

激光阶梯刻蚀法制备 45°微反射镜及垂直耦合研究

邓传鲁^{1,2} 宋志强^{1,2} 庞拂飞^{1,2} 王建辉^{1,2} 王廷云^{1,2}

¹上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

²上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072

摘要 提出了一种基于准分子激光制备 45°微反射镜的新方法——激光阶梯刻蚀法,介绍了该方法的工艺流程。通过优化参数制备了微反射镜样品,详细分析了样品参数对微镜反射性能的影响。利用微反射镜样品进行垂直耦合实验,深入讨论了影响系统损耗的主要因素。实验结果表明,微反射镜样品造成的损耗约为 3.5 dB。该制备方法有望在大尺寸光波导互连背板耦合器件的研制中得到广泛应用。

关键词 激光技术; 光波导; 45°微反射镜; 激光阶梯刻蚀法; 垂直耦合

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1101003

Research on Fabrication and Vertical Coupling of 45° Micromirror with Laser Stepped Ablation Method

Deng Chuanlu^{1,2} Song Zhiqiang^{1,2} Pang Fufei^{1,2} Wang Jianhui^{1,2} Wang Tingyun^{1,2}

¹Key Lab of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract One method to fabricate 45° micromirror based on the excimer laser, namely, the laser stepped ablation method, is proposed and its fabrication process is introduced. Via the parameter optimization, micromirror samples are obtained, and the influences of sample parameters on the reflecting performance of micromirrors are analyzed in detail. A vertical coupling experiment is conducted with these micromirror samples. The main factors that affect the system loss are discussed deeply. The experimental results indicate that the loss induced by micromirrors is approximated to 3.5 dB. The fabrication technique proposed is expected to be widely applied in the fabrication of coupling components of large size optical waveguide interconnection backplane.

Key words laser technique; optical waveguide; 45° micromirror; laser stepped ablation method; vertical coupling

OCIS codes 140.3390; 130.5460; 200.4650; 230.4000

1 引 言

随着宽带通信、超级计算机及大数据中心的高速发展,基于传统印刷电路板(PCB)的电互连技术难以满足高速带宽增长的需求^[1-4]。近年来,基于 PCB 的光互连背板技术得到了快速发展^[5-6]。所谓光互连背板技术,是在常规 PCB 上制备一层光波导层,或者将光波导作为一个夹层嵌入 PCB 中,以实现光信号的高带宽传输功能。它具有低能耗、无电磁干扰、低成本等优势,在高端通信设备信息互连技术中具有重要的应用前景。

目前,制备光波导常用的基础材料是聚合物。在聚合物光波导互连背板应用中,光器件的高效耦合是光

收稿日期: 2016-05-28; **收到修改稿日期:** 2016-07-27

基金项目: 上海市教委创新重点项目(14ZZ093)、上海市科技成果转化与产业化项目(16511104300)

作者简介: 邓传鲁(1979—),男,博士研究生,主要研究光波导器件制备技术方面的研究。

E-mail: chuanludeng@163.com

导师简介: 王廷云(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和特种光纤方面的研究。

E-mail: tywang@shu.edu.cn(通信联系人)

互连的关键技术之一,其中光背板任意位置的垂直耦合尤为重要。目前,在光互连背板中实现垂直耦合的方法主要有倾斜镜面反射法^[7-8]、耦合元件嵌入法^[9-10]、软波导法^[11]、弯曲光纤法^[12]、波导光栅法^[13]等,其中倾斜镜面反射法是一种高效、常用的方法。制备微反射镜的方法有金刚石切割法^[14]、模具法^[15]、光刻法^[16-17]、激光刻蚀法^[18]等。目前应用较多的是光刻法,但常规光刻技术工艺复杂,刻蚀样品的倾角小于 45° ^[16]。Wang 等^[17]改进了这种技术,改进后的技术仍有很多不可控因素,并不实用。

本文提出了一种基于准分子激光的光互连背板加工微反射镜的方法——激光阶梯刻蚀法,该方法简单可行,只要控制激光参数即可获得性能良好的 45° 微反射镜。简单介绍了利用准分子激光制备 45° 微反射镜的工艺流程,并搭建了垂直耦合测试系统,对 45° 微反射镜进行垂直耦合实验。实验结果表明,微反射镜造成的能量损耗约为 3.5 dB。初步验证了该加工方法的可行性,为光互连背板微反射镜加工的应用提供了一定的参考。

2 准分子激光器刻蚀光波导材料原理

采用 ArF 准分子激光器(LSV 3,OPTEC,比利时)进行 45° 微反射镜加工,输出激光波长为 193 nm,激光脉冲宽度约为 5 ns,最高脉冲能量为 8 mJ。采用模板投影写入原理,均匀化处理准分子激光发出的光束,光束经过成像系统投影到被加工样品表面。单脉冲加工形状由光阑通光孔形状决定,且加工系统提供多种形状的掩模,以此获得适宜的加工图形,图 1 为准分子激光光学加工系统结构示意图。加工的聚合物光波导的主要成份为丙二醇甲醚醋酸酯和有机硅氧烷,对 193 nm 激光均具有较高的吸收率^[19]。吸收激光后的聚合物分子键发生断裂,聚合物材料消融去除^[20]。样品是采用光刻工艺在常规 PCB 基底上制备的聚合物互连光波导。

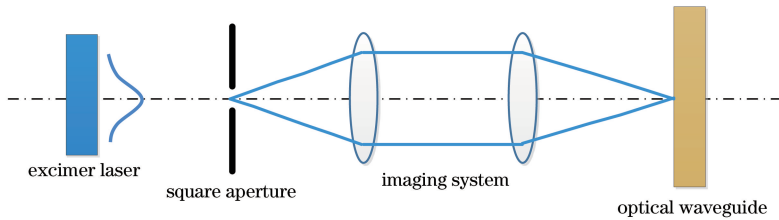


图 1 准分子激光光学加工系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of excimer laser optical processing system

3 激光阶梯刻蚀法制备 45° 微反射镜技术

3.1 激光阶梯刻蚀法制备工艺流程

OPTEC 生产的准分子激光加工系统操控软件有参数 B 和 S ,其中 B 表示在一定激光能量值 E 下定点打标次数, S 为掩模长度与激光每定点打标一次后沿设定方向移动距离的比值。设打标一次的刻蚀深度为 d_0 ,则一般情况下, E 值越大, d_0 越大。选定边长为 L 的正方形掩模,设置 S 为 3,则激光每定点打标一次后,沿设定方向移动 $L/3$ 距离再次打标,依次完成整个设定路径的打标工作。在整个刻蚀过程中,不同区域会依次出现打标重叠的区域,形成一个类似阶梯形状的 V 型图。图 2(a)和(b)分别为激光刻蚀过程的俯视图

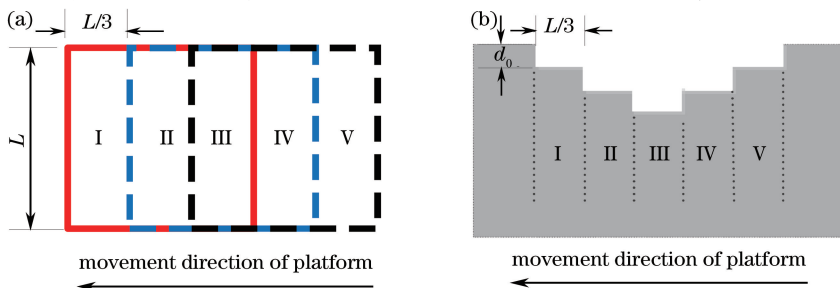


图 2 参数 S 定义及加工过程。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 2 Definition of S parameter and fabrication process. (a) Top view; (b) side view

意图和侧视示意图。由图 2(a)可以看到,图中红色方形左边部分(区域 I)无重叠,理论加工深度为 d_0 ;红色方形中间部分与蓝色方形左边重叠(区域 II),理论加工深度为 $2d_0$;红色方形右边部分与蓝色方形中间及黑色方形左边重叠(区域 III),理论加工深度为 $3d_0$ 。由图 2(b)可以看出,激光刻蚀形成一个阶梯形状的 V 型图。

通过优化 B 和 S 来制备 45° 微反射镜。设置打标路径长度与选定的正方形掩模边长 L 相等,且设置 S 为 N 。在一定能量值 E 下定点打标一次,刻蚀深度为 d_0 ,则刻蚀的最大深度 $D = N \times d_0$ 。如果 $L = D$,则恰好获得一个类似阶梯形状且角度为 45° 的 V 型槽,如图 3 所示。理论上,当 N 取值为 1000 时,阶梯尺寸为 100 nm,整体上可近似为表面光滑的 45° 的 V 型槽。

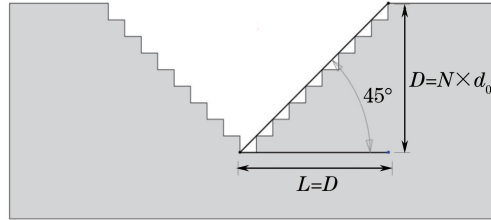


图 3 双侧 45° 微反射镜结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of bilateral 45° micromirrors

实际需要的微反射镜应一侧为 45° 斜面,另一侧为垂直平整的光波导端面,如图 4 所示。信号光从微反射镜垂直端面射出,再经微反射镜面反射,从而使光束发生 90° 转向后再耦合进光纤,以此达到垂直耦合的目的。采用上述原理加工出来的是双侧 45° 微反射镜,必须对其进行改进,有两种方法:1) 对制备得到的双侧 45° 微反射镜样品进行后加工,利用定点刻蚀去除不需要的一侧反射镜面,如图 4(a) 所示;2) 在制备双侧 45° 微反射镜之前,在不需要刻蚀的区域用金属片遮挡激光,以此得到垂直平整的端面,如图 4(b) 所示。

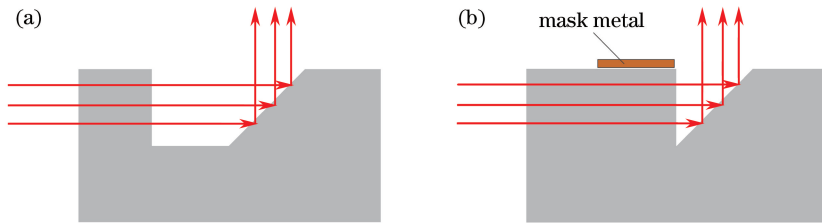


图 4 单侧 45° 微反射镜结构示意图。(a) 定点刻蚀;(b) 添加金属片刻蚀

Fig. 4 Structural diagram of unilateral 45° micromirror. (a) Post-ablation; (b) ablation shielded by mask metal

3.2 激光阶梯刻蚀法制备单侧 45° 微反射镜及样品分析

采用光刻法在 PCB 上制备了 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的光波导样品,利用三维轮廓仪(SNEOX, Sensofar, 西班牙)测得的光波导芯层微观形貌如图 5 所示。选用陶氏公司的光波导材料,芯层折射率为 1.51,包层折射率为 1.48。在光纤和波导连接处添加匹配液,测得光波导的传输损耗为 0.37 dB/cm。优化后的准分子激光加

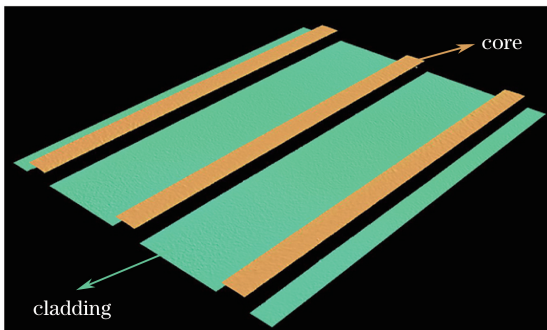


图 5 光波导芯层微观形貌

Fig. 5 Microscopic morphology of optical waveguide core layer

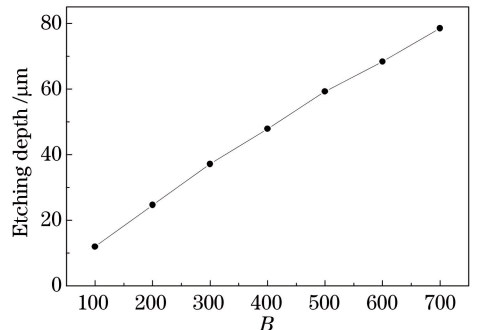


图 6 刻蚀深度随打标参数 B 的变化

Fig. 6 Variation of etching depth with marking parameter B

工参数如表 1 所示。当 $E=4.5$ mJ 时,刻蚀深度随参数 B 的变化关系如图 6 所示。由图可知,定点打标一次的平均刻蚀深度 $d_0=0.12$ μm 。

表 1 准分子激光加工参数设置

Table 1 Parameters setting of excimer laser processing

Energy E /mJ	Area of mask /($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	S	Repetition rate /Hz
4.5	128 \times 128	935	50

利用准分子激光系统加工出来的双侧 45° 微反射镜在扫描电子显微镜(SEM)下的俯视照片如图 7(a) 所示。从图中可以看出,右侧斜面光滑度要远远高于左侧斜面。其原因在于打标过程是从右向左依次进行的,如图 2 所示。对于右侧微镜,每次打标刻蚀出的台阶在后续打标中不会再受到激光刻蚀;对于左侧微镜,阶梯由中间向左侧依次出现,激光每次打标时都会对已经刻蚀出的阶梯斜面进行刻蚀。因此,刻蚀出的阶梯会受到后续打标脉冲的多次刻蚀,这会对刻蚀的阶梯造成一定损伤,进而导致表面变得粗糙。利用三维轮廓仪对微反射镜样品倾斜角度的测量结果如图 7(b) 所示,具体测量的线性区域如图 7(a) 中红线 AB 所示,测得斜面角度为 44.289° ,相较于 45° ,其偏差为 0.711° ,误差仅为 1.58% 。测量结果表明,基于准分子激光器制备 45° 微反射镜的方法是简单可行的。由于采用的是紫外激光消融原理,在严格控制激光打标参数的条件下,利用该方法制备的 45° 微反射镜具有重复性好、成品率高、样品形貌稳定性高的优点。

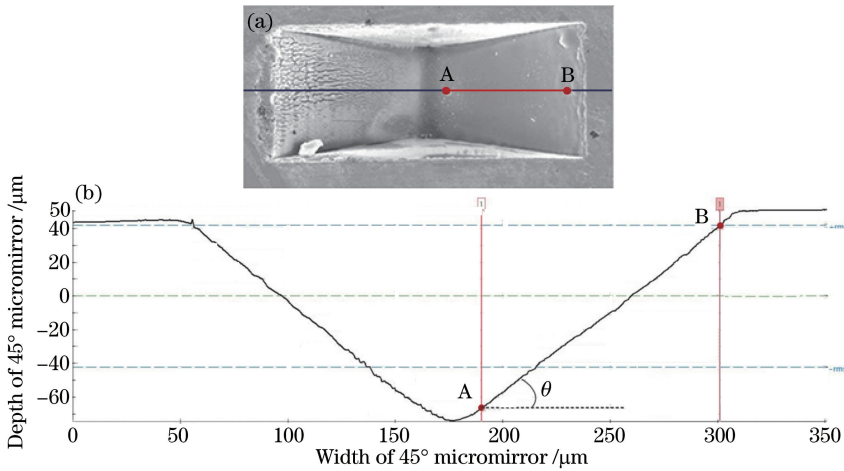


图 7 双侧 45° 微反射镜。(a)SEM 照片;(b)倾斜角度测量结果

Fig. 7 Bilateral 45° micromirrors. (a) SEM image; (b) measurement result of tilt angle

采用后加工的方法制备单侧 45° 微斜面镜,制备后的样品形貌如图 8(a) 所示,斜面采样区域表面形貌如图 8(b) 所示。采用三维轮廓仪测得其糙度为 250.3 nm。粗糙度是衡量物体表面光滑程度的物理量,会引起光学元件的散射损耗^[21],影响元件的光学性能,因此在光学加工上,应该降低粗糙度。

从图 8(a) 可以看出,实际刻蚀出来的斜面并非严格的矩形,而是上宽下窄的梯形结构,即 45° 微反射镜斜面两侧壁出现一定程度的锥度,经测量锥度为 10° 和 15° 。出现这种现象主要有两个原因:1) 激光从上往

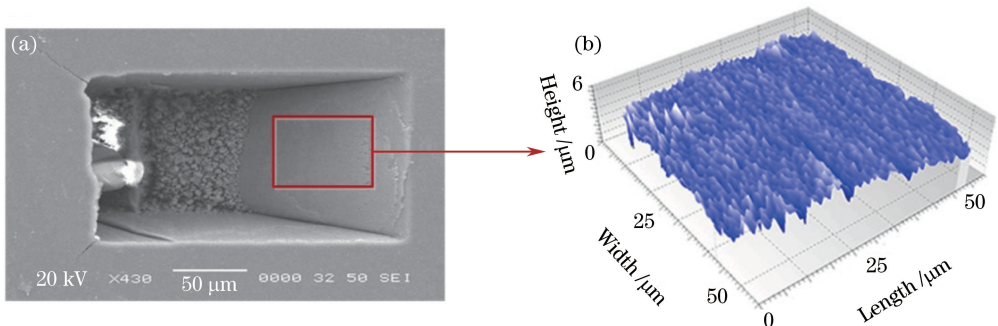


图 8 单侧 45° 微反射镜。(a)SEM 照片;(b)轮廓仪扫描采样区域表面形貌

Fig. 8 Unilateral 45° micromirror. (a) SEM image; (b) surface morphology from sampling area scanning by profilometer

下阶梯式逐步刻蚀,在刻蚀深度增加时激光通过已刻蚀的凹槽,类似通过光阑,导致激光光圈面积减小;2)在样品刻蚀之前,激光聚焦在样品表面,随着刻蚀深度的增加,激光能量逐渐减弱。光波导的几何尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$,出射光斑近似为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的正方形模斑,由图 8(a)斜面的几何尺寸计算得知斜面底部宽度为 $83.57\ \mu\text{m}$ 。这表明样品斜面足够容纳光斑,实际样品中出现的锥度对光斑反射的质量不会产生影响。另外,从图 8(a)可以看出,后加工的微镜底部具有较大的起伏,但这不会影响光束传输的质量。

4 利用 45° 微反射镜进行垂直耦合实验及分析

4.1 垂直耦合实验

利用制备好的 45° 微反射镜样品进行垂直耦合实验。为了提高 45° 微反射镜的反射率,采用表面喷金仪(JFC-1600,JEOL,日本)在其表面镀金膜。整个垂直耦合测试系统示意图如图 9(a)所示,其中 PCB 为印刷电路板。单模光纤(SMF)把光能量耦合进光波导中,经过长度为 1.5 cm 的光波导从 45° 微反射镜垂直端面出射,再经反射镜面垂直反射,耦合进芯径为 $200\ \mu\text{m}$ 的多模光纤(MMF),最后由双通道功率计(AV6334B,中国电子科技集团公司第四十一研究所,中国)接收探测。图 9(b)为采用 45° 微反射镜的系统测试现场图,其中红色箭头为光纤红光传播方向。从图中可以看出, 45° 微反射镜具有光束垂直转向的作用。经实测垂直耦合系统总的损耗 L_{sum} 约为 5.16 dB。

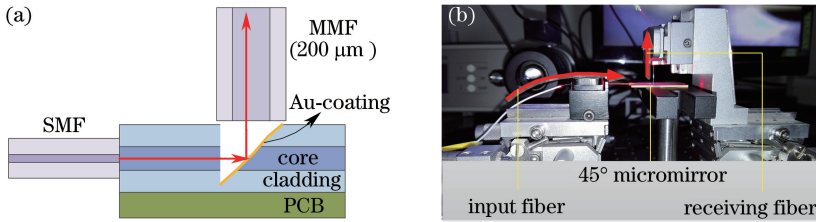


图 9 光纤与光波导垂直耦合结构。(a) 耦合示意图;(b) 现场实测图

Fig. 9 Structure for vertical coupling between fiber and optical waveguide. (a) Schematic diagram of coupling; (b) site measurement

4.2 损耗数据分析

整个系统的损耗主要由 4 部分组成,即光纤-光波导耦合损耗 L_{sw} 、光波导传输损耗 L_{w} 、光波导输出端面引起的损耗 L_{e} 及其 45° 微反射镜造成的损耗 L_{m} 。

在光纤-光波导耦合端面处不滴加匹配液,测得总损耗为 1.91 dB。在光纤-光波导耦合端面处滴加匹配液,测得总损耗为 1.12 dB。匹配液滴加前后测得的损耗之差即为光纤-光波导耦合损耗,即 $L_{\text{sw}}=0.8\ \text{dB}$ 。

由 3.2 节测试的单位长度传输损耗可知,1.5 cm 长的光波导传输损耗 L_{w} 约为 0.56 dB。

光波导输出端面引入的损耗 L_{e} ,主要包括菲涅耳反射损耗和端面粗糙度引入的散射损耗。经测量可知,实验系统菲涅耳反射损耗约为 0.3 dB。输出端面的粗糙度会造成一定的散射损耗,实验测得光波导端面的粗糙度约为 61.4 nm,由于该值较小,散射损耗可以忽略。因此,光波导输出端面引入的损耗可以近似为菲涅耳反射损耗。

由上述分析可知, 45° 微反射镜造成的损耗 $L_{\text{m}} \approx L_{\text{sum}} - L_{\text{sw}} - L_{\text{w}} - L_{\text{e}} = 3.5\ \text{dB}$ 。在反射镜斜面镀金膜,可大大提高反射率,透射光的损失可忽略不计。由图 8(b)可知,微镜斜面粗糙度较大,因此, 45° 微反射镜损耗主要是反射面的光散射引入的。在后续工作中可以通过热回流工艺^[22]来降低微镜斜面的粗糙度。

5 总 结

提出了一种利用准分子激光制备 45° 微反射镜的方法——激光阶梯刻蚀法。重点介绍了利用激光阶梯刻蚀法制备 45° 微反射镜的工艺流程,通过优化准分子激光加工参数可获得 45° 微反射镜样品。分析了斜面粗糙度、斜面几何尺寸对微镜反射性能的影响,并利用制备好的 45° 微反射镜样品进行了垂直耦合实验,对造成系统损耗的因素进行了深入分析。实验结果表明, 45° 微反射镜造成的损耗约为 3.5 dB,在后续工作中有待进一步优化参数以减少损耗。

激光阶梯刻蚀法制备流程简单可行,初步实现了垂直耦合功能,克服了其他刻蚀方法工艺流程繁琐、样品倾角不达标、适用范围小的缺点,在光波导互连背板应用中具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Matsui J, Yamamoto T, Tanaka K, *et al.* Optical interconnect architecture for servers using high bandwidth optical mid-plane[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012: OW3J. 6.
- 2 Taubenblatt M A. Optical interconnects for high-performance computing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4):448-458.
- 3 Kachris C, Tomkos I. A survey on optical interconnects for data centers[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(4): 1021-1036.
- 4 Ghiasi A. Large data centers interconnect bottlenecks[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2085-2090.
- 5 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.
- 6 Tan M R, Rosenberg P K, Mathai S, *et al.* Low cost, injection molded 120 Gbps optical backplane[C]. Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optical Engineers Conference, 2011: PDPA4.
- 7 Rho B S, Kang S, Cho H S, *et al.* PCB-compatible optical interconnection using 45-ended connection rods and via-holed waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(9): 2128-2134.
- 8 van Steenberge G, Geerincq P, van Put S, *et al.* MT-compatible laser-ablated interconnections for optical printed circuit boards[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(9): 2083-2090.
- 9 van Erps J, Hendrickx N, Debaes C, *et al.* Discrete out-of-plane coupling components for printed circuit board-level optical interconnections[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(21): 1753-1755.
- 10 Hendrickx N, van Erps J, Bosman E, *et al.* Embedded micromirror inserts for optical printed circuit boards[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(20): 1727-1729.
- 11 Bierhoff T, Schrage J, Halter M, *et al.* All optical pluggable board-backplane interconnection system based on an MPX™-FlexTail connector solution[C]. 2010 IEEE Photonics Society Winter Topicals Meeting Series (WTM), 2010: 91-92.
- 12 Cho M H, Hwang S H, Cho H S, *et al.* High-coupling-efficiency optical interconnection using a 90°-bent fiber array connector in optical printed circuit boards[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(3): 690-692.
- 13 Taillaert D, van Laere F, Ayre M, *et al.* Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(8A): 6071-6077.
- 14 Yoshimura R, Hikita M, Usui M, *et al.* Polymeric optical waveguide films with 45° mirrors formed with a 90° V-shaped diamond blade[J]. Electron Letters, 1997, 33(15): 1311-1312.
- 15 Cho I K, Lee W J, Rho B S, *et al.* Polymer waveguide with integrated reflector mirrors for an inter-chip link system[J]. Optics Communications, 2008, 281(19): 4906-4909.
- 16 Kim J S, Kim J J. Fabrication of multimode polymeric waveguides and micromirrors using deep X-ray lithography[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(3): 798-800.
- 17 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.
- 18 Hendrickx N, van Erps J, van Steenberge G, *et al.* Laser ablated micromirrors for printed circuit board integrated optical interconnections[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(11): 822-824.
- 19 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.
- 20 Zakariyah S S. Laser ablation for polymer waveguide fabrication[D]. Loughborough: Loughborough Innovation Centre, 2012.
- 21 Tian Laike, Teng Lin. Angle and light scattering[J]. Acta Photonica Sinica, 1997, 26(11): 1028-1030.
田来科, 滕霖. 角度与光散射[J]. 光子学报, 1997, 26(11): 1028-1030.
- 22 Hu J J, Feng N N, Carlie N, *et al.* Optical loss reduction in high-index-contrast chalcogenide glass waveguides via thermal reflow[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1469-1478.