设计的光波导横截面为  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ,波导间距为  $410\ \mu\text{m}$ ,S 形弯曲波导的横向传输距离为  $4.5\ \text{mm}$ ,垂直跨越高度为  $0.45\ \text{mm}$ 。

上述国内的研究成果只开展了光波导的设计、制造与加工工艺研究,没有将光波导集成嵌入到传统 PCB 板内。2015 年,上海美维科技有限公司在印制板中埋入多模聚合物波导,如图 22 所示<sup>[61]</sup>。其采用  $650\ \text{nm}$  的可见红光进行了光波导传输损耗测试,结果为  $0.025 \sim 0.040\ \text{dB/cm}$ 。

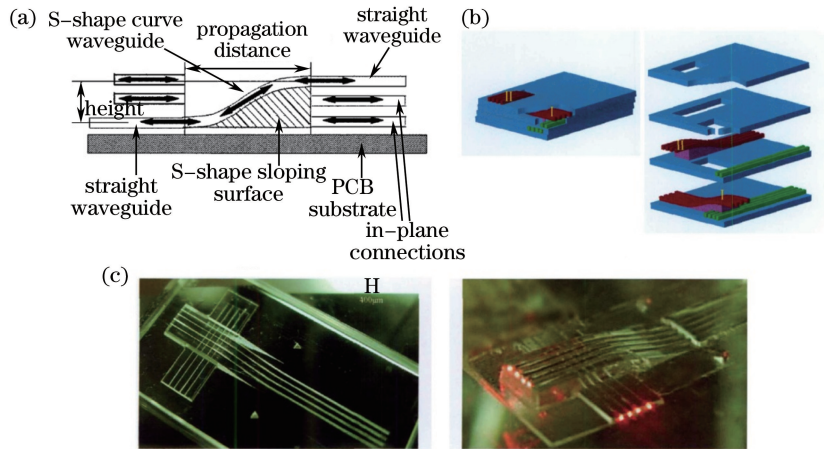


图 21 浙江大学多层光互连。(a) S 形多层光耦合结构;

(b) 带 S 形弯曲层间耦合的多层光互连示意图; (c) S 形层间耦合结构实物图及其通光实验

Fig. 21 Multi-layer optical interconnect of Zhejiang University. (a) Architecture of multi-layer coupler with S shape;

(b) schematic diagram of EOPCB with a multi-layer optical interconnects using S shape coupler;

(c) photo and experiment of the S shape multi-layer coupler

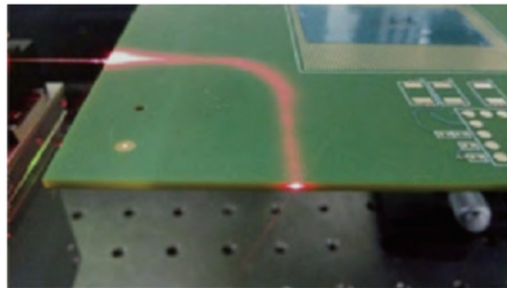


图 22 美维集成光波导印制电路板

Fig. 22 PCB embedded waveguide of Meadville

### 3.3 国内外技术差距

由前文分析可知,国内在板级波导光电互连技术方向的科研成果还非常有限,研究水平明显滞后于国外。国外已制作加工了完整的混合光电印制板,并开展了背板级光电互连的研究,而国内主要研究重点则集中于光波导的制作与加工,还须对如下方向开展深入研究:1) 板级光电耦合机构的设计与制作;2) 印制电路板埋入光波导工艺研究;3) 光电模块(多芯片组件)微组装技术研究;4) 光电模块与光波导高精度对准技术研究。

## 4 板级波导光电互联发展趋势

VCSEL、微组装及 SMT、聚合物波导材料及加工制作等技术或工艺的发展极大地推动了板级波导光互联技术的发展,实际应用的需求也对板级波导光互联的发展提出了挑战,该技术未来发展趋势包括如下几个方面:

1) 交叉与分叉节点光波导结构。对于电互联方式,由于铜导线接触导电不能交叉布线,为了提高 PCB 板装配密度,减小其体积与重量,而采用多层 PCB 板。为了充分利用光的独立传播不受干扰特性,可研究具有交叉和分叉节点的网状光波导结构的 EOPCB,实现大规模、高密度的光互联,这将是单层光互联线路近期发展的热点。

2) 多层光互联 EOPCB。随着信息量传输速率的指数上升,对光互联密度及光信道数量的需求定会呈现快速增长的态势。受到衬底尺寸及更多平面交叉和分叉互连节点导致光功率衰减及通道间串扰等问题的困扰,EOPCB 必将向三维多层结构发展,才能有效实现更大规模、更高密度的光互联。其中 3D 光信道布线设计规则及层间耦合机构将是多层光互联 EOPCB 的研究重点。

3) 挠性 EOPCB。挠性 EOPCB 不仅拥有光互联的巨大优势,而且还具有折叠、弯曲等特性,可实现不

同平面间子系统的互连,也可连接活动部件,实现三维装配,使高速电子系统向轻量化、小型化和高性能化方向发展。

## 5 结 论

论述了光互联技术的优势,并对光电互联技术、分类及其性能进行了简要描述。相对于自由空间与光纤光互联技术,基于波导光电互联技术在板级更具优势,其与传统的 PCB 制作技术和 SMT 技术具有良好的兼容性。通过对板级波导光电互联技术的国内外研究现状进行详细的阐述与分析,指出目前我国在该领域还存在的技术差距。最后展望了聚合物波导光互联印制板未来的发展趋势。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Zhihua. Design and realization of waveguide-based chip-to-chip optical interconnection network [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 1-8.  
余志华. 基于光波导的芯片间光互联网络的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 1-8.
- 2 Shao Kejie. Study and design of board level optical interconnect links[D]. Mianyang: Chinese Academy of Engineering Physics, 2009: 2-13.  
邵科杰. 板级光互连链路设计研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009: 2-13.
- 3 Weng Shousong. The low- $k$  dielectric and its equipment[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2008, 160: 28-30.  
翁寿松. 低  $k$  电介质及其设备[J]. 电子工业专用设备, 2008, 160: 28-30.
- 4 Mai K, Paaske T, Jayasena N, *et al.*. Smart Memories: A modular reconfigurable architecture[C]. 27th Int Symp Computer Architecture, 2000: 161-171.
- 5 H B Bakoglu. Circuits, interconnections, and packaging for VLSI reading[M]. New Jersey: Addison-Wesley, 1990: 143-152.
- 6 R Ho, K Mai, M Horowitz. Efficient on-chip global interconnects[C]. VLSI Circuits, 2003: 271-274.
- 7 Zhang Yimo. Optics inter-connected network techniques[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2006: 4-5.  
张以谟. 光互联网络技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 4-5.
- 8 陈益新. 集成光学三十年[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 216-220.
- 9 J W Goodman, F J Leonberger, S Y Kung, *et al.*. Optical interconnections for VLSI systems[J]. Proc of the IEEE, 1984, 72(7): 850-866.
- 10 D Agarwal. Optical interconnects to silicon chips using short pulses[D]. Stanford: USA Stanford University, 2002: 9-15.
- 11 M Karppinen. High bit-rate optical interconnects on printed wiring board[D]. Oulu: Oulu University, 2008: 16-20.
- 12 G M Jiang, S Baig, M R Wang. Tunable Optofluidic couplers for dynamic card-to-backplane optical interconnect[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(24): 4135-4141.
- 13 R Pitwon, L Brusberg, H Schröder, *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.
- 14 M Immonen, J Wu, H J Yan, *et al.*. Electro-optical backplane demonstrator with multimode polymer waveguides for board-to-board interconnects[C]. IEEE Electronics System-Integration Technology Conference, 2014: 1-6.
- 15 Jia Nana, Deng Chuanlu, Pang Fufei, *et al.*. Research on excimer laser etching technology for achieving optical waveguide end face[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303012.  
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): 0303012.
- 16 Shen Pokun, Chen Chinta, Chen Rueihung, *et al.*. Chip-level optical interconnects using polymer waveguide integrated with laser/PD on silicon[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(13): 1359-1362.
- 17 Cui Rong, Yang Xiaohong, Lü Qianqian, *et al.*. InGaAs/InP photodetector on SOI circuitry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110003.  
崔 荣, 杨晓红, 吕倩倩, 等. SOI 波导与 InGaAs/InP 光电探测器的集成[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110003.
- 18 Chen Qiaoshan, Yang Lin. Optical routers for photonic networks-on-chip[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110005.  
陈乔杉, 杨 林. 用于片上光网络的光学路由器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110005.

- 19 M Yun, S Cho, S K Kang, *et al.*. Ge-on-Si photodetector with novel metallization schemes for on-chip optical interconnect[C]. IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2015: 1-2.
- 20 T Sato, K Takeda, A Shinya, *et al.*. Photonic crystal lasers for chip-to-chip and on-chip optical interconnects[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 728-737.
- 21 B Ciftcioglu, J Gao, R Berman, *et al.*. Recent progress on 3-D integrated intra-chip free-space optical interconnect[C]. IEEE Optical Interconnects Conference, 2012: 56-57.
- 22 S Tang, R T Chen, L Garrett, *et al.*. Design limitations of highly parallel free-space optical interconnects based on arrays of vertical cavity surface-emitting laser diodes, microlenses, and photodetectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(11): 1971-1975.
- 23 D V Plant, M B Venditti, E Laprise, *et al.*. 256-channel bidirectional optical interconnect using VCSELs and photodiodes on CMOS[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(8): 1093-1103.
- 24 B Dhoedt, P D Dobbelaere, J Blondelle, *et al.*. Monolithic integration of diffractive lenses with LED-arrays for board-to-board free space optical interconnect[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(6): 1065-1073.
- 25 D J Goodwill, K E Devenport, H S Hinton. An ATM-based intelligent optical backplane using CMOS-SEED smart pixel arrays and free-space optical interconnect modules[J]. IEEE Journal of Selected Optics in Quantum Electronics, 1996, 2(1): 85-96.
- 26 M Vervaeke, C Debaes, B Volckaerts, *et al.*. Optomechanical Monte Carlo tolerancing study of a packaged free-space intra-MCM optical interconnect system[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(5): 988-996.
- 27 K Wang, A Nirmalathas, C Lim, *et al.*. High-speed reconfigurable free-space card-to-card optical interconnects [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1407-1419.
- 28 M Schneider, T Kühner, J Mohr, *et al.*. Fibers in printed circuit boards with passively aligned coupling[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(15): 2121-2128.
- 29 S Kopetz, E Rabe, W J Kang, *et al.*. Polysiloxane optical waveguide layer integrated in printed circuit board [J]. Electronics Letters, 2004, 40(11): 668-669.
- 30 Y Ishii, S Koike, Y Arai, *et al.*. SMT-compatible large-tolerance "optobump" interface for interchip optical interconnections[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2003, 26(2): 122-127.
- 31 Y Ishii, S Koike, Y Arai, *et al.*. SMT-compatible optical-I/O chip packaging for chip-level optical interconnects[C]. IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2001: 870-875.
- 32 Y Ishii, N Tanaka, T Sakamoto, *et al.*. Fully SMT-compatible optical-I/O package with microlens array interface[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(1): 275-280.
- 33 S Hiramatsu, T Mikawa. Optical design of active interposer for high-speed chip level optical interconnects[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(2): 927-934.
- 34 M H Cho, H S Cho, S H Hwang, *et al.*. Optical interconnection schemes using micro-optic connectors for passive packaging in optical PCBs[C]. IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2005: 1830-1834.
- 35 M H Cho, S H Hwang, H S Cho, *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.
- 36 K Nieweglowski, K J Wolter. Optical analysis of short-distance optical interconnect on the PCB-level[C]. Electronics System Integration Technology Conference, 2006: 392-397.
- 37 K Nieweglowski, K J Wolter. Novel optical transmitter and receiver for parallel optical interconnects on PCB-level[C]. 2nd Electronics System-Integration Technology Conference, 2008: 607-611.
- 38 K Nieweglowski, R Rieske, K J Wolter. Assembly requirements for multi-channel coupling micro-optics in board-level optical interconnect[C]. 3rd Electronics System-Integration Technology Conference, 2010: 1-6.
- 39 G L Bona, B J Offrein, U Bapst, *et al.*. Characterization of parallel optical-interconnect waveguides integrated on a printed circuit board[C]. SPIE, 2004, 5453: 134-141.
- 40 A F Benner, M. Ignatowski, J A Kash, *et al.*. Exploitation of optical interconnects in future server architectures[J]. IBM Journal of Research and Development, 2005, 49(4.5): 755-775.
- 41 L Schares, J A Kash, F E Doany, *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.
- 42 J A Kash, F E Doany, L Schares, *et al.*. Chip-to-chip optical interconnects[C]. Optical Fiber Communication Conference

- and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2006: OFA3.
- 43 O Liboiron-Ladouceur, C L Schow, P K Pepeljugoski, *et al.*. A 17 Gb/s, 200-meter multimode optical fiber link using CMOS analog ICs and silicon carrier packaging[C]. 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2006: 573-574.
- 44 F E Doany, C L Schow, C K Tsang, *et al.*. 300-Gb/s 24-channel bidirectional Si carrier transceiver optochip for board-level interconnects[C]. Electronic Components and Technology Conference, 2008: 238-243.
- 45 F E Doany, C L Schow, J A Kash, *et al.*. Waveguide-coupled parallel optical transceiver technology for Tb/s-class chip-to-chip data transmission[C]. SPIE, 2008, 6899: 68990V.
- 46 F E Doany, C L Schow, C W Baks, *et al.*. 160 Gb/s bidirectional polymer-waveguide board-level optical interconnects using CMOS-based transceivers[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2009, 32(2): 345-359.
- 47 F E Doany, B G Lee, C L Schow, *et al.*. Terabit/s-class 24-channel bidirectional optical transceiver module based on TSV Si carrier for board-level interconnects[C]. Electronic Components and Technology Conference, 2010: 58-65.
- 48 A V Rylyakov, C L Schow, J E Proesel, *et al.*. A 40-Gb/s, 850-nm, VCSEL-based full optical link[C]. Optical Fiber Communication Conference & Exposition, 2012, 27(6): 1-3.
- 49 M Karppinen, T Alajoki, A Tanskanen, *et al.*. Parallel optical interconnect between ceramic BGA packages on FR4 board using embedded waveguides and passive optical alignments[C]. Electronic Components and Technology Conference, 2006: 799-805.
- 50 L Brusberg, H Schröder, R Erxleben, *et al.*. Glass carrier based packaging approach demonstrated on a parallel optoelectronic transceiver module for PCB assembling[C]. Electronic Components and Technology Conference, 2010: 269-274.
- 51 H Schröder, L Brusberg, N Arndt-Staufenbiel, *et al.*. Advanced thin glass based photonic PCB integration [C]. Electronic Components and Technology Conference, 2012: 194-202.
- 52 L Brusberg, D Manassis, M Neitz, *et al.*. Development of an electro-optical circuit board technology with embedded single-mode glass waveguide layer[C]. Electronics System-Integration Conference, 2014: 1-5.
- 53 A L Glebov, M G Lee. 3D routing on optical boards[C]. 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2006: 22-23.
- 54 A L Glebov, M G Lee, S Aoki, *et al.*. Integrated waveguide micro-optic elements for 3D routing in board-level optical interconnect[C]. SPIE, 2006, 6126: 61260N.
- 55 Fu Kai. Research of optical interconnection waveguides for EOPCB[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 45-52.  
付 凯. 光电混合印制电路板(EOPCB)光互连波导研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 45-52.
- 56 Zhang Jin. Optical coupling in electrical-optical printed-circuit board[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 40-55.  
张 瑾. 基于 EOPCB 光互连板的光耦合研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 40-55.
- 57 Feng Xianghua. Study on the elements for optical interconnection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 52-68.  
冯向华. 用于光互连的单元器件研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 52-68.
- 58 Feng Xianghua, Ji Jiarong, Dou Wenhua. Fabrication of modified polydimethylsiloxane and multimode optical waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0531003.  
冯向华, 季家谔, 窦文华. 聚硅氧烷改性及多模光波导制备[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0531003.
- 59 Feng Xianghua, Ji Jiarong, Dou Wenhua. Bending loss of polysiloxane optical waveguides for optical interconnection[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0823003.  
冯向华, 季家谔, 窦文华. 用于光互连的聚硅氧烷波导弯曲损耗[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0823003.
- 60 Ni Wei. Research on soft lithography based short range optical interconnection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 39-91.  
倪 玮. 基于软光刻的短距离光互联研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 39-91.
- 61 Wu Jinhua, M Immonen, Yan Huijuan, *et al.*. Application of multimode polymer waveguide in optical-electrical printed circuit board[J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(5): 291-294.  
吴金华, M Immonen, 严慧娟, 等. 多模聚合物波导在光电印制板中的应用[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(5): 291-294.