

激光与光电子学进展

板级光电互联技术发展现状与趋势

杜耀辉, 侯霞*

中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800

摘要 光电互联技术在光电通信、光电导航等军事领域, 高性能处理器以及民用通信等领域有着独特的优势。对于目前高性能计算和高速率通信系统中, 无论是板到板还是板内各模块之间的链路, 对更高带宽的需求持续增加, 光电互联可代替传统电互联解决这一问题, 同时降低系统成本与功耗, 使系统微型化、高性能化。光电互联技术按光传输介质可分为自由空间光互联技术、聚合物光波导光电互联技术、光纤光电互联技术三类。简要介绍了光电互联技术的定义与三类光电互联技术, 阐述了国内外聚合物光波导光电互联技术与光纤光电互联技术的发展动态, 讨论对比了三类光电互联技术优缺点, 指出了该领域的关键技术与发展趋势, 为我国在该领域未来的研究方向提供参考。

关键词 光电子; 光电互联; 聚合物光波导光电互联; 光纤光电互联; 光电印刷电路板

中图分类号 TN25; TN41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230766

Development Status and Trend of Board-Level Photoelectric Interconnection Technology

Du Yaohui, Hou Xia*

Space Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Photoelectric interconnection technology has distinct advantages in military fields, such as photoelectric communication and navigation, high-performance processors, and civil communication. The demand for higher bandwidth continues to increase for the current high-performance computing and high-rate communication systems, whether it is board-to-board or the link between modules on the board. Photoelectric interconnection can be used to alleviate this issue, and reduce the system costs and power consumption, allowing the system to be downsized and high-performing. Optical interconnection technology is classified into three types based on the optical transmission medium: free-space optical interconnection technology, polymer optical waveguide optical interconnection technology, and optical fiber optical interconnection technology. The definition and three types of photoelectric interconnection are introduced briefly, and the development trends of polymer optical guide photoelectric interconnection and optical fiber photoelectric interconnection at home and abroad are expounded. After weighing the benefits and drawbacks of the three types of photoelectric interconnection, the key technology and development trends in this field are identified. It serves as a reference for future research directions in this field.

Key words optoelectronics; photoelectric interconnection; polymer optical waveguide photoelectric interconnection; optical fiber photoelectric interconnection; photoelectric printed circuit board

1 引言

随着高性能计算机、高速通信技术的飞速发展以及信息容量的持续增长, 同时电子产品不断突破高速率、高密度、微型化、复杂化、多功能化的极限^[1,2], 大带宽、高速、大容量的数据传输对系统内印刷电路板

(PCB)之间、板到背板之间以及板内芯片或器件之间的互联方式提出新的需求^[3]。传统的电互联方式目前发展比较成熟, 在制作工艺、成本、连接方式等方面有一定的优势, 但由于电互联固有的属性即铜导线的电阻、电容、电感分布参数, 在高速、高频、高互联密度数据处理与传输系统中, 会出现电信号之间的串扰、本身

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-04-19; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(22X0152601)

通信作者: *hou_xia@siom.ac.cn

的衰减与延迟、时钟歪倾、带宽上限以及功耗迅速增加等问题^[25], 这些问题也是传统电互联技术限制高速通信系统快速发展的瓶颈。由于光信号能够并行高速传输, 具有很高的带宽, 能够独立传播且光通道间串扰较小, 目前有较成熟的光信号调制技术和光电转换技术^[6], 故国内外研究人员为解决以上问题提出了在电互联的基础上加入光互联, 在信号传输时, 将电信号转为光信号进行传输, 在信号处理时, 将光信号转为电信号进行处理。这种通过电—光—电的转换将以大规模集成电路(IC)为代表的先进电子技术与光通信技术结合在一起实现板间及传统印刷电路板各模块之间信息交换的技术称为光电互联技术。为解决传统电互联方式限制高速通信系统、高性能计算机快速发展提供了可行与低成本方案, 具有巨大的发展优势。

2 光电互联技术定义与分类

2.1 光电互联技术定义

光电互联技术涵盖了机械工程科学、电子科学、

光子科学、信息科学、材料科学以及微纳制造等多门学科, 光电互联基本原理是电信号—光信号—电信号的转换, 将传统电互联技术中的铜导线用光传输介质(自由空间光、光纤、聚合物光波导)代替并将各个电子功能模块连接起来进行信息的交换。光电互联整体结构原理图如图 1^[7]所示, 主要包括发射模块、耦合器、传输通道、接收模块四部分, 发射模块一般有两种形式, 一种是直接调制激光器式, 另一种为外部调制器式, 调制光经过耦合器耦合到光波导, 光波导出射光再次通过耦合器耦合到接收模块, 接收模块中光电探测器(PD)将光信号转为电信号最后经过放大电路做后续处理。

2.2 光电互联技术分类

自由空间光互联技术为通信系统中两通信节点之间提供点到点的自由空间光链路进行节点之间的信息交换, 将光源出射的光信号通过一些光学器件, 比如反射镜、透镜等改变与控制光传输方向到达目标模块实现^[8], 自由空间光互联整体结构示意图如图 2^[9]所示。

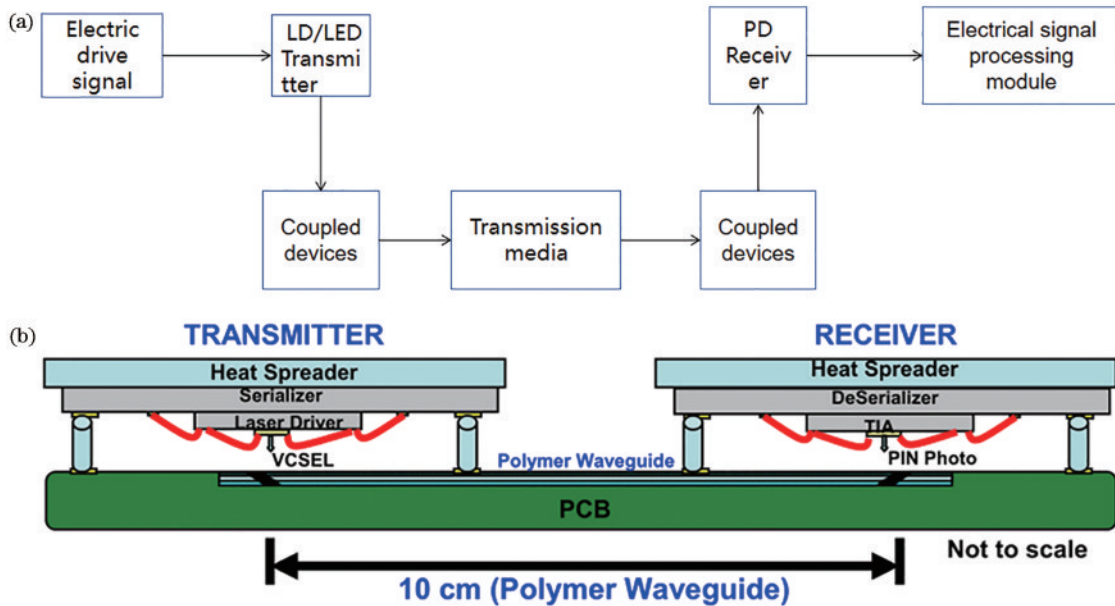


图 1 光电互联技术^[7]。(a)原理图;(b)整体结构图

Fig. 1 Photoelectric interconnection technology^[7]. (a) Schematic diagram; (b) overall structure diagram

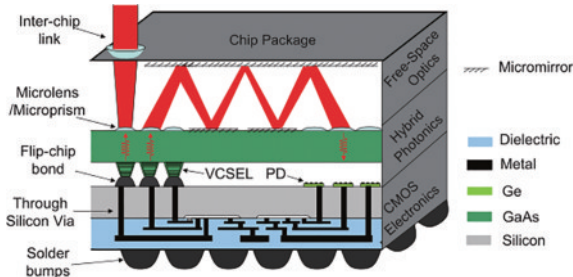


图 2 自由空间光互联整体结构工作示意图^[9]

Fig. 2 Schematic diagram of the overall structure of free space optical interconnection^[9]

板级聚合物光波导互联一般是将聚合物光波导薄膜嵌入 PCB 中, 聚合物光波导薄膜一般是由三层(上包层、波导芯、下包层)组成, 其基本原理是基于光的全反射, 包层材料折射率低于芯层材料折射率, 光被限制在波导薄膜的波导芯中进行传输, 为提高互联密度可嵌入多光学层波导薄膜来实现, 多光学层波导薄膜如图 3^[10]所示。嵌入聚合物波导的光电印制板整体结构如图 1(b)所示, 电路层将电信号加载在光信号上, 调制光经过耦合器进入波导芯, 再经耦合器进入光电探测器转换为电信号, 最后经过放大电路做后续数据处理, 实现高性能板级光电互联。

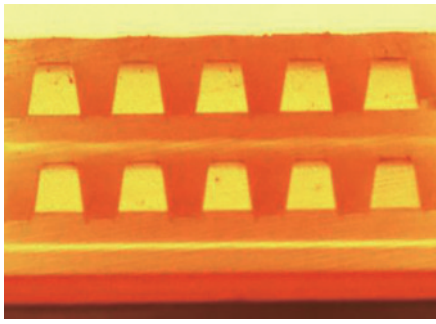


图 3 多光学层波导薄膜^[10]

Fig 3 Multi-layer waveguide films^[10]

光纤互联原理与聚合物波导光电互联基本一样,只是光信号传输介质是光纤,板级光纤光电互联技术一般是指在 PCB 中埋入光纤进行光传输,在光纤阵列两端嵌入耦合器实现光电器件阵列与光纤阵列之间的耦合,整体结构如图 4^[11]所示。

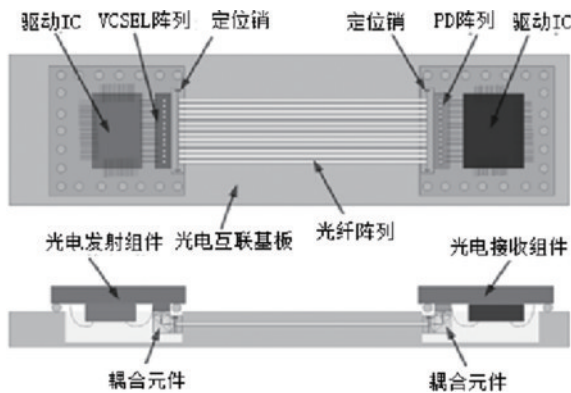


图 4 光纤式光电互联结构图^[11]

Fig. 4 Structure diagram of optical fiber photoelectric interconnection^[11]

3 板级光电互联技术国内外研究现状

板级光电互联技术从 20 世纪 90 年代开始研究,主要集中在聚合物光波导光电互联技术与光纤光电互联技术,经过几十年的不断研究,取得一定的成果。

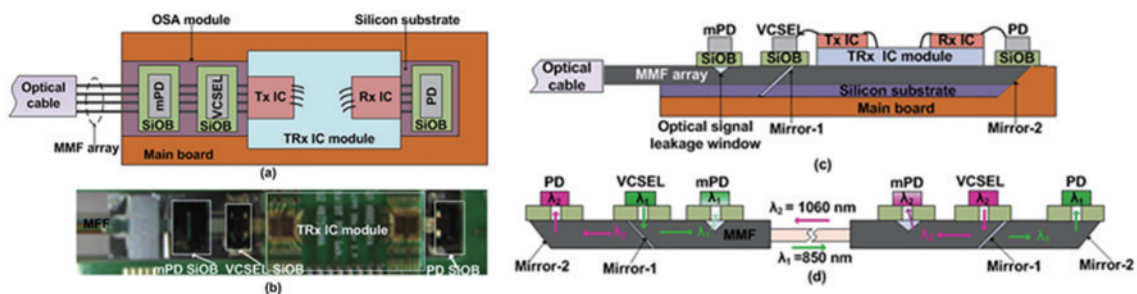


图 5 OSA TRx 模块^[15]。(a)俯视图;(d)实物图;(d)横截面图;(d)全双工传输示意图

Fig. 5 OSA TRx module^[15]. (a) Top view; (b) physical picture; (c) cross section; (d) full duplex transmission diagram

2021 年毛久兵等^[16]研究了裸光纤埋入式挠性电路(FEOPCB),可实现不同子系统之间的柔性互联。FEOPCB 如图 7 所示,耐高温光纤选用聚酰亚胺涂覆

3.1 光纤光电互联技术

韩国情报通信大学 Cho 等^[12]在 2004 年利用 90°的 V 形金刚石开槽技术以及传统 PCB 层压技术制作了嵌入 1×12 光纤阵列的 PCB,选择 50/125 μm 的玻璃光纤与带有聚酰亚胺涂层的玻璃光纤,两种光纤经过层压造成中心位置偏移 ±5 μm,10 cm 的传播损耗分别为 1.5 dB 与 1 dB,12 通道显示出良好的光传输均匀性,并测试了该板具有 2.5 Gbit/s 的数据传输能力。

2006 年德国卡尔斯鲁厄公司研究中心 Schneider 等^[13]提出一种基于标准多模光纤的板级光学互联,目标是达到 2.5 Gbit/s 的传输速率,该研究将光纤嵌入到多层 PCB 中以实现光互连,并提出一种结合激光二极管或光电二极管的耦合元件,将其放置在 PCB 内部空腔上实现有源器件与嵌入光纤的耦合。

华中科技大学 Yuan 等^[14]在 2008 年提出一种在 PCB 中嵌入光纤的光电互联结构,在埋入光纤两端制造 45°全内反射镜为耦合结构,理论分析了耦合结构的耦合效率以及对准误差对耦合效率的影响,实现了每通道 2.5 Gbit/s 的数据传输速率。

韩国科学技术学院 Nga 等^[15]在 2014 年提出一种每通道支持 10 Gbit/s 全双工传输的光链路,通信波长为 850 nm 和 1060 nm,该系统包括两个光谱仪(OSA)收发器(TRx)以及 1×4 光纤阵列。OSA TRx 模块结构图以及全双工传输示意图如图 5 所示,包括带有驱动与接收芯片的 TRx IC、安装在 SiOB 上的四通道的垂直腔面发射激光器(VCSEL)、PD 和监测光电探测器(mPD)以及光线阵列中的 45°微镜。微镜具有过滤波长与反射的功能,其反射率与透过率分别为 95% 与 89%,光纤阵列埋在硅基板的 V 形槽内,硅基板与 SiOB 上的对准标记实现光学器件与光纤的对准,横向误差在 5 μm 内,mPD 用来监测 VCSEL 的光强,OSA TRx 封装在基于 QSFP 标准设计的主板上。然后,设计制作了基于 SMA 连接器的 4 通道评估板,如图 6 所示,两个 QSFP 模块采用 OM3 标准多模光纤(MMF)阵列连接,并测试了该系统支持每通道 10 Gbit/s 全双工传输。

层裸光纤,在双面覆铜 PI 基材上利用激光烧蚀技术制作定位槽,定位槽尺寸为 155 μm,光纤间距为 250 μm,槽深为 120 μm,然后在埋入裸光纤的 PI 基材的上下表

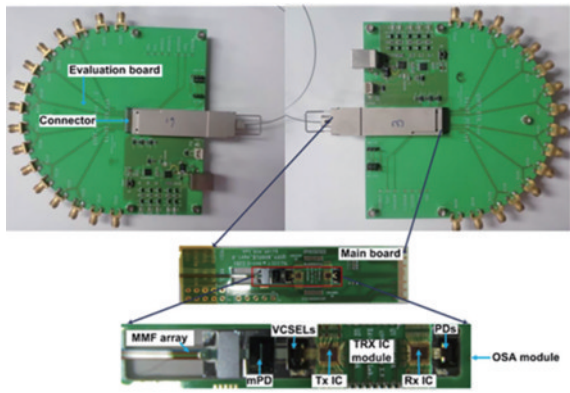


图 6 基于 SMA 连接器的 4 通道评估板^[15]

Fig. 6 4-channel evaluation board based on SMA connector^[15]

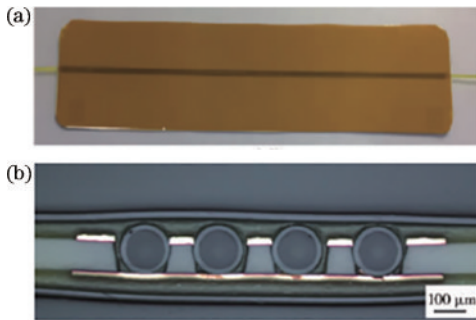


图 7 FEOPCB^[16]。(a)实物图；(b)横截面图

Fig. 7 FEOPCB^[16]. (a) Physical picture; (b) cross section picture

面放置半固化片和 PI 保护层进行层压,埋入的裸光纤端面光洁,无高温降解,无裂纹及断裂等缺陷,可承受层压环境,通过测试,FEOPCB 可传输 10 Gbit/s 速率信号,误码率小于 10^{-16} 。

3.2 聚合物光波导光电互联技术

2004 年美国德克萨斯大学 Choi 等^[17-18]研究了完全嵌入式板级光电互联柔性聚合物光波导薄膜制造和光电器件的集成,整体结构如图 8 所示,制作了带有 VCSEL 激光器阵列、探测器阵列、两端是 45° 微镜的波导阵列的柔性聚合物波导薄膜。波导芯层尺寸 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,包层为 Topas 环烯烃共聚物,厚度为 $127 \mu\text{m}$ 。在 850 nm 处的传播损耗为 0.6 dB/cm,柔性

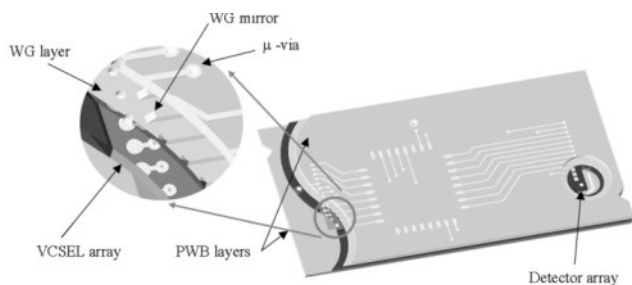


图 8 完全嵌入式光电互联板结构图^[17]

Fig. 8 Fully embedded photoelectric interconnection board composition^[17]

波导薄膜是基于软模具成形技术制作的。波导两端的 45° 微镜是利用切片刀片切割波导制成的,用于调制 VCSEL 的驱动信号和在光接收器处接收的信号通过连接到 PC 板表面的电通孔流动,在 VCSEL 阵列背面电镀 $30 \mu\text{m}$ 厚的铜膜作为有效散热结构,并讨论了光电模块贴装技术。

2005 年美国富士通实验室 Glebov 等^[19]研究了一种将 45° 反射镜与聚合物波导集成到波导薄膜中的技术,采用光刻技术制作波导阵列以及 45° 反射镜的原始楔形底座,使用 90° 的“V”形金刚石刀片切割楔形底座形成 45° 镜面,允许在几个微米内对反射镜平面进行横向和垂直定位。只对波导薄膜测量,波导传输损耗低至 0.05 dB/cm,耦合损耗在 0.5 dB~0.8 dB,传输速率可达到 10 Gbit/s。

2005 年芬兰 OHIDA (Optics on Future Printed Circuit Board in High Speed Data Transmission Applications) 国家项目中研究了用于板级光电互联的集成微镜聚合物多模阶跃光波导并进行了测试^[20],以 FR4 为基板材料, SU-8-50 环氧树脂为芯层材料, MR-L6100XP 为包层材料,通过优化紫外光刻工艺步骤来制作波导以及微镜,通过改变入射光的角度 ($50^\circ \sim 60^\circ$) 控制微镜的倾角 ($36^\circ \sim 45^\circ$),制作出低粗糙度的芯层 (6.5 nm) 与包层 (7 nm) 并良好接触,镜面粗糙度为 100 nm,镜角为 $45^\circ \pm 2^\circ$,用截断法测得在 850 nm 处带有微镜波导与不带有微镜波导的传播损耗分别为 (0.60 ± 0.03) dB/cm 和 0.64 dB/cm,微镜的过度损耗为 1.8 dB ~ 2.3 dB。该项目在 2006 年研究了光学互联系统的封装与集成^[21], TX/RX 结构示意图与制作实物图如图 9 所示,在低温共烧陶瓷 (LTCC) 衬底上构建了 VCSEL 与 PD 阵列、驱动 IC、放大电路、微透镜阵列,在微镜波导阵列上方也安装一层微透镜阵列,利用 BGA 封装技术将 LTCC 集成到 FR4 基板上, BGA 焊球也用来确定光电器件与波导之间的距离,在 LTCC 与波导加工过程中利用通孔以及对准标记来实现各模块之间的对准。

2006 年美国 Terabus 项目中研究了板级 TB/S 的芯片间数据传输技术,整体结构示意图如图 10^[22]所示,基于一种类似芯片的光电封装结构 (Optochip), 直接组装到有机卡 (Optocard) 上,开发了一套完整的技术。

VCSEL 和光电二极管阵列 (4×12) 倒装芯片连接到 $0.13 \mu\text{m}$ CMOS 实现的驱动器和接收器 IC 阵列。IC 阵列依次倒装到一个 1.2 cm^2 的硅载波插入器上,以完成发射模块和接收模块。在 Optocard 利用紫外光刻工艺制作了尺寸为 $30 \text{ cm} \times 35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ 的 4×12 错位波导阵列^[23],采用激光烧蚀与镀金工艺在波导两端制作 45° 微镜。研制了不同口径高速调制的 VCSEL 阵列^[24] 及可高速探测的 PD 阵列,并在其背面对各个 VCSEL 与 PD 刻蚀了单透镜阵列。研究了驱动与接收 COMS IC^[25-26] 以及硅中间

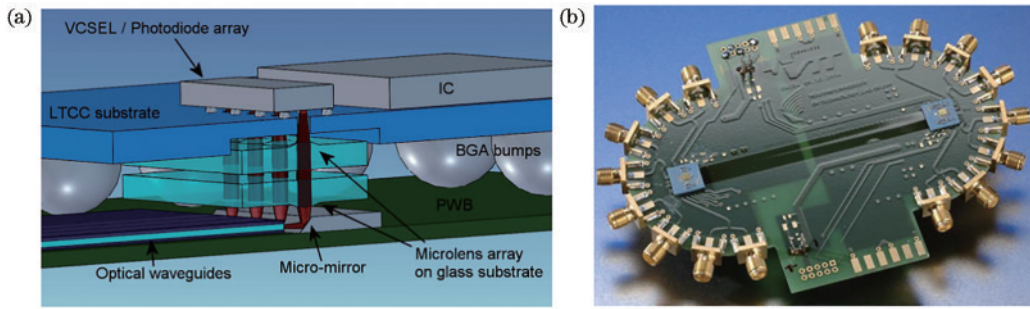


图 9 光学互联系统^[21]。(a)结构示意图;(b)制作实物图

Fig. 9 Optical interconnection system^[21]. (a) Structure diagram; (b) production of the physical picture

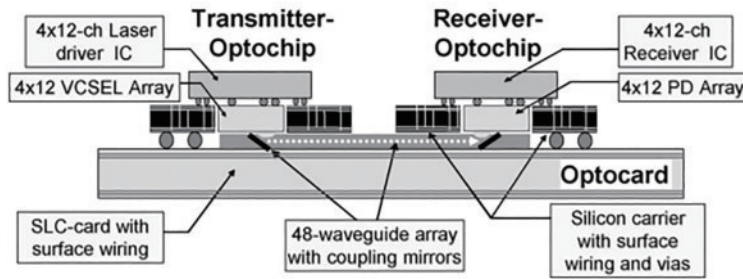


图 10 Terabus 整体结构示意图^[22]

Fig. 10 Schematic diagram of the overall structure of Terabus^[22]

层^[27],通过开发的这些光电模块来减小尺寸、提高了速度。对各个模块封装及测试,演示了每通道高达 20 Gbit/s 的发射机性能和高达 14 Gbit/s 的接收机性能,在 MMF 光纤中可进行 10 Gbit/s 速率数据传输,

总功耗低于 5 mW/(Gbit·s)。

2008 年 IBM 公司提出了一种基于聚合物波导板级光电互联技术,整体结构示意图、实物图以及测试结构如图 11^[28]所示。

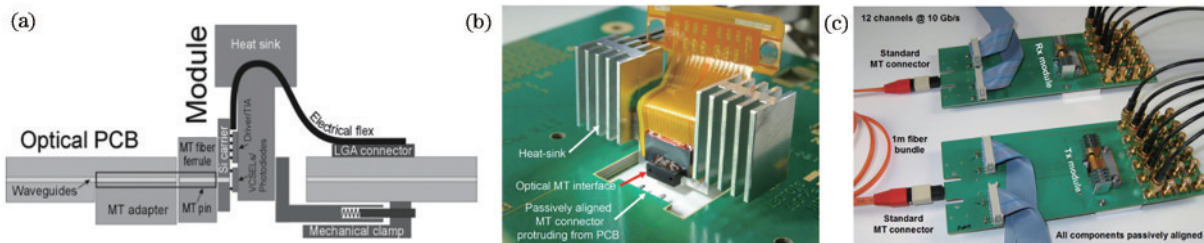


图 11 IBM 公司光电互联结构示意图^[28]。(a)示意图;(b)实物图;(c)测试结构图

Fig. 11 Structure diagram of IBM company photoelectric interconnection^[28]. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram; (c) test structure diagram

其聚合物波导层与发射或接收模块是通过 MT 连接器连接的,开发了一种多波导制造工具,可实现 1 μm 以内的大面积定位精度,如图 12^[28]所示,利用该工具在 FR4 基板上蚀刻光波导,光波导蚀刻以及 MT 适配器安装位置对准分别是通过 RCC 层内薄铜层上的光学对准标记以及机械对准标记进行无源对准的^[29],如图 13 所示。

光学模块的每个元件都集成在高阻硅基板上^[30],如图 11(c)所示,该模块包括 850 nm 10 Gbit/s VCSEL 阵列与 PD 阵列、驱动接收 IC、一个带有突出光纤的 MT 光纤套圈接口以及一条用于信号传输和命令的 LCP 柔性电缆组成。测试结构图如图 11 所示,一个通道总体损耗

为 9 dB,单个通道可支持 10 Gbit/s 的传输速率。利用被动对准技术实现 5 μm 的错位误差,实现了可批量制造和组装,并且可灵活应用于多种高速率数据传输场合。

2008 年新加坡微电子和单微米研究机构对全嵌入式板级柔性聚合物波导制作工艺进行了优化与表征^[31]。同年,德国弗劳恩霍夫硅酸盐研究所提出了一种双光子吸收(TPA)写入波导的技术,如图 14^[32]所示,在预先集成有激光器与探测器的 PCB 表面涂覆一层无机-有机杂化聚合物,通过激光照射,材料中基团发生交联在需要的位置形成具有一定折射率差的波导芯与包层,通过改变激光参数(焦点、功率、波长等),来改变波导结构。这种技术相比于紫外光刻激光直写等

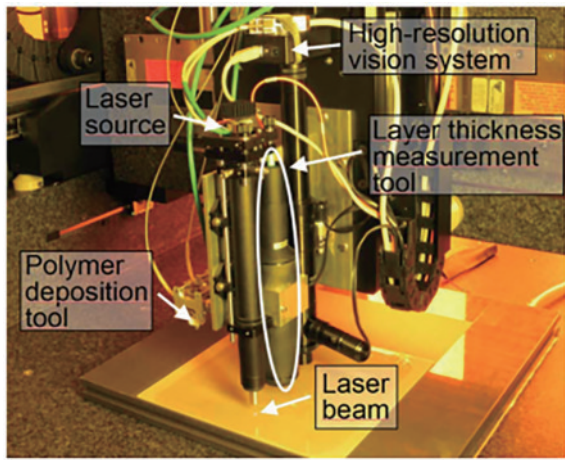


图 12 波导制造工具^[28]

Fig. 12 Waveguide fabrication tool^[28]

工艺,制作步骤减少,耗材降低。

2008年日本日立化学株式会社研究了高速的柔性光电互联电路板^[33],整体结构如图 15 所示,是由电路层光路层两部分组成的,研制了光波导薄膜,传播损耗为 0.05 dB/cm(850 nm),具有高稳定性与低弯曲损耗。以 25 μm 厚度的聚酰亚胺为基板制作柔性电路层,利用 10 μm 厚的黏合层将电路层与光路层黏合,无需制造光学通孔。45°耦合微镜利用金刚石刀

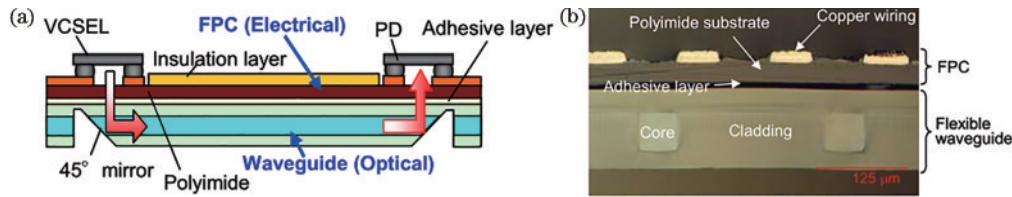


图 15 柔性光电互联板^[33]。(a)示意图;(b)横截面图

Fig. 15 Flexible photoelectric interconnection board^[33]. (a) Schematic diagram; (b) cross section

2009年美国佐治亚理工学院提出一种通过改进接触光刻技术在 PCB 上制作集成 45°全内反射镜 (TIR) 聚合物光波导的简单方法^[34]。适用于光波导的大面板级制造且与 PCB 制造设备和工艺兼容,TIR 倾角精度在 1°内,插入损耗为 1.6 dB。

2009年韩国光电子技术研究所提出了一种直接集成在柔性光电混合印制板上的光互联模块^[35],结构示意图与实物图如图 16^[36]所示。在聚合物光波导层

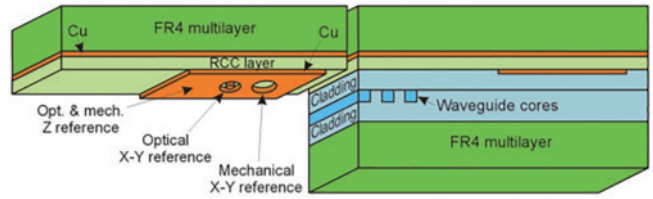


图 13 对准标记、波导层整体结构示意图^[28]

Fig. 13 Schematic diagram of alignment mark and waveguide layer^[28]

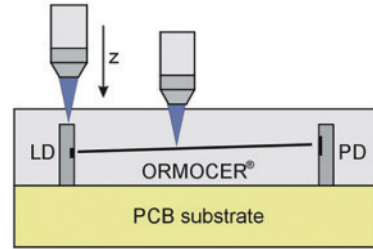


图 14 TPA 技术制作波导示意图^[32]

Fig. 14 Schematic diagram of waveguide made by TPA technology^[32]

片切割工艺制造。在制作的柔性光电互联板上集成了 VCSEL 与 PD 阵列。通过测试可知,制作的光电互联板总体损耗为 3.7 dB,单通道可传输速率达到 10 Gbit/s。

上集成了光电器件,选用热稳定性良好的聚醚砜 (PES) 作为波导芯,环氧黏合剂薄膜为包层。通过“V”形与矩形刀片锯切法制备 45°微镜与光波导通道,并在镜面上利用电子束蒸发工艺沉积金属薄膜提高反射率。层压包层与芯层制备出波导薄膜,其在弯曲半径大于 3 mm 时的损耗低于 2 dB。在波导薄膜上通过激光钻孔、镀铜、刻蚀等工艺制作电路层,VCSEL、PD 等芯片倒装在板子上,通过 SMA 接口与外部连接,整

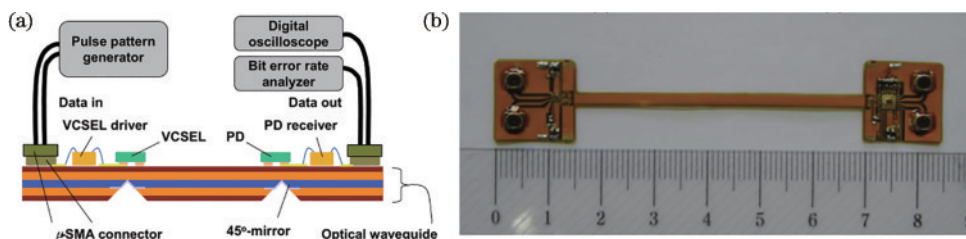


图 16 光电混合印制板^[36]。(a)结构示意图;(b)实物图

Fig. 16 Photoelectric hybrid printing plate^[36]. (a) Structure diagram; (b) physical picture

体光电混合印制板总体损耗为 15 dB。

该团队在 2012 年基于前面所述的柔性光电混合印制板进行了器件与芯片的封装,如图 17^[37]所示,将垂直腔表面发射激光器和光电二极管直接倒装到柔性 OPCB 上,然后对驱动 IC 和接收 IC 进行管芯和引线键合,利用 ZIF 连接器实现电气连接。可插拔应用于多种场合。

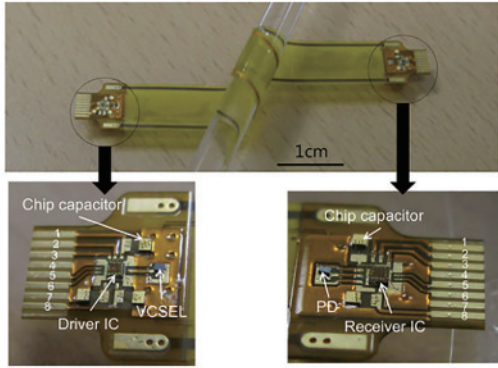


图 17 完整光电互联模块^[37]

Fig. 17 Complete optical interconnection module^[37]

2010 年日本住友胶木公司 COIN 项目团队提出了一种称为光寻址的新型聚合物光波导制作工艺^[38]。利用其公司研制的聚降冰片烯化学材料,聚合物光波导生成是基于降冰片烯单体聚合的化学反应,通过光掩模法,激活芯层材料内的催化剂使得降冰片烯单体在光照区域聚合形成有特定折射率差的光波导通道与相邻包层,然后将上下包层与芯层层压形成热稳定性好的波导薄膜。通道间距在 20 μm 以上,光传播损耗保持在 0.05 dB/cm,光寻址工艺流程示意图如图 18 所示。波导两端的 45°微镜是通过激光烧蚀工艺制成的,优化激光功率,镜面粗糙度在 100 nm 以内。将波导薄膜与具有光电器件和集成电路的柔性电路层集成,如图 19 所示,并演示了整体系统 4.25 Gbit/s 速率的数据传输。

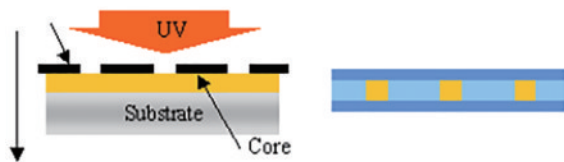


图 18 光寻址工艺流程示意图^[38]

Fig. 18 Schematic diagram of optical addressing process^[38]

2012 年该团队在光寻址工艺的基础上开发了新的光电收发模块,可进行双向传输,单通道数据传输速率达到 16 Gbit/s,结构图如图 20^[39]所示。集成微镜的波导薄膜制作与前面一样,柔性电路板(FPC)层是在聚酰亚胺薄膜上利用减法刻蚀制作的电路层。FPC 焊盘上化学镀镍和金,VCSEL 阵列、PD 阵列、VCSEL 驱动器及 TIA 倒装在 FPC 上,通过使用倒装芯片键合器的图像识别工具,实现了波导片在 FPC 上的精确放置,相对对准精度约为 10 μm。

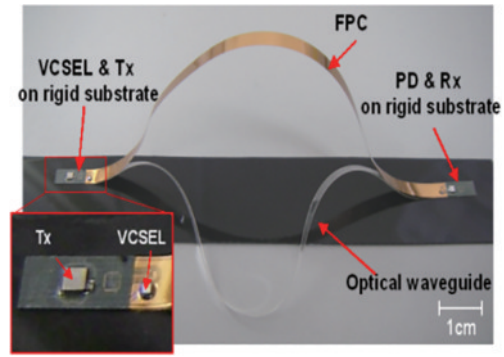


图 19 COIN 项目光电柔性印刷电路板^[38]

Fig. 19 COIN Project photoelectric flexible printed circuit board^[38]

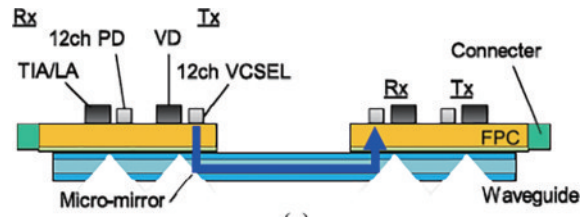


图 20 光电印刷电路板^[39]

Fig. 20 Photoelectric printed circuit board^[39]

2010 年华中科技大学提出了一种在 PCB 上通过嵌入聚合物光波导实现芯片间光电互连网络,用于分布式计算机系统^[40-42]。整体结构原理图与实物图如图 21 所示。VCSEL 与 PD 及其驱动芯片通过 BGA 技术连接到 VLSI 芯片上并通过 SMT 技术安装在 PCB 上,安装同时通过对准标记将 VCSEL 和 PD 与带有 45°端面光纤阵列的 MT 耦合器对准耦合。采用 VSC3312 作为交换节点在 PCB 上实现分布式内存多处理器系统的 2×2 光电互连网络,演示了单通道 3.125 Gbit/s 的数据速率。

2011 年日本日立株式会社开发了一种基于聚合物波导和高性能透镜集成表面的发射激光器和光电二极管的高速、大容量、低功耗的光学印刷电路板,支持每通道 20 Gbit/s 的数据传输速率^[43-44],光电印制板结构示意图如图 22^[43]所示。提出一种由集成在波导上方的非球面微透镜阵列和集成在激光器发射表面上微透镜阵列组成的双透镜光学耦合结构,结构示意图如图 23 所示。通过 MT 套圈(多模光纤)和波导的主动对准方法放置波导上方的微透镜阵列,提高了耦合效率。通过薄膜层压和紫外光刻工艺制作了集成 45°微镜的 48 通道两层光通道的波导薄膜^[45]。光发射模块与接收模块集成在 12 mm×12 mm 的陶瓷基板上,激光器是 20 Gbit/s 可直接调制的分布式反馈激光器,集成透镜的 PIN 光电二极管具有大带宽(30 GHz)和高响应率(0.8 A/W)^[46],测试结构示意图如图 24 所示。

2013 年美国特拉华大学提出一种可实现 100 Tb/cm² 高带宽密度的芯片间光电互连的柔性光子平台,结构示意图如图 25^[47]所示。波导薄膜下包层

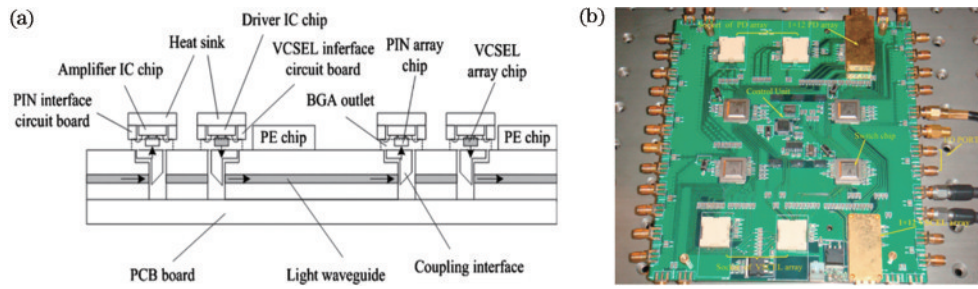


图 21 华中科技大学光电互联板^[41]。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 21 Photoelectric interconnection board of Huazhong University of Science and Technology^[41]. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

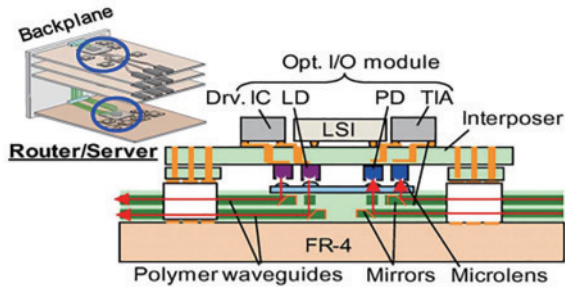


图 22 光电印刷电路板^[43]

Fig. 22 Photoelectric printed circuit board^[43]

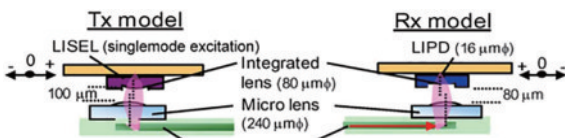


图 23 双透镜光学耦合结构示意图^[43]

Fig. 23 Schematic diagram of dual-lens optical coupling structure^[43]

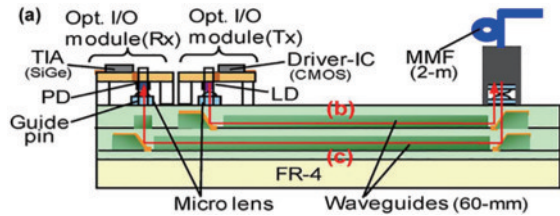


图 24 测试结构示意图^[43]

Fig. 24 Schematic diagram of test structure^[43]

材料是聚酰亚胺,芯层材料是高折射率的硫族化物玻璃。利用热纳米压印技术制作波导通道,波导间距允许小于 $10\ \mu\text{m}$ 。上包层是SU-8聚合物,同时也是波导薄膜表层III-V族管芯连接的黏合剂。波导传播损耗为 $0.8\ \text{dB/cm}$,具有较好的机械鲁棒性与热稳定性。III-V族管芯先键合在波导薄膜上然后光刻图案化,键合期间不需对准,但图案化时需与波导通道对准。此方案在整体封装时不需光学对准。但整体系统并未完成,在后续工作中将进行III-V族管芯机械削薄、图案化、封装等全光子链路演示。

台湾科技大学2013年制作了一种柔性光波导型电子印刷电路板(EPCB)如图26^[48]所示。通过射线跟

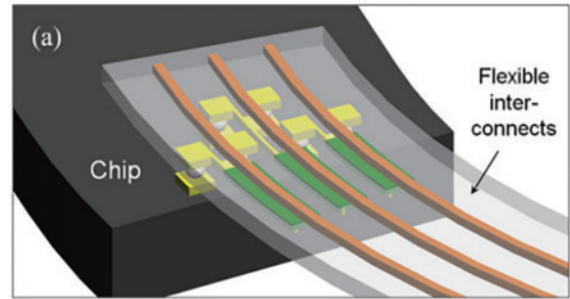


图 25 芯片间柔性光子链路结构图^[47]

Fig. 25 Structure of the flexible photonic link between chips^[47]

踪法仿真了VCSEL/PD到波导表面高度、镜角以及镜面与VCSEL/PD之间的偏移对耦合损耗的影响。制作了集成 $(45 \pm 1)^\circ$ 的耦合镜的四通道柔性波导薄膜,具有较好的稳定性,传输损耗为 $0.1\ \text{dB/cm}$ (850 nm),镜面耦合损耗为 $0.8\ \text{dB}$ 。在发射与接收模块上集成了 1×4 阵列VCSEL与PD以及相应的驱动芯片与放大器等,通过SMA接口与外界输入信号连接,演示了单通道 $2.5\ \text{Gbit/s}$ 的数据传输速率。

2014年以来英国剑桥大学开展了一种应用于板

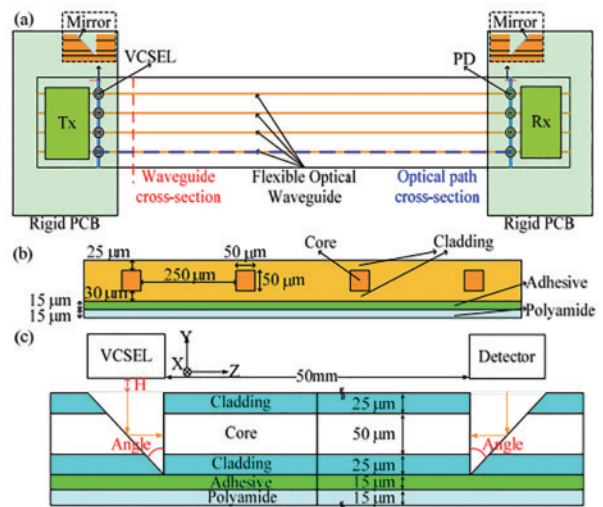


图 26 EPCB^[48]。(a) EPCB 俯视图;(b)输入端波导界面图;(c)光路截面图

Fig. 26 EPCB^[48]. (a) Top view of EPCB; (b) input waveguide interface diagram; (c) optical path cross-section diagram

级光电互联的多模聚合物波导研究,并成功演示了支持 25 Gbit/s 数据传输速率、1.4 m 长、带宽性能稳定的多模螺旋波导^[49]与支持 40 Gbit/s 数据传输速率、1 m 长、带宽性能稳定的多模螺旋波导^[50],并对波导带宽有限问题展开研究。

2015 年德国弗劳恩霍夫可靠性和微集成研究所提出了带有 96 光通道的八层光学层嵌入电路板中的光电印制板^[51]。光学层材料为康宁大猩猩玻璃,通过两步热离子(玻璃中的钠离子与玻璃表层的银离子)交换在玻璃正反面上集成光波导,优化工艺参数来提高数值孔径以及降低传播损耗,各光路层垂直间距为 250 μm 以便与标准 MT 套圈进行信道匹配。通过钻孔、电镀、蚀刻工艺来制作电路层并通过冷层压工艺制成光电印制板。所有对准是利用玻璃板表面的对准标记来实现的,整体在垂直方向上对准较好,在水平与轴向偏移较大,通过为外部光纤耦合对嵌入电路板的 96 通道进行表征,平均传播损耗为 (3.3 ± 0.32) dB,整体集成的插入损耗为 0.2 dB,单通道数据传输速率达到 32 Gbit/s。

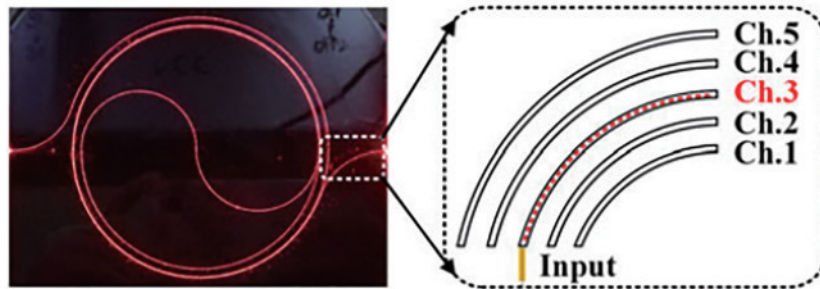


图 27 上海交通大学螺旋形聚合物光波导^[55]

Fig. 27 Helical polymer optical waveguide of Shanghai Jiao Tong University^[55]

2020 年日本九州大学研究了耐高温硅聚合物混合调制器^[57],用于超快速节能数据传输。其结构如图 28 所示。采用行波 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)结构,由超薄硅芯、测链 EO 聚合物、 SiO_2 包层以及电极组成,制作步骤如图 29 所示。利用先进的分子工程技术对 EO 聚合物优化使其具有高玻璃化温度($T_g=172^\circ\text{C}$)、良好的热稳定性以及高电光系数。对电极优

国防科技大学窦文华教授对用于板级光电互联的多模聚硅氧烷光波导制备过程中的关键技术做了深入的研究^[52-53],并针对光波导制备过程中的主要问题改进了光波导制备工艺,对聚硅氧烷光波导的弯曲损耗进行分析。设计了一个具有垂直输入输出与聚焦功能的聚合物变栅距光栅耦合器^[54]。

上海交通大学先进光通信系统与网络国家重点实验室 2018 年在硅基板上使用光固化硅氧烷材料制作了用于板级光电互联的 946 mm 长的螺旋形聚合物波导并对其性能进行表征^[55]。波导如图 27 所示,制作的波导传播损耗在 850 nm 波长下为 0.046 dB/cm,3 dB 不对准偏差为 $\pm 20 \mu\text{m}$,具有较低的通道间串扰、良好的稳定性以及光纤兼容性。测试了制作光波导的高速性能,成功演示了数据速率为 25 Gbit/s 与 30 Gbit/s 的非归零(NRZ)无错误传输,数据速率为 56 Gbit/s 的 PAM4 传输误码率高达 10^{-4} 。该实验室在 2020 年提出了一种高密度聚合物波导自动布局算法并演示了在 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的区域实现 512 通道布局^[56]。

化($8 \text{ mm} \times 16 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$)使半波电压为 1.44 V/cm (1550 nm)。MZI 两臂长度 8 mm,间距 200 μm ,EO 厚度为 1 μm ,硅芯波导尺寸为 $4 \mu\text{m} \times 40 \text{ nm}$ 。EO 层光场分布如图 30 所示,其功率占总功率 73.8%。调制器实测 3 dB 带宽为 68 GHz,开关键控传输速率达到 120 Gbit/s, PAM4 传输速率达到 200 Gbit/s,可承受环境温度达到 110°C 并具有长期热稳定性。

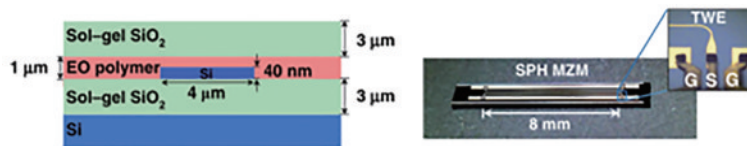


图 28 硅聚合物混合调制器结构图和实物图^[57]

Fig. 28 Structure diagram and physical diagram of silicon polymer mixed modulator^[57]

2022 年 Shi 等^[58]提出一种基于光学过硅孔(TSV)与光栅结合的单向垂直耦合结构。耦合结构如图 31 所示,光栅器件实现光束垂直耦合,分布式布拉格反射镜(DBR)使光束单向传播提高耦合效率,苯并环丁烯(BCB)起到黏结作用同时减少表面反射损失提高耦合效率。光学硅通孔技术(TSV)结构类似于光纤,使

得光在 TSV 内部传输。通过时域有限差分方法优化参数,模拟耦合效率达到 80.6%,该结构可用于图 32 所示的板级三维光电集成系统中三维光互连。

2022 年 Krishna 等^[59]提出了一种可扩展性的封装光学互联设计。将硅光子学与聚合物-玻璃中间体技术结合,实现异构集成,用于中等距离的芯片与芯片之

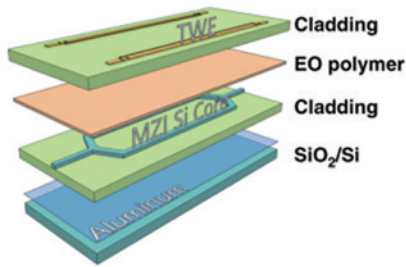


图 29 调制器制作流程图^[57]

Fig. 29 Modulator production flow chart^[57]

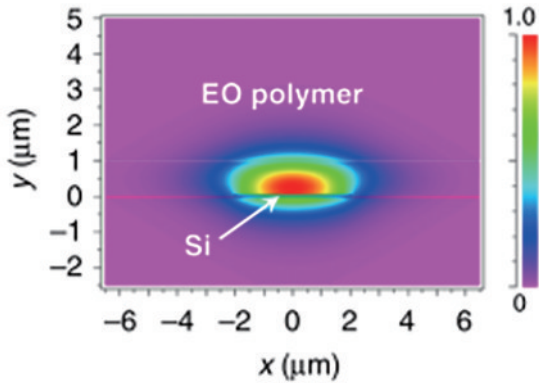


图 30 EO 层光场分布图^[57]

Fig. 30 Light field distribution of EO layer^[57]

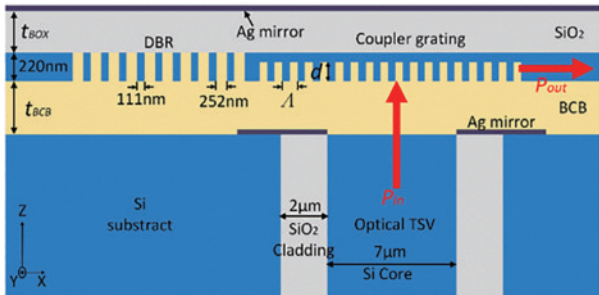


图 31 耦合器结构图^[58]

Fig. 31 Structure diagram of coupler^[58]

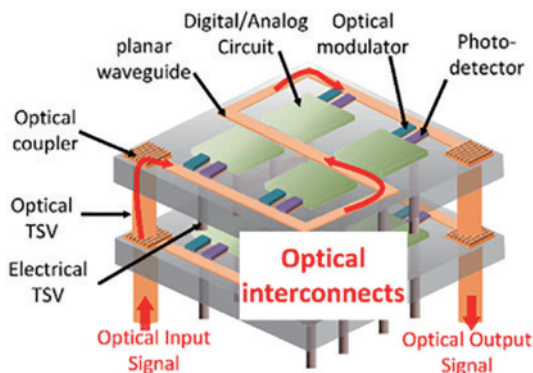


图 32 三维光电集成系统图^[58]

Fig. 32 3D photoelectric integrated system diagram^[58]

间通信。对于硅光芯片收发部分采用多通道 WDM 架构,如图 33 所示。聚合物和硅波导在玻璃中间层上的

封装布局如图 34 所示。在玻璃中间层上制作苯并环丁烯(BCB)波导用于耦合外部光与硅芯片之间的互连,焊锡凸点用于将驱动放大电子芯片通过玻璃中间层内部的金属层连接到硅光芯片。BCB 波导与硅总线波导通过倏逝波耦合,文中对耦合机制进行仿真设计,1500~1600 nm 波段的光耦合效率达到 95% (0.2 dB)~75% (0.9 dB)并对错位造成的耦合效率下降进行了分析。对链路进行分析预算可到达单通道 224 Gbit/s 通信容量,能耗在 1 pJ/bit,互联长度在 8~9 cm,通过降低 BCB 波导损耗可增加互联长度。

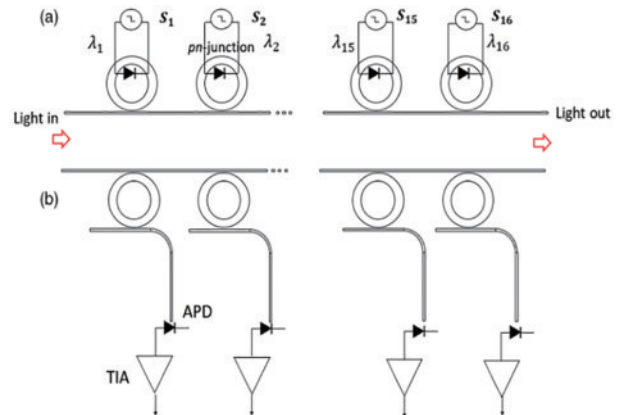


图 33 硅光芯片收发模块架构图^[59]

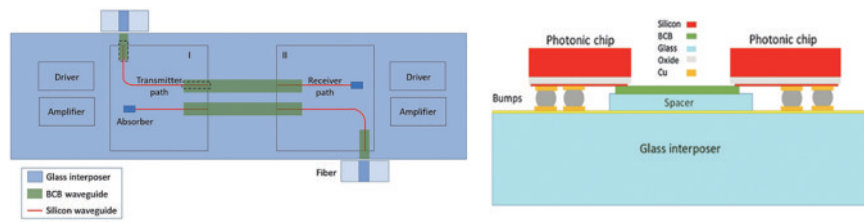
Fig. 33 Transceiver module architecture of silicon optical chip^[59]

3.3 光电互联技术对比

三种光电互联技术都可以解决传统电互联中的问题:1)自由空间光互联应用较为困难,尤其是对于芯片内以及芯片或器件之间,只能使用微光学器件,随着互联密度的增加,微光学器件数量也增加,制作工艺难度增大,且光学器件的放置位置也要求十分精确,对放置工艺要求极高,而且这种互联方式易受外界环境的影响;2)板级聚合物光波导互联适合用于器件与器件之间与板间的互联,在互联速度与密度上有优势,但对波导薄膜的材料性能要求较高,涉及到的制造工艺、PCB 内嵌入波导薄膜工艺也比较复杂,同时存在耦合对准技术以及整体的可维护性等问题;3)光纤光电互联,光纤是目前研究中最成熟的光波导,可承受高功率信号传输且受外界环境影响较小,适用于板间互联也可用于板内芯片或器件之间互联,但在槽内放入光纤时只能一根一根放,难以批量制作,尤其对于多光层多通道数情况,而且在光电印制板制作过程的层压环境下容易对光纤造成损坏以及增大光电器件与波导之间对准误差从而导致光损耗增加。

4 板级光电互联关键技术与发展趋势

板级光电互联技术作为解决传统电互联方式限制的高速通信系统、高性能计算机快速发展可行性方案,在光电通信、光电导航等军事领域,高性能计算机以及

图 34 封装布局图和布局截面图^[59]Fig. 34 Package layout diagram and layout section diagram^[59]

民用通信等领域有着独特的优势,其关键技术包括:1)光波导薄膜的设计与加工工艺,高密度、多通道数光波导薄膜的设计提高了系统的信息容量但会伴随着串扰、损耗增加等问题,加工工艺直接影响波导的传输损耗、稳定性等性能;2)高耦合效率的耦合器件的设计与制作以及光电器件与光波导之间高精度对准技术;3)高性能、微小型光电器件的设计与制作以及其相应的热处理;4)印刷电路板内嵌入光波导的层压工艺以及光电模块的封装与集成技术。

随着目前数据容量的不断提高,对高性能计算、高速数据传输速率的需求日益增长,板级光电互联作为替代传统电互联的技术将会朝着以下方向发展:1)高密度、多通道光波导薄膜,充分利用光独立传播的特性,通过对波导通道布局优化,设计交叉、弯曲结构来实现高密度波导薄膜。2)嵌入多光层的光电印刷电路板,尽管通过对波导结构布局优化设计可提高波导通道数,但考虑通道串扰、传播损耗等问题,有限面积内的波导通道数还是会被限制,为解决这一问题,在板内可嵌入多光层波导薄膜来增大数据传输容量,需要注意的是嵌入多光层会带来光电器件与波导之间的对准问题。3)柔韧性,柔性光电印刷电路板可以实现不同平面内子系统之间的互联,提高互联密度,使高性能系统微型化。4)结合电光调制器,利用新型的封装与耦合技术结合不同光子平台的电光调制器,如微环调制器与 Mach-Zehnder 干涉仪,可解决提高数据传输容量时直接调制激光器带宽限制的问题,同时电光调制器体积远小于直接调制激光器,有利于互联系统多通道扩展。

5 结束语

本文论述了光电互联技术相比较于传统的电互联技术具有保持信号的完整性、较低的信号衰减、串扰与时钟歪倾等优点,简要介绍了其定义与分类,并讨论对比了各类互联技术,阐述了板级光电互联技术国内外发展现状、关键技术与发展趋势。国内在该领域中关键技术的研究与发展明显滞后于国外,一些发达国家对于光电互联系统已开发出一套完整的技术,我国针对各部分做了研究,如光波导薄膜设计与制作、耦合器件的设计等,大多数并未集成为完整的光电互联系统,还应对印刷电路板内嵌入波导薄膜工艺、低耦合损耗

的耦合器件设计与制作、高对准精度的对准方法以及光电模块封装与集成技术做深入研究。

参 考 文 献

- [1] Zhou D J, Cheng L. The domestic and international research situation of photoelectric interconnection technology[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 760/761/762: 383-387.
- [2] 刘锦锋, 周文木. 基于板级光电互联印制板发展[J]. *印制电路信息*, 2020, 28(8): 11-23.
Liu J F, Zhou W M. Development of PCB base on board-level photoelectric interconnection[J]. *Printed Circuit Information*, 2020, 28(8): 11-23.
- [3] 杨伟, 毛久兵, 冯晓娟. 板级波导光互联技术研究现状及发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 060004.
Yang W, Mao J B, Feng X J. Research status and developing trend for waveguide-based board-level optical interconnects technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 060004.
- [4] Miller D A B. Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(6): 728-749.
- [5] 陈正浩. 电气互联技术的现状及发展趋势[J]. *电讯技术*, 2007, 47(6): 12-18.
Chen Z H. The Current status and developing trend of electrical interconnection technology[J]. *Telecommunication Engineering*, 2007, 47(6): 12-18.
- [6] 周德俭, 吴兆华. 光电互联技术及其发展[J]. *桂林电子科技大学学报*, 2011, 31(4): 259-265.
Zhou D J, Wu Z H. Summary of photoelectric interconnection technology[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2011, 31(4): 259-265.
- [7] Lau J H, Lim Y Y, Lim T G, et al. Design and analysis of 3D stacked optoelectronics on optical printed circuit boards[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6899: 689907.
- [8] Ciftcioglu B, Berman R, Zhang J, et al. A 3-D integrated intrachip free-space optical interconnect for many-core chips[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(3): 164-166.
- [9] Ciftcioglu B, Berman R, Wang S, et al. 3-D integrated heterogeneous intra-chip free-space optical interconnect [J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4331-4345.
- [10] Hendrickx N, Van Steenberge G, Bosman E, et al. Towards flexible routing schemes for polymer optical interconnections on printed circuit boards[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6899: 689904.
- [11] 成磊. 埋入光纤的光电互联PCBA关键技术研究[D]. 西

- 安: 西安电子科技大学, 2017.
- Cheng L. Research on key technologies of PCBA embedded in optical fiber[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [12] Cho H S, Kang S, Rho B S, et al. Fabrication of fiber-embedded boards using grooving technique for optical interconnection applications[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 3083-3088.
- [13] Schneider M, Kühner T. Optical interconnects on printed circuit boards using embedded optical fibers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6185: 61850L.
- [14] Yuan J, Luo F G, Zhou X J, et al. Optical interconnection in embedded-fiber printer circuit boards [J]. *Optik*, 2008, 119(1): 46-50.
- [15] Nga N T H, Sangirov J, Joo G C, et al. 10 Gbps/ch full-duplex optical link using a single-fiber channel for signal transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(6): 609-612.
- [16] 毛久兵, 许梦婷, 杨伟, 等. 耐温裸光纤在挠性光电电路中的应用[J]. *中国科技论文*, 2021, 16(3): 325-328, 348. Mao J B, Xu M T, Yang W, et al. Application of temperature-resistant bare fiber in flexible electro-optical printed circuit board[J]. *China Sciencepaper*, 2021, 16(3): 325-328, 348.
- [17] 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.
- [18] Chen R T, Lin L, Choi C, et al. Fully embedded board-level guided-wave optoelectronic interconnects[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(6): 780-793.
- [19] Glebov A L, Roman J, Lee M G, et al. Optical interconnect modules with fully integrated reflector mirrors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1540-1542.
- [20] Immonen M, Karppinen M, Kivilahti J K. Fabrication and characterization of polymer optical waveguides with integrated micromirrors for three-dimensional board-level optical interconnects[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2005, 28(4): 304-311.
- [21] Karppinen M, Alajoki T, Tanskanen A, et al. Parallel optical interconnect between ceramic BGA packages on FR4 board using embedded waveguides and passive optical alignments[C]//56th Electronic Components and Technology Conference, May 30-June 2, 2006, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [22] 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.
- [23] Dangel R, Bapst U, Berger C, et al. Development of a low-cost low-loss polymer waveguide technology for parallel optical interconnect applications[C]//Digest of the LEOS Summer Topical Meetings Biophotonics/Optical Interconnects and VLSI Photonics/WBM Microcavities, June 28-30, 2004, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004.
- [24] Lin C K, Tandon A, Djordjev K, et al. High-speed 985 nm bottom-emitting VCSEL arrays for chip-to-chip parallel optical interconnects[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(5): 1332-1339.
- [25] Guckenberger D, Schaub J D, Kucharski D, et al. 1 V, 10 mW, 10 Gb/s CMOS optical receiver front-end[C]//2005 IEEE Radio Frequency integrated Circuits (RFIC) Symposium - Digest of Papers, June 12-14, 2005, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 309-312.
- [26] Kucharski D, Kwark Y, Kuchta D, et al. A 20 Gb/s VCSEL driver with pre-emphasis and regulated output impedance in 0.13 μm CMOS[C]//ISSCC. 2005 IEEE International Digest of Technical Papers. Solid-State Circuits Conference, February 10-10, 2005, San Francisco, CA. New York: IEEE Press, 2005: 222-594.
- [27] Patel C S, Tsang C K, Schuster C, et al. Silicon carrier with deep through-vias, fine pitch wiring and through cavity for parallel optical transceiver[C]//Proceedings Electronic Components and Technology, 2005. ECTC '05, May 31-June 3, 2005, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE Press, 2005: 1318-1324.
- [28] Dangel R, Berger C, Beyeler R, et al. Polymer-waveguide-based board-level optical interconnect technology for datacom applications[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2008, 31(4): 759-767.
- [29] Lamprecht T, Horst F, Dangel R, et al. Passive alignment of optical elements in a printed circuit board [C]//56th Electronic Components and Technology Conference, May 30-June 2, 2006, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [30] Bernabe S, Stevens R, Volpert M, et al. Highly integrated VCSEL-based 10 Gb/s miniature optical sub-assembly[C]//Proceedings Electronic Components and Technology, 2005. ECTC '05, May 31-June 3, 2005, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE Press, 2005: 1333-1338.
- [31] Shiah L L, Teo C, Yee H L, et al. Optimization and characterization of flexible polymeric optical waveguide fabrication process for fully embedded board-level optical interconnects[C]//2008 10th Electronics Packaging Technology Conference, December 9-12, 2008, Singapore. New York: IEEE Press, 2009: 1114-1120.
- [32] Houbertz R, Satzinger V, Schmid V, et al. Optoelectronic printed circuit board: 3D structures written by two-photon absorption[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7053: 70530B.
- [33] Shibata T, Takahashi A. Flexible opto-electronic circuit board for in-device interconnection[C]//2008 58th Electronic Components and Technology Conference, May 27-30, 2008, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE Press, 2008: 261-267.
- [34] 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.
- [35] Rho B S, Lee W J, Lim J W, et al. High-reliability flexible optical printed circuit board for opto-electric interconnections [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(1): 015401.

- [36] Lee W J, Hwang S H, Lim J W, et al. Optical interconnection module integrated on a flexible optical/electrical hybrid printed circuit board[C]//2009 59th Electronic Components and Technology Conference, May 26-29, 2009, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1802-1805.
- [37] Hwang S H, Lee W J, Kim M J, et al. Ultra-thin and low-power optical interconnect module based on a flexible optical printed circuit board[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 075402.
- [38] Mori T, Takahama K, Fujiwara M, et al. Optical and electrical hybrid flexible printed circuit boards with unique photo-defined polymer waveguide layers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7607: 76070S.
- [39] Ito Y, Terada S, Singh M K, et al. Demonstration of high-bandwidth data transmission above 240 Gbps for optoelectronic module with low-loss and low-crosstalk polynorbornene waveguides[C]//2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, May 29 - June 1, 2012, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1526-1531.
- [40] Zong L J, Luo F G, Yu Z H. A new optical interconnection module for high coupling efficiency on EOPCB[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7279: 72790I.
- [41] 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.
- [42] Yu Z H, Luo F G, Di X, et al. Design and fabrication of waveguide-based chip-to-chip optical interconnection network on printed circuit boards[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2010, 3(2): 211-215.
- [43] Matsuoka Y, Kawamura D, Adachi K, et al. 20-Gb/s/ch high-speed low-power 1-Tb/s multilayer optical printed circuit board with lens-integrated optical devices and CMOS IC[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(18): 1352-1354.
- [44] Matsuoka Y, Kawamura D, Ban T, et al. Optical printed circuit board with an efficient optical interface for 480-Gbps/cm² (20 Gbps × 12 ch × 2 layers) high-density optical interconnections[C]//2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, March 21-25, 2010, San Diego, CA, USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2010: JThA58.
- [45] Shishikura M, Matsuoka Y, Ban T, et al. A high-coupling-efficiency multilayer optical printed wiring board with a cube-core structure for high-density optical interconnections[C]//2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference, May 29-June 1, 2007, Sparks, NV, USA. New York: IEEE Press, 2007: 1275-1280.
- [46] Lee Y, Nagatsuma K, Shinoda K, et al. High-performance PIN photodiodes with an integrated aspheric microlens[C]//2009 14th OptoElectronics and Communications Conference, July 13-17, 2009, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2009.
- [47] Li L, Zou Y, Lin H T, et al. A fully-integrated flexible photonic platform for chip-to-chip optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 4080-4086.
- [48] Hsu S H, Tsou C Y, Wang C M, et al. 10 Gb/s optical interconnection on flexible optical waveguide in electronic printed circuit board[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 252-255.
- [49] Bamiedakis N, Chen J, Penty R V, et al. Bandwidth studies on multimode polymer waveguides for ≥25 Gb/s optical interconnects[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2004-2007.
- [50] Bamiedakis N, Chen J, Westbergh P, et al. 40 Gb/s data transmission over a 1-m-long multimode polymer spiral waveguide for board-level optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 33(4): 882-888.
- [51] Brusberg L, Whalley S, Herbst C, et al. Display glass for low-loss and high-density optical interconnects in electro-optical circuit boards with eight optical layers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32528-32540.
- [52] 冯向华, 季家镛, 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.
Feng X H, Ji J R, Dou W H. Bending loss of polysiloxane optical waveguides for optical interconnection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0823003.
- [53] 冯向华, 季家镛, 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.
Feng X H, Ji J R, Dou W H. Fabrication of modified polydimethylsiloxane and multimode optical waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0531003.
- [54] 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.
Feng X H. Research on unit devices for optical interconnection[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [55] Xu X, Ma L, Immonen M, et al. Practical evaluation of polymer waveguides for high-speed and meter-scale on-board optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3486-3493.
- [56] Huang Z J, Ma L, Kuang W J, et al. Automatic high-density polymer waveguide layout for on-board high-speed optical interconnect[C]//2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), October 4-8, 2020, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [57] Lu G W, Hong J X, Qiu F, et al. High-temperature-resistant silicon-polymer hybrid modulator operating at up to 200 Gbit s⁻¹ for energy-efficient datacentres and harsh-environment applications[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4224.
- [58] Shi Y, Ma L, Laboratory P C, et al. High-speed performance evaluation of ultra-flexible polymer waveguides supporting meter-scale optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 27236-27248.
- [59] Krishna R M, Zhang R, Ravichandran S, et al. Polymer waveguide photonic interconnect for multichip communications-based heterogeneous integration[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2022, 16(3): 036002.