

文章编号: 0253-2239(2006)05-0813-6

# 基于软光刻的片间光学互连线路\*

倪 玮 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

**摘要:** 设计并试制了由软光刻法转印,可敷设在印刷电路板上用于芯片间互连的光学互连线路。提出了一种新颖的端口耦合结构,并发现在耦合适配段长度与接收窗口的长度比值为 12:1 时耦合效率最佳,且该耦合结构有效降低了对安装精度的要求;分析了该光学互连线路在交叉布线时的基本准则,获得对于不同横截面矩形波导结构在交叉布线时呈现的串扰与交叉角度的相关性,并发现在强束缚下交叉角度大于  $54^\circ$  的交叉结构都能达到低串扰(小于  $-30$  dB)。采用软光刻技术制作了上述高聚物波导光学互连线路元件,实验测量结果与设计数据符合较好。与传统的光刻或激光直写技术相比,软光刻转印具有制作简单,易于实现高聚物三维结构的大批量高精度复制。

**关键词:** 导波光学; 片间光互连; 软光刻; 光线追迹法

中图分类号: TN256 文献标识码: A

## Soft-Lithography-Based Inter-Chip Optical Interconnection Circuit

Ni Wei Wu Xingkun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** A soft-lithography based optical interconnection circuit for inter-chip communications on printed circuit board (PCB) was designed, fabricated and characterized. A novel circuit termination coupler was proposed, capable of easing the coupling between transceiver and waveguide significantly and reducing the demand for installing precision, and it was found that an optimum coupling was achieved at a ratio of 12:1 between the lengths of beam duct and entrance/exit window. The fundamental circuit layout criteria were analyzed for waveguide intersections, and the crosstalks between crossed waveguides were calculated as a function of both various waveguide cross-sections and crossing angles. It was found that cross-talk would be lower than  $-30$  dB for crossing angles greater than  $54^\circ$  in the case of strong bounding. Polymer devices for optical interconnection circuit are fabricated experimentally. Experimental measurement for both coupling structure and cross-over circuit elements were compared with calculated results and a reasonably good agreement was obtained. In contrast with traditional lithography or laser direct writing, soft lithography features a simple fabrication process and high-precision duplication of polymer three-dimensional structure in quantity.

**Key words:** guided-wave optics; inter-chip optical interconnection; soft lithography; ray tracing

## 1 引 言

随着中央处理器(Central processing unit, CPU)时钟速度的指数增长,芯片内部(intra-chip)和芯片间(inter-chip)宽带数据通信呈现出超大容量传输和宽带交换的需要,原有芯片内和印刷电路板上的金属电连接日益不能满足要求,使得互连(interconnection)成为限制系统性能进一步发展的

主要瓶颈之一。由于电子在传导过程中存在着 R-L-C 分布参量,传统电互连的物理局限性,在高带宽、高密度、低能耗领域,显得越发明显:带宽限制、线间串扰以及功耗高等<sup>[1]</sup>。光学互连以光作为信息传输载体,无电磁交扰现象,具有高带宽和高的光连接密度,能弥补电互连的以上缺陷,有望解决高性能计算机和超高速交换系统中普遍存在的数据通讯瓶

\* 国家自然科学基金(60477019,60577025)资助课题。

作者简介:倪 玮(1981-),女,江苏启东人,博士研究生,主要从事微光学以及在光器件中的应用研究。

E-mail: rikfeng@163.com

导师简介:吴兴坤(1961-),男,浙江海盐人,教授,博士生导师,主要从事集成波导型光通信器件的应用研究。

E-mail: xingkunwu@163.com

收稿日期:2006-07-20;收到修改稿日期:2006-09-27

颈问题,实现系统的大容量、高速率、低能耗的数据交换。

很多光互连应用于超大规模集成电路的方案被提出和研究<sup>[2~3]</sup>,目前光学互连研究的主要推动力是在板上量级(on-board-level)的互连技术<sup>[4]</sup>,因为在此量级上,互连距离、关联的寄生 RLC 效应、大扇出(Fan-out)引起的阻抗失配都威胁到带宽的提高,电互连因此面临挑战,而光学互连被广泛认为是提升板上互连性能的一个极好的选择。这个领域的研究重点集中在如何将光互连集成到传统的印刷电路板(Printed circuit board, PCB)上,特别是引进高聚物波导作为光层集成到印刷电路板上,制成电光混合的印刷电路板<sup>[5]</sup>。然而,在印刷电路板中引入微光学部件必须解决一系列的适配问题。首先,一个很明显的困难就是,信号光源例如垂直腔面发射激光器(Vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)或者信号接收器例如光电二极管(Photodiode, PD)与光波导层之间的连接损耗应该在可接受的范围内,这就要求足够的安装精度;第二,光束从垂直腔面发射激光器出射进入嵌入在厚印刷电路板层中的光导层,再从光导层进入光电二极管的接收窗口,整个过程中由光束发散引起的损耗也较显著;一些改进的方案被提出来,包括引进不同的光学元件,如采用 45°端面波导、微透镜<sup>[6]</sup>、光耦合器<sup>[7]</sup>以及微棱镜<sup>[8]</sup>,用于连接或改变光路,但较高的安装误差灵敏度和复杂的封装要求仍然存在。

本文着重研究了光学互连线路的光电耦合和光路交叉布线,并利用软光刻技术实现了高聚物波导的高精度三维复制。该光学互连线路可分为两个核心部分:端口耦合结构(Coupling)和布线时的交叉连接结构(Cross-over)。本文提出的光学互连线路方案对电光学元件的安装精度的要求较为宽松,可有效地提高高聚物光学互连在印刷电路板上集成的兼容性。

## 2 光学互连线路结构组成

### 2.1 端口耦合结构

端口耦合包括光源和光波导层、光波导层和光接收器之间的耦合连接,通过对各种端口耦合结构的研究,提出了新型的三维耦合结构,其中包含 45°端面的反射面(TIR),耦合适配段(Beam duct),及矩形高聚物波导(Rectangular polymeric waveguide),工作原理如图 1(a)所示:光束由光源投射到接收窗口(45° TIR),经过耦合适配段到达矩形高聚物波导管,完成

光源与光波导层之间的端口耦合,光波导层和光接收器之间的端口耦合可以采用相同的耦合连接结构。

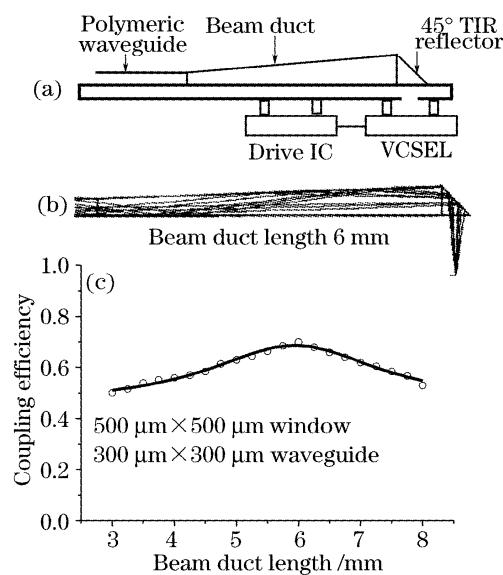


图 1 端口耦合结构及其光线追迹结果。(a)印刷电路板上的光学互连线路端口耦合结构示意图,(b)在最佳耦合适配段长度下的光线追迹图,(c)耦合效率与适配段长度的关系

Fig. 1 Port coupling structure and its ray tracing results. (a) Schematic of port coupling structure of the optical inter connection circuit on printed circuit board, (b) ray tracing result with optimal beam duct length, (c) coupling efficiency as a function of beam duct length

从图 1(a)中可以看到,根据光源(垂直腔面发射激光器)发出的光束分布(发散角  $8^\circ \sim 12^\circ$ ),可确定接收窗口的尺寸,耦合适配段的输入端横截面也随之确定;选取不同横截面的矩形高聚物波导,可决定耦合适配段的输出端横截面。由此可知,光源或接收器芯片与光学互连线路间端口耦合结构的设计关键是耦合适配段的结构分析,而耦合适配段的长度为一可变参量。对上述端口耦合结构在 ZEMAX® 软件中进行蒙特卡罗式光线追迹分析。图 1(b)给出的是由  $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$  接收窗口、 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$  矩形波导管以及耦合适配段构成的端口耦合结构,当耦合适配段的长度为 6 mm 时的光线追迹情况。可以看出,光束从垂直腔面发射激光器进入接收窗口,以较高的效率经过适配段并与矩形波导耦合。而对于该适配段过长或过短的情况,在 ZEMAX® 中均可见向外泄漏的光束。该结构的耦合效率与适配段长度的相关性计算结果具体如图 1(c)所示。耦合效率随着耦合适配段长度而变化,当耦合适配段长度与接收窗口长度的比值为 12:1,即耦合适配段长度为 6 mm 时,耦合效率达到最高,符合图 1(b)所

示的情况。在给定发射、接收窗口尺寸( $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ )的条件下,对于其他不同横截面的矩形波导管构成的端口耦合结构进行光线追迹分析,得出的结论是耦合适配段的长度与接收窗口的尺寸比例对耦合效率有较大的影响,要达到最佳耦合效率,耦合适配段长度与接收窗口的长度的比值都需达到约12:1。据此可确定耦合适配段的最佳长度。

软光刻以印模的方法可翻制细微至30 nm线度的三维高聚物微结构。图2描述的是采用软光刻法试制该高聚物三维锥型波导的大致过程。首先应用高分辨力的三维雕刻机在黄铜版上刻制设计好的端口耦合结构模型,然后进行光学面的抛光,用于制作软光刻弹性印模。图2(a)所示是用聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS, Sylgard 184, Dow Corning),在80 °C温度下加热2 h以低收缩率制成的翻印阴模。将硅酮弹性体制成的模具覆盖于已涂有低折射率树脂的电路板或者光学玻璃表面,用光学树脂通过毛细效应填充该模具。由于硅酮模具有较好的紫外透射率,可采用紫外光曝光固化光学树脂,而后再将硅酮模具剥离,即形成所需的光耦合

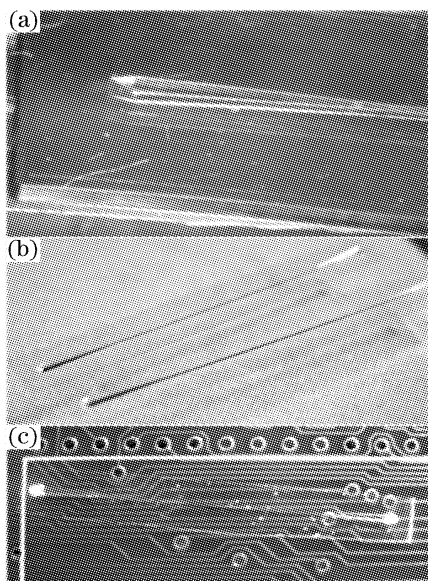


图2 端口耦合结构样品的制作以及工作情况。(a) 硅酮弹性体翻制成的低收缩率转印阴模,(b) 用硅酮弹性体模具印制的聚丙烯酸脂光学树脂耦合波导,(c) 耦合波导结构的工作照片,两端口将来自垂直腔面发射激光器的光束两次折射90°

Fig. 2 Coupling structure in fabrication and operation (a) Low shrinkage transfer print cavity block made of PDMS, (b) coupling waveguide made of acrylate optical polymer molded by the PDMS mold, (c) a coupling waveguide in operation, turning the optical beam from a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) twice by 90°

连接结构,如图2(b)所示。固化后的高聚物元件也可直接从玻璃基板上剥离,如图2(c)所示,将自承式(stand-alone)带端口耦合结构的光学互连线路放置在传统的印刷电路板板上,并对入射光进行光传输测量。由图可见,VCSEL的出射光沿着该结构被弯折了两次90°,总损耗实际测量低于2.8 dB,与理论计算值(1.8 dB)基本相符。实测结果与理论的差额主要原因是刻版模的部分光学面抛光质量不够理想,经过翻印后,少数三维结构的光学面粗糙度过高,光束在这些面上形成散射而使损耗增加。

此种新的光互连端口耦合结构极大地降低了安装精度要求,且制作工艺简单、利于批量生产。大尺寸的接收窗口和相对较小的波导管,通过一个耦合过渡结构(beam duct)来连接,这样的结构被证明既保持了低折射损耗,又在高带宽传输时,保持了可忽略的脉冲时延。在5 cm的传输长度上,实现了大窗口输入、出端口的耦合,总损耗低于3 dB。在MatLab软件中采用自编软件对垂直腔面发射激光器的脉冲光束分束,计算各束光程差,并按其高斯光强分布对各个光束合成输出脉冲,计算得脉冲上升或下降沿的时延小于25 ps,完全符合大于10 Gb/s的传输要求。

## 2.2 布线的基本准则

根据光的独立传播定律,以不同途径传播的光同时在空间某点通过时,彼此互不影响,在合理的布局下,单层上不同光路之间的信号基本不会产生相互干扰,能够提供比较好的信号环境。基于上述光学互连线路的端口耦合结构,研究布线的格局,可使本光学互连线路与光源、接收器之间得到最佳的传输效率。图3所示是单层光学互连的基本交叉连接结构。图3(a)中表示的就是其中两条线路交叉时的情况,其中交叉重叠(cross-over)的区域在各种情况下的串扰(crosstalk)为研究重点。

同样利用蒙特卡罗式光线追迹方法,对由不同横截面的矩形高聚物波导管所构成的交叉连接结构,如图3(a)所示进行分析。对于该类交叉波导结构的光线追迹准则为:1) 入射条件:光互连结构波导中的光传播以多模方式为主导。考虑以下情况,当光源发出的光被耦合进该多模波导中后,经过一段传播距离,波导中的模场分布将达到稳定,且可用一个均匀的模场分布来近似,形成一组离散的特征模式;2) 具有阶跃式折射率分布交叉波导中的光线追迹,对于图3(a)所示的交叉结构,将波导中的三维光线轨迹投射到垂直的 $y-z$ 平面和水平的 $x-z$

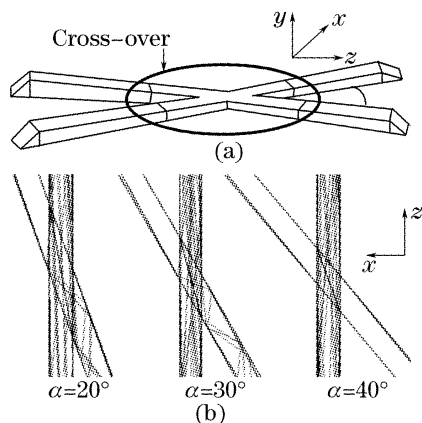


图3 (a)光学互连线路交叉连接部分的结构示意图, (b)横截面为  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  的矩形波导管构成的交叉连接结构,在不同交叉角度 ( $20^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $40^\circ$ ) 下的光线追迹图

Fig.3 (a) Schematic of a cross-over structure in optical interconnection circuit, (b) ray tracing results of one cross-over structure composed of polymeric waveguide at various cross angles ( $20^\circ$ ,  $30^\circ$  and  $40^\circ$ )

平面时,只有在  $x-z$  平面中的光线传播和交叉结构的参量特性有关,而在  $y-z$  平面中的光线传播只是重复在上下包层之间的反射,几乎不受交叉结构的影响。因此只需要考虑三维光线轨迹在二维  $x-z$  平面上的投影。每条光线的位置和走向可以分别用矩形波导管的半宽度  $a$  和光线传输的临界角  $\alpha_c$  进行归一化。例如,  $x$  方向上传输角为  $\alpha$  的光线的位置和走向可以定义如下:

$$X = x/a, \quad \hat{X} = \tan \alpha / \tan \alpha_c. \quad (1)$$

尽管在弯波导部分,波导的轴被弯曲,但可假定只有光线的传输角发生改变,而光线的位置保持不变<sup>[10]</sup>。使用下面的公式可确定每条光线在弯波导中的位置和走向:

$$\begin{cases} X^{(+)} = X^{(-)}, \\ \hat{X}^{(+)} \cdot \tan \alpha_c = \frac{\hat{X}^{(-)} \pm \delta \hat{X}}{1 \mp \hat{X}^{(-)} \cdot \tan \alpha_c \cdot \tan \alpha_s}, \\ \delta \hat{X} = \tan \alpha_s / \tan \alpha_c, \end{cases} \quad (2)$$

式中上标(-)和(+)分别表示在弯曲前后的光线,  $\alpha_s$  表示波导的弯曲角度。

(2)式说明合适的交叉角度  $\alpha$  能够使得单个波导中的光线在经过交叉重叠区域时,由于进入相邻波导的光线入射角大于临界角,不能形成该波导的传输模式,而呈指数衰减,不会影响该相邻波导中的光信号传输。因此每条线路中的光信号绝大部分都被束缚在原波导中传播,使得连接结构具有良好的方向性,避免了信号在此结构中传输时的相互干扰,有利于提高系统的信噪比。图3(b)描述的是横截

面为  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  的矩形高聚物波导管所构成的交叉连接结构在交叉角度为  $20^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $40^\circ$  三种情况下的光线追迹情况。可以看到,在较小的交叉角度(例如这里的  $20^\circ$ )时,会有较大比例的光线进入相邻波导,当交叉角度增加到  $30^\circ$  时,进入相邻波导的光线有所减少,当交叉角度增加到  $40^\circ$  时,几乎没有光线进入相邻波导。因此交叉角度  $\alpha$  是决定线路之间是否存在干扰的主要因素,交叉连接结构的分析关键是针对各种波导尺寸找到合适的  $\alpha$ 。

通常在高速传输系统中,串扰达到  $-30\ \text{dB}$  以下时,信号之间的相互干扰可以忽略。对于四种典型横截面的矩形高聚物波导管(分别为  $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ ,  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ,  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ) 所构成的交叉连接结构进行蒙特卡罗式光线追迹分析,光束数为 20000 束,为便于将理论分析和实测结果相比较,串扰与交叉角度在强束缚情况下的相关性计算结果如图4所示。可以看到,对于横截面为  $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$  的矩形波导管所构成的交叉连接结构,在交叉角度的变化范围为  $10^\circ \sim 50^\circ$  之间时,串扰值随交叉角度的增加呈现近线性的递减,而从  $50^\circ$  开始,随着两波导管之间交叉角度的逐渐增大,串扰值呈现类似于指数衰减的急剧变化,衰减系数最大,当交叉角度增大到  $52.5^\circ \sim 54^\circ$  之间时,串扰值将达到  $-30\ \text{dB}$ ;对于横截面为  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  和  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  的矩形波导管所构成的交叉连接

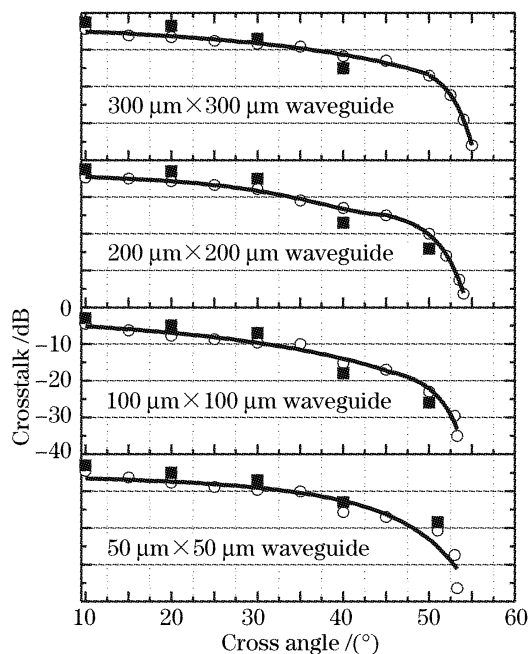


图4 线路之间的串扰与交叉角度的关系(对于具有不同横截面的矩形波导管的光学互连线路)

Fig.4 Crosstalk versus cross angle for cross-over circuits of polymer waveguide for various cross-sections

结构,在交叉角度的变化范围为  $10^{\circ}\sim 45^{\circ}$  之间时,串扰值随交叉角度的增加呈现近线性的递减,而从  $45^{\circ}$  开始,随着两波导管之间交叉角度的逐渐增大,串扰值呈现类似于指数衰减的变化,衰减系数较大,当交叉角度增大到大约为  $52.5^{\circ}$  时,串扰值将达到  $-30$  dB;对于横截面为  $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$  的矩形波导管所构成的交叉连接结构,在交叉角度的变化范围为  $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$  之间时,串扰值随交叉角度的增加呈现近似线性的变化关系。而从  $35^{\circ}$  开始,随着两波导管之间交叉角度的逐渐增大,串扰值呈现指数衰减的变化趋势,衰减系数较小,且当交叉角度增大到  $52^{\circ}\sim 52.25^{\circ}$  之间时,串扰值将达到  $-30$  dB。出现以上三种串扰与交叉角度的相关性,是由于波导管的横截面不一样而带来的交叉重叠区域的面积不一样,进一步,在此区域里能够进入相邻波导管的光线比例不一样。

从图 4 所示的结果还可以得到,对于具有不同横截面积的矩形高聚物波导管所构成的交叉连接结构,都在  $52^{\circ}\sim 54^{\circ}$  之间的交叉角度范围内可以达到理想的低串扰(达到  $-30$  dB 时可认为串扰对信号的影响很小,可忽略),例如对于横截面积为  $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$  的矩形波导管所对应的交叉连接结构,达到低串扰所需满足的交叉角度范围为  $52^{\circ}\sim 52.25^{\circ}$ 。因此可以采用相对较小横截面的矩形高聚物波导管,结合优化后的端口耦合结构和交叉连接结构,组成光学互连线路应用于传统印刷电路板上的芯片之间的互连,就可以实现片间互连低损耗、低串扰、微型化的目标。

对上述基本交叉连接结构也使用软光刻方法进行了交叉波导的制作和测量,使用高分辨力的三维雕刻机,采用单线雕刻法,在黄铜版上刻制了四组交叉连接结构,分别是由横截面积为  $300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}$ ,  $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ ,  $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$  的矩形高聚物波导管所构成的、交叉角度为  $10^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$  和  $50^{\circ}$  的交叉连接结构。这里刻制的母版为器件的阴模,然后对其进行光学面的抛光。而后,用硅酮弹性体(PDMS)在  $80\ ^{\circ}\text{C}$  温度下加热 2 h 以低收缩率翻制阳模,重复进行上述步骤,利用硅酮弹性体阳模精确翻印硅酮弹性体阴模。将紫外固化树脂通过毛细效应填充该模具,然后将其覆盖于已涂有低折射率树脂的电路板上,采用紫外光曝光固化,而后将硅酮模具剥离,即形成所需的交叉连接结构。将所得的一系列交叉连接结构用垂直腔面发射激光器的输出光作为光源,由光功率计(Thorlab S110)

测量输出光功率,获得串扰实验值。如图 4 中的黑色实心方点所示,其实验值与理论值的趋势基本吻合。对于小交叉角度,串扰的实验结果比理论值偏高。其原因是,软光刻工艺翻印的最终高聚物结构都带有压模后成型的残余膜层,即模具与基板分界面上的固化的高聚物光学树脂,厚度与翻印压力成反比。而这一膜层在交叉角度较小时耦合了交叉波导中的光束,因而造成串扰偏大。

图 5 描述的是由  $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$  横截面的矩形高聚物波导管所构成的、交叉角度是  $30^{\circ}$  的交叉连接结构的实物模型的俯视图。图 5(a)是该结构在显微镜下的俯视图,可清楚地看到此高聚物交叉结构以及交叉重叠区域,图 5(b)显示的是该结构的导光情况,在有光源(垂直腔面发射激光器)输入的情况,对于  $30^{\circ}$  的交叉角度,实验的串扰值与理论值几乎吻合。从右图看到的是光源从其中一个波导管中进入,在经过交叉重叠区域时,几乎没有光线进入相邻波导管,说明此结构的隔离度较好。且此结构被安放在传统的印刷电路板上,印刷电路板板上的圆孔为  $0.8\ \text{mm}$  直径,用于对比该交叉结构的尺寸比例。图 6 是图 5 所示结构的端面图,图 6(a)是图 5 所示结构的显微端面图示,图 6(b)是图 5 所示结构导光情况的端面图示,可以很明显地看到该结构的出光情况,与图 5(a)相对应。

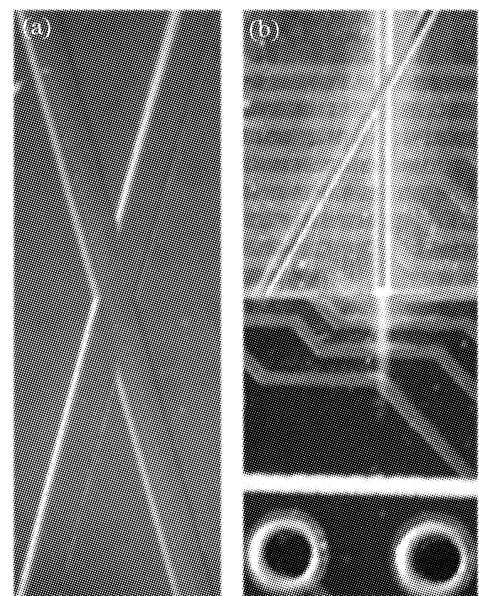


图 5 交叉连接结构的俯视图显微( $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$  横截面的矩形波导, $30^{\circ}$  的交叉角度)(a);该交叉部分在印刷电路板上传输激光束的情形(b)

Fig. 5 A top view of cross-over structure ( $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ ,  $30^{\circ}$ ) (a), cross-over section conducting the laser on printed circuit board by top view (b)

需要指出的是上述光线追迹分析时采用的是多

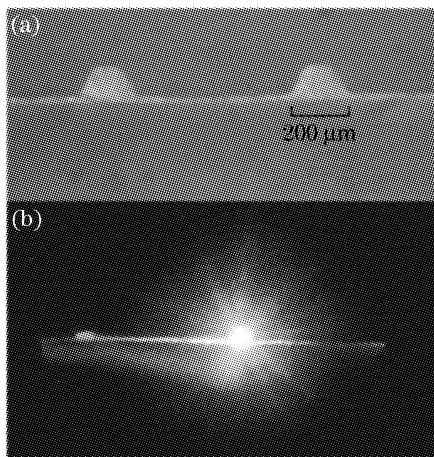


图6 交叉连接结构的端面图示,显微端面图( $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ 横截面的矩形波导, $30^\circ$ 的交叉角度)(a),该交叉部分的导光端面图(b)

Fig.6 A cross-over structure in side view, cross-over section in side view ( $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ ,  $30^\circ$ ), optical beam propagation in the cross-over structure (b)

模的传输模式。在实际测量中虽采用单模激光器垂直腔面发射激光器作为光源,但通过一段距离(约5 mm)的传输,波导中的各种模式均得到激发,因而对于该耦合/交叉结构采用多模分析其传输是合理的,且为更复杂的连接部分采用多模传输进行分析提供了依据。

### 3 结 论

提出了可集成到印刷电路板上的光学互连线路的完整结构,设计了具有高耦合效率的端口耦合结构,分析了线路布线时的交叉连接结构,提出了布线时的基本准则,并通过对基于软光刻的高聚物三维光学波导结构的实际制作,将测量与理论设计进行了对比,获得了与计算基本符合的实验结果。对不断开拓高聚物光学互连这一国际新型有机光电功能

器件的新领域,跟踪国际先进技术,推动我国光学互连技术具有一定的意义。同时,本研究成果除了在光数据传输具有广泛的应用空间外,在光纤传感,光无源器件领域也具有广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Li Yuan, Cao Mingcun, Li Hongpu *et al.*. Property of a novel free-space optical comega[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(11): 1585~1590 (in Chinese)  
李 源,曹明翠,李洪谱等.自由空间光学 Omega 多级互连网络特性研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(11): 1585~1590
- 2 Xu Jiandong, Li Feng, Zhang Lei *et al.*. Fabrication of DCG holographic optical interconnects based on total internal reflection [J]. *Acta Optics Sinica*, 1994, **14**(12): 1320~1323 (in Chinese)  
徐建东,李 峰,张雷等.基于全内反射的重铬酸明胶全息光互连器件的研究[J]. *光学学报*, 1994, **14**(12): 1320~1323
- 3 Kang Hui, Zhang Jiangying, Zhan Yuanling. Optical implementation of PS interconnection network with high energy efficiency using prisms[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(3): 332~336 (in Chinese)  
康 辉,章江英,战元龄.用棱镜实现高效率的安全混洗互连网络[J]. *光学学报*, 1995, **15**(3): 332~336
- 4 Christoph Berger, Reno Beyeler, Gian-Luca Bona *et al.*. Optical links for printed circuit boards[C]. *IEEE-LEOS 2003 Annual Meeting*, 2003, Tucson, AZ, USA
- 5 S. Lehmachner, A. Neyer, F. Mederer. Polymer optical waveguides integrated in printed circuit boards[C]. *Proc. 27th Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC '01)*, 2001, **3**: 302~303
- 6 Yuzo Ishii, Shinji Koike, Yoshimitsu Arai *et al.*. SMT-compatible optical-I/O chip packaging for chip-level optical interconnects[C]. *Proceedings of IEEE Electronic Components Technol. Conf.*, 2001. 870~875
- 7 Ray T. Chen, Lei Lin, Chulchae Choi *et al.*. Fully embedded board-level guided-wave optoelectronic interconnects[C]. *Proc. IEEE*, 2000, **88**(6): 780~793
- 8 Elmar Griese. A high-performance hybrid electrical-optical interconnection technology for high-speed electronic systems[J]. *IEEE Trans. Adv. Package.*, 2001, **24**(3): 375~383
- 9 Younan Xia, George M. Whitesides. Soft lithography[J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1998, **28**:153~184
- 10 Y. Kokubun, T. Fuse, K. Iga. Optimum length of multimode optical branching waveguide for reducing its mode dependence [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(24): 4408~4413