

柔性光电互联电路研究现状

毛久兵 杨伟 冯晓娟 李建平

中国电子科技集团公司第三十研究所, 四川 成都 610041

摘要 柔性光电印制电路板(FEOPCB)作为板级光互联的新发展方向,不仅具有光互联的巨大优势,而且还具有柔性电路板的特性,可实现不同子系统间的柔性互联,能够满足高速电子系统轻量化、小型化和高性能化的发展趋势。对国内外柔性光电电路的研究现状进行了详细的阐述与分析,并探讨了该互联电路的关键技术及未来研究方向。

关键词 光电子学; 光互联; 光波导软膜; 柔性光电印制电路板; 聚合物光波导

中图分类号 TN25; TN41 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.080004

Research Status of Flexible Electro-Optical Circuit for Interconnection

Mao Jiubing Yang Wei Feng Xiaojuan Li Jianping

The 30th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract As the latest development direction of the board-level optical interconnection, the flexible electro-optical printed circuit board (FEOPCB) not only has the great advantages of the optical interconnection, but also has the characteristics of the flexible printed circuit board. Which can realize the flexible interconnection between the different subsystems, and meet the development trend of lightweight, compact and high performance for the high speed electronic system. The domestic and oversea research state of FEOPCB is introduced and analyzed in detail. The key technologies and the future research directions of the flexible interconnection circuit are discussed.

Key words optoelectronics; optical interconnection; optical waveguide flex; flexible electro-optical printed circuit board; polymer optical waveguide

OCIS codes 250.5460; 200.4650; 230.7370; 060.4510

1 引言

随着电子技术及制作工艺水平的不断提高,电子产品已向小型化、轻量化、轻薄化、结构复杂化和多功能化方向发展,这将导致系统集成度及互联密度的不断增加。同时,伴随着高速通信技术的飞速发展,信息量呈指数增长,宽带、高速、大容量的信息传输及交换对电子产品内印制电路板(PCB)之间、板到背板之间、多芯片组件之间的互联速率、带宽和密度提出了更高的要求^[1]。在高频情况下,因其固有的物理特性,传统的电互联方式已成为限制高速通信电子产品快速发展的瓶颈。而信息处理未来的发展方向将是“电子处理信息,光子传输信息”,即用光互联技术代替电互联技术实现各功能单元之间的信息传递,以消除电子产品中信息传输所遇到的技术瓶颈,从而实现高速率、大容量、高密度、柔性信息传输。

电子产品形态的未来发展趋势与高速通信技术相切合,必将导致系统高密度化与高速化之间的矛盾。为缓解该冲突,柔性光电印制电路板(FEOPCB)作为替代产品已引起了国内外研究者的关注。FEOPCB将传统柔性电路与光互联技术相结合,不仅具有柔性电路板可折叠、蜷缩、弯曲、连接活动部件及三维布线等特点^[2],还具有光互联高速大容量、低功耗信息传输的特性,并且具有无信号延迟与串扰、无电磁干扰等优点。

收稿日期: 2016-03-21; 收到修改稿日期: 2016-04-18; 网络出版日期: 2016-07-20

作者简介: 毛久兵(1985—),男,博士,工程师,主要从事光电互联及光电子学方面的研究。

E-mail: maojiubing@126.com

2 柔性光电互联电路简介

柔性光电互联电路的结构示意图如图 1 所示,其结构包含柔性电路层与光路层,其中光路层完全嵌入传统的柔性电路板中,采用传输介质(如光纤、光波导)代替传统铜导线,实现板与板之间的高速信号传输,其工作原理与刚性光电印制电路板(EOPCB)相同,电信号通过驱动芯片,由激光器(LD)调制为光信号,并耦合至光路层,由光电探测器(PD)和放大器转换为电信号。电路层则包含电源线、接地线及低速信号线,并集成 LD、PD 及相应的驱动放大电路。

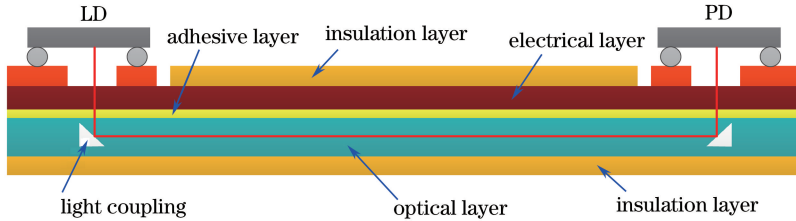


图 1 柔性光电互联电路结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flexible electro-optical interconnection circuit structure

大容量、远距离光纤通信实现了机柜级(设备与设备间)和系统级(机柜与机柜间)的光互联,产品已商业化。然而,光纤应用于短距离光互联(如背板级、板级等)具有其自身的缺陷(组装难、成本高),无法与传统的印制电路板制作工艺兼容。为了解决该问题,刚性 EOPCB 采用低损耗的聚合物波导作为光信号的传输层,其具有良好的电学与机械特性,加工制作成本低,容易实现,互联密度高,且与传统的印制电路板制作技术及表面贴装技术(SMT)兼容,从而获得了国内外科研工作者的深入研究^[1]。

刚性 EOPCB 的制作不需要考虑聚合物波导的机械柔性度,而聚合物光波导软膜是制作柔性光电电路的关键技术之一。柔性光电电路的制作要求波导软膜不仅具有传统聚合物波导的特性(如低光损耗,与印制电路板制作工艺兼容,易于加工,在叠片过程及回流焊高温高压环境中保证性能稳定),还必须具有良好的机械柔性度以及与传统柔性印制电路板基底良好的粘贴特性^[3]。

3 柔性光电互联电路国内外研究现状

目前,国内外众多的科研机构在短距离光电互联方向的研究重点主要集中于刚性光电印制板,开展柔性光电印制板研究的机构并不太多,主要集中于美国、日本、韩国和中国台湾等国家和地区。

3.1 国外研究现状

2001 年德国 Daimler-Chrysler 研究中心在柔性聚氯乙烯(PVC)基底上通过直写技术制作聚合物波导光电背板,开启了柔性波导软膜制作的先河^[4]。2004 年美国德克萨斯大学奥斯汀分校研究了波导软膜完全嵌入的柔性板级光电互联板,其示意图如图 2 所示,在光路层集成了超薄垂直腔表面发射激光器(VCSEL)和 PD 阵列^[5-6]。其芯层采用 SU-8,尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$,传输损耗为 $0.6\ \text{dB/cm}$ ($850\ \text{nm}$),包层采用 Topas 环烯共聚物透明薄膜,厚度为 $127\ \mu\text{m}$,对 $850\ \text{nm}$ 光波吸收损耗为 $0.03\ \text{dB/cm}$ 。利用切片机刀片一次对所有芯层进行切割,制作 45° 耦合镜,但在实际工作中仅基于软模成型技术制作了柔性波导软膜,对光电模块直接贴装技术进行了探讨。

2007 年日本东芝公司半导体研究与发展中心对柔性光电互联电路板开展了研究,制作的产品结构示意图如图 3(a)所示,产品结构包含柔性电路层(铜层)和柔性光路层(波导层),其中光电器件、驱动接收芯片等均贴装于电路层上,通过 45° 镜与光路层进行耦合^[7]。东芝公司制作的 8 通道光波导软膜如图 3(b)所示,其长度为 $8\ \text{cm}$,芯层尺寸为 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$, 45° 镜具有金涂层,可实现双向 4 通道高速光互联。柔性光电互联电路两端具有刚性基板,用于连接同轴电缆。

2008 年日立化工有限公司对柔性光电互联电路板进行了研究,实现了设备内部大容量、高速互联,其产品同样具有电路层和光路层,如图 4(a)所示^[8]。电路层采用以聚酰亚胺为基底的柔性电路板,与柔性光波导软膜通过吸附层进行粘合固接,如图 4(b)所示,电路层的主要作用是集成光电模块等芯片。柔性光波导材料及吸附材料($10\ \mu\text{m}$ 厚度时对 $850\ \text{nm}$ 光波长的透射率为 98%)均由该公司自行研发,光信号透过吸附

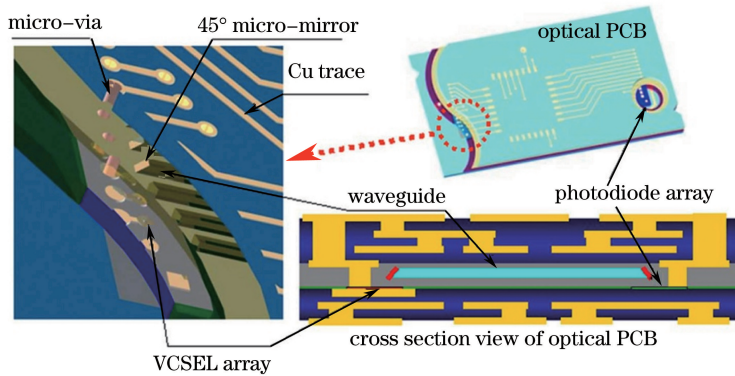


图 2 完全嵌入柔性板级光互联板示意图

Fig. 2 Graph of the fully embedded flexible board-level optical interconnect board architecture

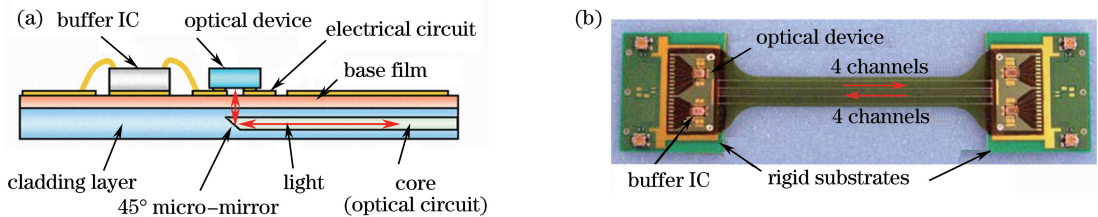


图 3 日本东芝公司制作的光电互联电路板。(a)结构示意图；(b)实物图

Fig. 3 Electro-optical interconnection circuit board fabricated by Japan Toshiba Co., Ltd. .

(a) Schematic diagram of structure; (b) physical photograph

层通过 45° 耦合镜与光波导进行耦合,然后传送到接收端。通过紫外线曝光工艺制作得到波导芯层,其光传输损耗为 0.05 dB/cm (850 nm),弯曲半径为 2 mm 时的损耗约为 0.1 dB 。然而,该项目只是将激光器及光电探测器装贴到柔性光电互联电路板上,并未集成相应的驱动芯片及预放大电路,只是对波导软膜的制作工艺及性能进行了探索性研究。

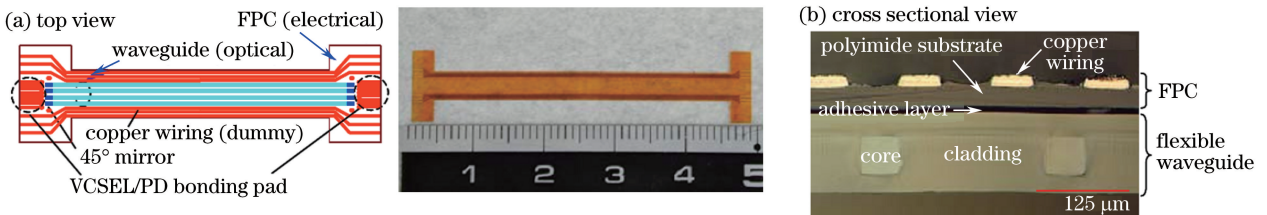


图 4 日立化工有限公司制作的柔性光电互联电路板

Fig. 4 Flexible electro-optical interconnection circuit board fabricated by Hitachi Chemical Co., Ltd.

2009~2010年,韩国光电子技术研究所通过刀片切割方法制作了柔性聚合物光波导软膜^[9-10]。其中,光波导软膜的芯层材料为聚醚砜(PES),以环氧吸附薄膜材料作为包层,且与聚酰亚胺薄膜进行粘结, 45° 反射镜具有镍银涂层。波导的芯层尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,光传输损耗为 1.26 dB/cm ,弯曲半径为 3 mm 时的损耗小于 2 dB 。在光波导软膜基础上再通过钻孔、覆铜、电路刻蚀等流程制作电路层,用于光电模块和芯片的倒装焊接,通过 μSMA 连接器实现子板间的互连,如图 5 所示,该柔性光电印制电路板的总互联损耗为 15 dB 。

2012年,该研究团队基于 ZIF 连接器研制了可拔插的柔性光电互联电路板^[11],如图 6 所示,该电路板由波导光路层及电路层组成,其中电路层包含地、电源及低速信号线。激光器及光电探测器采用倒装焊工艺,驱动芯片及接收芯片采用裸芯片引线键合工艺。

2011~2014年,日本富士通实验室启动了基于柔性电路光学引擎(FPC-OE)的研究,用于下一代服务系统的光互连技术,其包含了电路层与光路层^[12-18]。FPC-OE 结构示意图如图 7(a)所示,电信号通过电气接口输入,然后通过光学引擎转换为光信号,再通过微透镜及 45° 镜耦合入柔性光波导,最后由 MT 连接器与

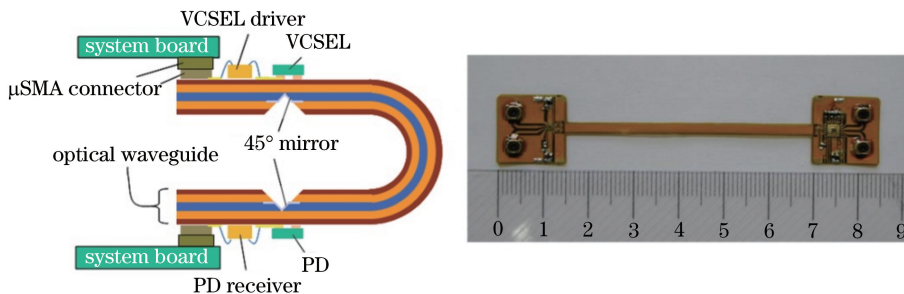


图 5 完全埋入光波导软膜的柔性光电电路互联板

Fig. 5 Flexible electro-optical interconnection circuit board with the fully embedded waveguide flex

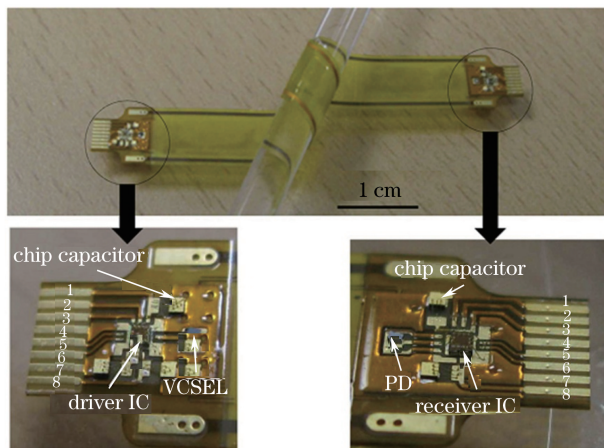


图 6 可拔插柔性光电互联电路板

Fig. 6 Pluggable flexible electro-optical interconnection circuit board

外部电路相连。光学模块及驱动接收电路均通过倒装芯片贴装工艺集成到电路层,并与光路层粘接,如图 7 (b)所示。图 7(c)为富士通实验室制作的 FPC-OE 实物图,其具有双向传输特性,发送和接收部分为 4 通道,并采用过驱动技术,使传统 10 Gb/s 的激光器具有了 25 Gb/s 的传输率。

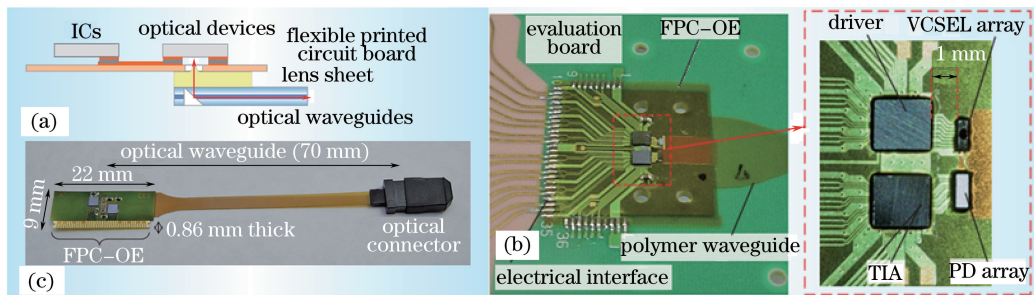


图 7 日本富士通实验室制作的 FPC-OE。(a)结构示意图;(b)局部特写图;(c)实物图

Fig. 7 FPC-OE fabricated by Japan Fujitsu Laboratories. (a) Schematic diagram of structure;

(b) partial close-up photograph; (c) physical photograph

2013 年美国 IBM 和道康宁公司合作研究了 192 通道的柔性聚合物光互联背板^[3,19]。光波导软膜采用道康宁公司生产的新型柔性波导材料,芯层为 WG-1010,包层为 WG-1017,传输损耗小于 0.05 dB/cm (850 nm)。波导软膜采用旋涂与刮涂工艺,并在制作中尝试将软膜完全埋入聚酰亚胺材料中。以此设计制作的光互联背板如图 8(a)所示,其具有 8 个 MT 连接器,每个连接器具有 4 个光传输层,每层具有 12 个光波导通道,长 36 cm。图 8(b)为 IBM775 电源系统中基于光纤 192 通道的光背板,与波导光背板相比,其尺寸较大,通道复杂,维修不便。

Ibiden 美国研究与发展公司、美国特拉华大学、比利时根特大学等科研机构也开展了基于聚合物波导的

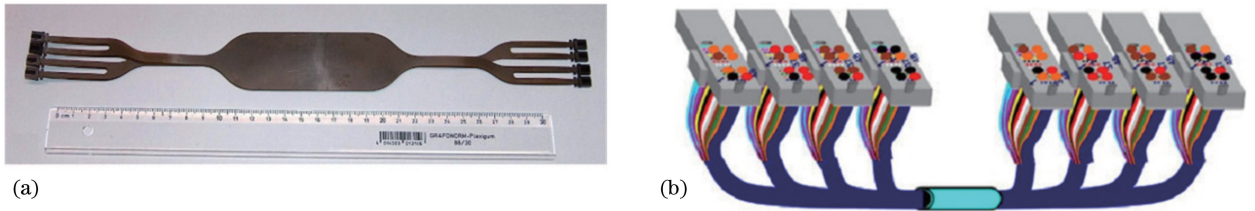


图 8 IBM 与道康宁公司制作的柔性光互联背板

Fig. 8 Flexible optical interconnection backplane fabricated by IBM and Cow Corning Co., Ltd.

柔性光电互联电路的研究^[20-23],柔性光电互联电路已经成为光电互联技术新的发展方向。相对于刚性光电印制电路,其具有的特性与优点可满足未来电子设备小型化、轻量化、轻薄化和多功能化的要求。

3.2 国内研究现状

2005年中国台湾工业技术研究院开展了光电互联总线研究,实现了板与板、板与芯片、芯片与芯片之间的光互联,其产品如图9所示^[24-25]。该研究院分别通过切割技术及成型工艺制作了12通道有机聚合物光波导软膜,其长度为17cm,芯层尺寸为 $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$,传输损耗为 0.2 dB/cm (850nm),光信号通过 45° 全内反射镜与波导进行耦合,采用 45° 金刚石刀片进行切割制作,未提及是否具有反射涂层,插入损耗小于3dB。在实际应用过程中,光波导软膜仅与MT连接器进行装连,但遗憾的是激光器、探测器及相应的驱动和调理电路并未与柔性波导软膜相互集成,仅有光路层,从而造成互连应用的局限性。

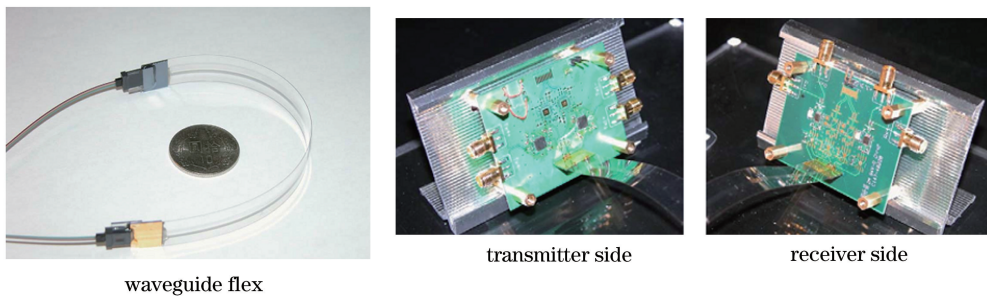


图 9 中国台湾工业技术研究院制作的柔性光波导软膜

Fig. 9 Optical waveguide flex fabricated by Industrial Technology Research Institute in Taiwan of China

大陆地区对于柔性光电互联板的研究多基于光纤链路,主要将其应用于光背板,在军事设备上常用于航电系统^[26-28]。光纤链路主要包含光学光纤、基底及保护层,如图10所示。光纤链路具有对称或随机的布线方式,能实现多组光纤复杂的交叉连接,但这种布线方式同时导致光纤链路的复杂性,给电子系统的维护带来困难,而且大量光纤的存在使光纤链路无法满足电子设备对质量、体积、性能及可靠性的要求。

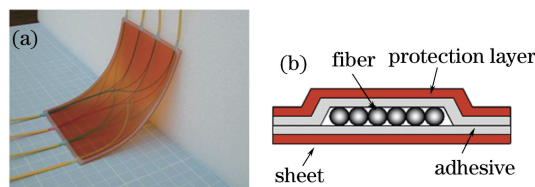


图 10 光纤链路。(a)实物图;(b)截面示意图

Fig. 10 Fiber optic link. (a) Physical photograph; (b) schematic diagram of cross section

基于聚合物光波导的柔性光电电路可克服光纤链路的不足,但是,目前大陆地区还未对应用于光互联技术方向的聚合物光波导软膜开展研究。虽然吉林大学等科研机构对柔性聚合物光波导器件进行了深入研究^[29],但该柔性光波导的机械柔韧性及其与印制电路板工艺是否兼容还需进一步研究探索,不过其制备过程及工艺可为大尺寸柔性光互联电路的制作提供借鉴。吉林大学制作的柔性聚合物光波导器件如图11所示,其采用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺,在涂有诺兰光学胶(NOA)63薄膜的硅片上制备光波导器件。

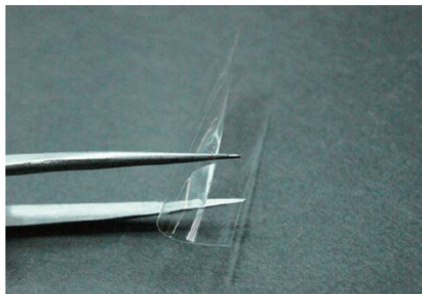


图 11 吉林大学制作的柔性聚合物光波导器件

Fig. 11 Polymer optical waveguide device fabricated by Jilin University

4 柔性光电互联电路的关键技术

柔性聚合物波导光电互联电路不仅可扩展光电互联的应用领域,还为光电背板和光电组件等互联方案提供新的方向,其关键技术主要包含:1) 柔性光波导软膜的制作;2) 光波导软膜埋入柔性电路板工艺;3) 低损耗耦合机构的设计与制作;4) 柔性光电组装技术。在电子产品形态的发展及高速通信技术的驱动下,柔性光电电路必将成为最为重要的互联技术之一,刚柔结合光电互联电路板将成为其主要的发展方向。

5 结 论

柔性光电互联电路作为板级光互联技术的又一发展方向,其将光互联与传统柔性电路板相结合,凭借独特的互联优势,受到国内外科研工作者的高度关注。本文就基于聚合物波导软膜的柔性光电电路的国内外研究现状进行了详细的阐述与分析,调查可知低损耗柔性波导软膜的制作是研究重点之一。最后指出实现柔性光电互联电路的关键技术及未来主要发展方向。

参 考 文 献

- 1 Yang Wei, Mao Jiubing, Feng Xiaojuan. The research status and developing trend for waveguide-based board-level optical interconnects technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 060004.
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]. *激光与光子学进展*, 2016, 53(6): 060004.
- 2 Cheng Huiming. *Advanced electronic manufacturing technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 270-278.
程辉明. *先进电子制造技术*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 270-278.
- 3 Dangel R, Horst F, Meier N, *et al.* Polymer waveguide based optical backplanes and electro-optical assembly technology for computing applications[C]. *IEEE Optical Interconnects Conference*, 2013, 8075: 124-125.
- 4 Moisel J, Huber H P, Guttman J, *et al.* Optical backplane[C]. *27th European Conference on Optical Communication*, 2001, 3: 254-256.
- 5 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.
- 6 Wang X L, Jiang W, Wang L, *et al.* Fully embedded board-level optical interconnects from waveguide fabrication to device integration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(2): 243-250.
- 7 Hamasaki H, Furuyama H, Numata H, *et al.* A 100 Gbps flexible optoelectronic interconnection with multi-mode optical waveguide circuits[C]. *European Conference & Exhibition of Optical Communication*, 2007, 1: 1-2.
- 8 Shibata T, Takahashi A. Flexible opto-electronic circuit board for in-device interconnection[C]. *Conference of Electronic Components & Technology*, 2008: 261-267.
- 9 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]. *Conference of Electronic Components & Technology*, 2009: 1802-1805.
- 10 Lee W J, Lim J W, Hwang S H, *et al.* Polymeric waveguide film with embedded mirrors for flexible optical interconnection[C]. *Conference of Optoelectronics & Communications*, 2009: 1-2.

- 11 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.
- 12 Shiraishi T, Yagisawa T, Ikeuchi T, *et al.* Cost-effective on-board optical interconnection using waveguide sheet with flexible printed circuit optical engine[C]. *Optical Fiber Communication Conference & Exposition*, 2011, 19(24): 1-3.
- 13 Yagisawa T, Shiraishi T, Tsunoda Y, *et al.* 200-Gb/s compact card-edge optical transceiver utilizing cost-effective FPC-based module for optical interconnect[C]. *European Conference & Exhibition on Optical Communication*, 2012: 1-3.
- 14 Shiraishi T, Yagisawa T, Ikeuchi T, *et al.* Cost-effective low-loss flexible optical engine with microlens-imprinted film for high-speed on-board optical interconnection[C]. *IEEE Conference of Electronic Components & Technology*, 2012: 1505-1510.
- 15 Yagisawa T, Shiraishi T, Ikeuchi T, *et al.* FPC-based compact 25-Gb/s optical transceiver module for optical interconnect utilizing novel high-speed FPC connector[C]. *IEEE Conference of Electronic Components & Technology*, 2013: 274-279.
- 16 Tanaka K, Ide S, Tsunoda Y, *et al.* High-bandwidth optical interconnect technologies for next-generation server systems [J]. *IEEE Micro*, 2013, 33(1): 6-13.
- 17 Yagisawa T, Shiraishi T, Sugawara M, *et al.* 40-Gb/s cost-effective FPC-based optical engine for optical interconnect using novel high-speed FPC connector[C]. *European Conference & Exhibition on Optical Communication*, 2013: 1-3.
- 18 Yagisawa T, Sugawara M, Shiraishi T, *et al.* Novel packaging technologies for FPC-based optical transceiver for high-speed optical interconnect[C]. *IEEE CPMT Symposium Japan*, 2015: 134-137.
- 19 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.
- 20 Keller C, Shao Z H, Wakazono Y, *et al.* Planar assembled flexible interconnect link with hybrid optical/electrical data transmission for mobile device applications[C]. *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 2011: 823-828.
- 21 Missinne J, Van Hoe B, Bosman E, *et al.* Compact coupling and packaging concepts for flexible and stretchable polymer optical interconnects[C]. *IEEE Optical Interconnects Conference*, 2012: 129-130.
- 22 Immonen M, Wu J, Yan H J, *et al.* Electro-optical backplane demonstrator with multimode polymer waveguides for board-to-board interconnects[C]. *Electronics System-Integration Technology Conference*, 2014: 1-6.
- 23 Hu J J, Li L, 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.
- 24 Shen L C, Lo W C, Chang H H, *et al.* Flexible electronic-optical local bus modules to the board-to-board, board-to-chip, and chip-to-chip optical interconnection[C]. *Electronic Components & Technology Conference*, 2005, 1: 1039-1043.
- 25 Chang H H, Lo W C, Shen L C, *et al.* Interconnection of flexible electronic-optical circuit board module [C]. *International Conference of Microsystem, Packaging, Assembly*, 2006: 1-4.
- 26 Wang Gangzhi, Huang Haoyi. Research on optical backplane applied to Avionics system[J]. *Avionics Technology*, 2008, 39(4): 44-47.
汪刚志, 黄浩益. 光母版技术在航电系统中的应用研究[J]. *航空电子技术*, 2008, 39(4): 44-47.
- 27 Han Shuangli, Zhao Shanghong, Di Xiang. Integrated avionics in new fighter airplane and its high speed interconnection technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(3): 50-55.
韩双利, 赵尚宏, 底翔. 新型战机综合航电系统及其高速光互连技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(3): 50-55.
- 28 Zhan Wentao, Sun Jingguo, Xie Wentao, *et al.* A design and appliance of optic backplane applied in airborne avionics system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, 22(3): 945-947, 955.
湛文涛, 孙靖国, 解文涛, 等. 一种机载航电系统光背板的设计与应用[J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22(3): 945-947, 955.
- 29 Yi Yunji. The integrated technologies for polymer planar optical waveguide devices [D]. Changchun: Jilin University, 2012: 53-55.
衣云骥. 聚合物平面光波导集成技术的基础研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 53-55.