

基于激光直写的微流光学触摸传感阵列

李 贤 袁余锋 李 书 林 巧 范宇强 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, 浙江 杭州 310027)

摘要 设计并制作了一种基于激光直写技术的光学触摸传感器件。该器件采用光学微流结构实现对外加压力的连续比例测量。器件制作采用紫外激光直写技术配合高精度平移台实现,整体工艺过程在 3 min 内完成。对所设计的传感器件的性能测试表明,光强信号随外力变化的曲线平滑,实测灵敏度为 0.995 mV/kPa。同时设计并制作了基于传感单元的阵列结构,不仅消除了光学累积误差,而且对集成化触摸传感的应用具有优势。

关键词 集成光学;光学设计;触摸传感;阵列

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0313001

Opto-Fluidic Tactile Sensor Array by Laser Direct Writing

Li Xian Yuan Yufeng Li Shu Lin Qiao Fan Yuqiang Wu Xingkun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Centre for Optical Electromagnetic Research, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A tactile sensor element is designed and fabricated based on laser direct writing technology. A continuous measurement of external tactile pressure is achieved by using an optical microfluidic structure. The tactile sensing element is fabricated using ultraviolet laser direct writing technology combining with a high-precision translation stage, and the overall process time is within 3 min. Experimental results show that the relation between external pressure and change in light intensity exhibits a smooth curve with a sensitivity of 0.995 mV/kPa. The array structure is designed and fabricated based on this sensing element, and it is capable of not only eliminating optical accumulated error, but also enhancing integration of optical tactile sensing into various applications.

Key words integrated optics; optical design; tactile sensor; array

OCIS codes 130.6010; 230.3120; 040.1240

1 引 言

与传统的机电触摸传感器相比,光学触摸传感器在制作和性能方面都具有非常明显的优势。首先,光学触摸传感阵列可以免除显示屏前由透明导电材料制作而成的玻璃和聚合物层,而光学触摸系统所需要的元件如发光二极管(LED)、光电二极管(PD)和光导结构等在现今的工艺水平下不仅成本已经大大降低,而且抗电磁干扰能力得到提高。其次,外界信号转换为光信号的过程简单、准确、快速,经过光电二极管转换后可以获得光信号的数字化信息,为后期的数据处理或传感器的校准提供了便利。其突出的优点是:在

传感过程中,外界物理量如触摸压力仅需与光束相互作用,使传感单元处的光束部分减弱或阻断,而不需外界和电子传感元件直接接触而改变电阻或电容等物理量,因此响应速度快,可以防止传感阵列的老化及受损,延长使用时间、提高灵敏度和信噪比,并扩展其适用性。在未来的机器人触摸传感、远程模拟人类触摸的虚拟现实等各种应用中,光学触摸传感可望获得较大的发展^[1~5]。

目前光学触摸传感技术主要是基于红外扫描原理或光的受抑全内反射原理^[6,7]。前者的发展方向为器件微型化、改进光束传播路径和提高对光信号

收稿日期: 2011-07-21; **收到修改稿日期**: 2011-09-11

作者简介: 李 贤(1987—),女,硕士研究生,主要从事光器件应用方面的研究。E-mail: lixian0861@126.com

导师简介: 吴兴坤(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信器件和集成波导光电器件应用等方面的研究。

E-mail: xingkunwu@163.com

的后续处理等,而后者的发展方向主要是光学多点触摸技术^[8,9]。对这类光学触摸传感器而言,输出的信号如光强和相位等光学参量的变化过程均为开关量,即只能通过光束是否被阻断来判断外界对触摸传感部分是否有接触,而不能记录外界接触如压力等模拟量由弱到强的变化过程。因此,需要在外界变化量和光学量之间加入具有连续变化属性的物体作为中间介质。从光微流体技术的角度看,通过在微观尺寸下控制流体的运动,使其与光之间相互作用,可以得到连续可调的光学结构或检测系统,如可调的光学透镜、光微流体显微镜等。而将该原理应用于微型探测元件,不仅满足连续性,而且有助于该器件光学集成的发展^[10~13]。

本文基于光微流原理设计了一种感知压力模拟量的光学触摸传感单元结构,并借助于激光直写技术进行制作。实际测量表明:外界压力与输出信号呈较好的线性关系,光学触摸传感单元的灵敏度为 0.995 mV/kPa, 并且此结构可构成二维阵列,用于感知平面或曲面上的压强分布。

2 触摸传感单元设计

人类手指的触摸压力通常在数十至上百千帕,痛觉的阈值为 500 kPa^[14]。因此将触摸压力上限设置为 100 kPa。微流光学传感器的工作原理是由光源出射的光经过光导耦合进入充有部分液体的微流通道后,外界压力改变通道内液体的分布状况,而微流通道输出端的光强发生相应变化,由光电二极管检测后输出至后续信号处理电路。设计结构原理如图 1 所示,传感单元由一个微流通道和与通道连通的两个圆形结构腔体组成,两个腔体分别是注满液体的传感部分和不填充任何液体的非传感部分。两个腔体位于通道的两端,且沿两侧分布。微流通道的端面外侧接入直波导。将通道、圆形腔、波导结构的上下面用薄膜封闭,得到封闭的触摸传感元件。传感部分腔体内的液体在外界压力的作用下进入微流通道,将空气压缩进入非传感部分。随着压力的增减,微流通道中液体-空气界面在传感与非传感腔体之间运动,对光导管中传递的光束产生不同的折射效应,使接收端的光强与液体-空气界面的位置相关,因此得到光强与外界压力之间的变化关系。其中填充的液体可根据光束衰减的需要添加少量散射微粒以调节传感单元的动态范围。

在设计中采用 Zemax 软件中的非序列模式对微流通道中液体-空气界面的位置与输出光强的函

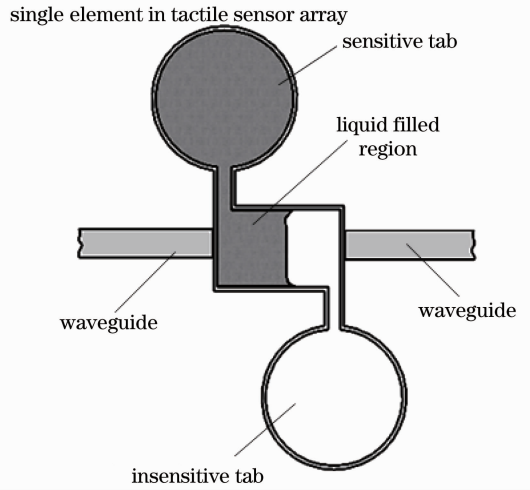


图 1 传感器单元原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor element
数关系进行分析,以确定传感元件的各参数及性能。在模拟此过程时,确定对光强在微流通道传输过程中产生影响的各参量:填充液体折射率、液体-空气界面位置、液体散射和吸收系数、微流通道尺度等。光束在液体与高聚物构成的光导中传播时,液体对光束可能的作用是散射和吸收,而在微流通道结构的微小尺寸中,对光强的吸收作用可以忽略不计;当微流通道中充入含散射微粒的不同浊度(定义单位浊度为 1 L 水中含有 1 mg 的 SiO₂ 或白陶土时所呈现的浑浊程度,单位为 NTU)的液体,输出光强的变化因浊度高低而不同。若采用纯水填充传感元件,则两个参数即液体-空气分界面在微流通道中的位置和微流通道几何尺寸成为影响输出信号的主要因素。图 2 是模拟微流通道中光束的传播过程, L 是从液体-空气分界面到通道末端界面即空气隙的长度,通道截面为 2.5 mm×2.5 mm,波导折射率为 1.47。当光束以一定的扩散角进入微流通道内的无散射液体中传播,再经过通道内的空气隙传播时,因

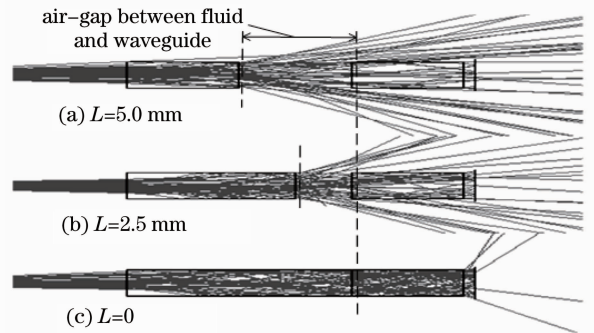


图 2 微流通道中液体-空气界面移动时光束传播变化
Fig. 2 Changes of beam propagation as the liquid-air interface moves in opto-fluidic channel

液体-空气界面移动导致多模光束向外扩散的程度不同,导致接收端光强度与空气隙长度反向变化。图中各个入射角度光束在 Zemax 中以蒙特卡罗方式产生,为便于观察其变化效果,显示时省略了部分光束。

分析图 2 所示通道中接收端光强度随空气隙长度 L 变化关系曲线,结果如图 3 所示,同时模拟分析三种不同微流截面的通道结构(分别是 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$)中空气隙长度与输出光强度的关系。以通道 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 截面为例,当液体-空气界面向右移动时,液体在通道中的填充比例增大,空气隙长度减小,由于折射界面向探测器靠近,光电二极管接收到的光能量随之增加。值得注意的是,当空气隙长度为 0 时,光通过率不到 100%,这是由于少量的光在通道的边界经由折射而泄漏导致的;空气充满通道时,光导结构的损耗并未达到 100%,这是由于光导管近轴光束能量被接收导致的。光导通道截面为 $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 结构时的变化与 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 相似,并且随着截面面积增大,输出光能量随空气长度的变化越来越小。而选择较小的微流通道横截面明显有利于提高器件的灵敏度。

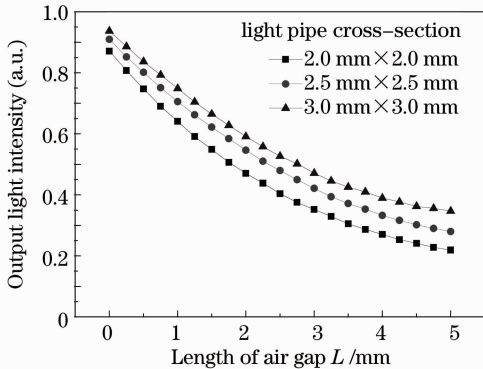


图 3 输出光能量随空气长度变化

Fig. 3 Output light intensity versus length of the air gap

图 4 是传感元件的封装设计图。初始状态下,只有传感部分充满液体,其余的空间内均为空气;封装薄膜在传感单元敏感区的上表面处带有一定的弹性,其余部分包括底面均为刚性。当外界触按传感部分时,弹性薄膜在压力作用下发生形变,驱动薄膜下的液体进入微流通道,改变通道中光束的传播状态。该薄膜弹性系数的选择决定了形变量,并由此结合光电响应,可确定该器件的灵敏度和动态范围。基于上述触摸传感单元,设计了触摸传感的阵列结

构,工作原理如图 5 所示。

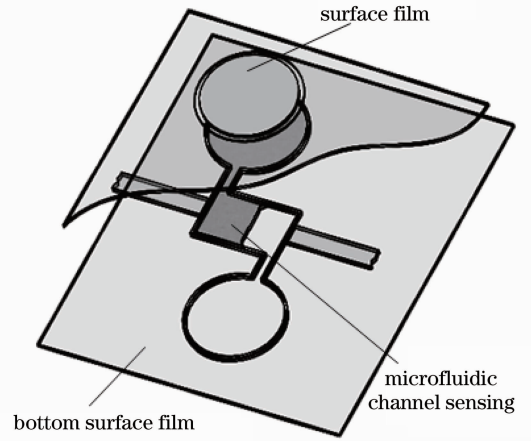


图 4 传感元件结构封装图

Fig. 4 Packaging diagram of a sensor element

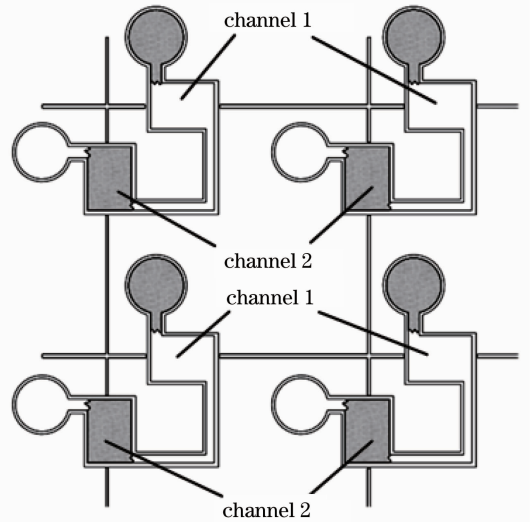


图 5 传感器阵列结构原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the sensor array structure

阵列结构由传感单元排列成二维结构,而每个传感单元由两个相通的光导微流通道构成,水平方向排列的光导通道 1 在初始状态下充满空气,而垂直方向排列的通道 2 在初始状态下充满液体。在外界压力作用下,阵列中的各传感单元对应于压强分布对光导通道进行填充,通道 1 中液体逐渐增多,同时通道 2 中的液体因气压的驱动进入阵列结构的非传感部分,两个通道中液体的流动变化过程相反,从而进入这两个通道里传播的光强的变化过程相反。对整个阵列的水平和垂直方向各网格线上的光源以固定频率进行扫描,同时在相互垂直的两个方向上检测到输出端光强变强和变弱的交叉节点即定位为该点的压强,由此可得整个二维曲面上各个传感位置的压强大小。

3 器件制作

实验中所用的微流结构是使用激光直写^[15,16]技术制作完成的,该直写装置如图 6 所示。在该工艺中利用可变强度的聚集紫外(UV)激光束,在基板表面对 UV 固化高聚物薄层进行可编程的高精度扫描。在扫描过程中,光刻基板随载物平台运动,基板表面覆盖的高聚物感光材料实现曝光而固化,其固化区域与激光扫描路径相符合,尺度略大于激光光斑(这是由固化在高聚物中的传递效应造成的),经过显影去除未受激光照射区域的高聚物,基板表面形成与编程目标一致的结构轮廓。在图 6 中,高精度二维平移台(Physik Instruments 公司)分别沿两个相互垂直的方向移动,通过数据线 with 计算机(PC)连接并由相应的软件进行操作,控制此二维平移台完成各种图案的扫描,位移的重复定位精度可达 100 nm。在平移台上方放置高度可调的单模激光光源(波长 $\lambda=408$ nm,最大功率为 20 mW),其光斑尺寸通过一个 10 \times 显微镜调节。

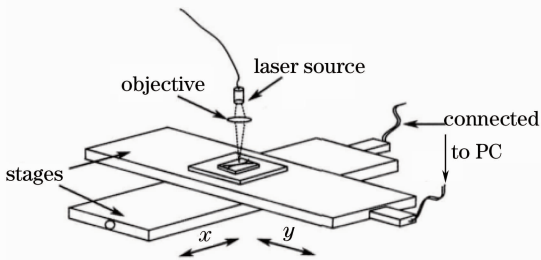


图 6 基于高精度平移台的激光直写装置

Fig. 6 High-precision translation stages for laser direct writing

图 4 中的封装传感元件的微流通道由直线波导组成,与通道连通的两个圆形结构腔体由圆弧波导组成。制备时调节激光光源下的显微镜位置,使直写时投射在基板上的光斑直径保持在 0.5~0.7 mm 范围内。采用生物载玻片作为基板,经清洗并烘干后,将 UV 固化光学高聚物(紫外光固化聚氨酯丙烯酸预聚物, DSM Desotech 公司,折射率为 1.475)涂覆在基板表面,厚度控制在 100 μm 左右且均匀分布。再将此基板放置在平移台上的载物台表面,针对波导结构中直线段和圆弧段设定不同的运行参数:对直波导部分,以 200 $\mu\text{m}/\text{s}$ 匀速刻写;对圆环部分,采用变速运动的方式刻写,以保证获得平滑的波导线条结构。不同的刻写速度得到的波导结构有一定差异,在实验中会影响测量结果,因此采用激光直写技术。直写过程中要注意刻写的连续性,尤其是直波导和圆环波导衔接的部分。直写过

程结束后,需要对基板上未受激光照射(没有固化)的胶体进行清除,先采用风刀干法除胶的方式,可以除去 95% 以上的未曝光胶体。使用气体喷枪对基板进行吹洗时,需注意喷出气体的压强和吹洗角度,既防止直写波导变形,又可以达到较好的清洗效果。再利用有机溶剂甲醇清除剩余的未曝光胶体,可以得到高净度的波导结构。清除未感光固化的 UV 胶后,需将基板放入紫外灯箱进行强曝光固化处理,以完成直写结构的彻底曝光。工艺时间为 3 min 左右。

对另一基板采用类似的激光直写工艺获得覆盖所用的传感和非传感薄膜,其中设定传感部分厚度为 20 μm ,其他部分厚度为 300 μm 。完成固化后,将覆盖薄膜从基板上剥离,在上下层与波导结构结合的部分涂覆少量的 UV 胶,再经过 UV 曝光固化完成密封结构。最后利用直径为 0.3 mm 的注射针管将液体注入传感一端的圆形腔内,封口后则得到实验所需的光学触摸传感单元。图 7 是实验室条件下得到的扫描光导网格线结构的实际阵列。

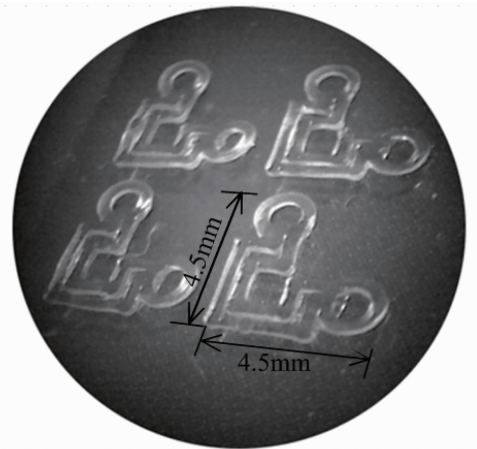


图 7 采用激光直写工艺得到的 2 \times 2 传感器阵列结构

Fig. 7 2 \times 2 sensor array fabricated by laser direct writing

4 实验及结果分析

图 8 是触摸传感单元测试装置图。将传感单元整体固定在三维精密调节架上,输入端和输出端的光纤分别与 650 nm 激光光源和 PIN 光电二极管(PT204-6C, Everlight 公司)连接。传感单元中注入液体的传感圆形腔上方与压力控制系统相接触,并在靠近杠杆中间处放置位移测量器对传感薄膜的位移量做实时记录。测试前,调节输入光纤的输出端与传感单元的位置以进行光束耦合。同时,理论和实验表明,光经过直径为 300~500 μm 、长度大于

4 mm的波导混合段后,波导内光波的各模式均匀性较好^[17]。因此,输入光纤的输出端先与一段长度为5 mm的高聚物波导段连接,用于模式混合,再进入传感单元的微流通道。经模式混合后,进入微流通道的光束可以保持在一定的角度内,且在光束传输截面上光强分布均匀。微流通道输出的光束进入光电二极管,输出的电信号经前置放大器放大后由数字示波器记录。通过计算机控制压力的变化,并记录示波器上的光强数值。

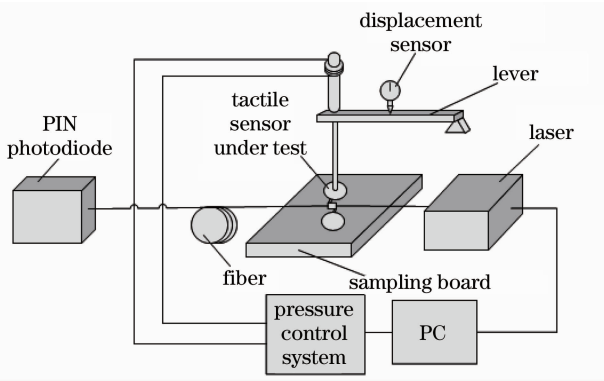


图 8 传感单元测试装置

Fig. 8 Test equipment for sensor elements

如图 9 所示随着压力的增加,微流通道中的液体流动导致光强逐渐减小,对比下降速率,可见逐步递减的单位压力信号响应与模拟所得到的结果基本相符,但是在低压力下与计算结果有差异,表现在 0~60 kPa 范围内实际测量灵敏度低于模拟计算结果。分析表明,由激光直写形成的微流界面呈一定的区域性波动,如 1 mm² 的小面积虽然光滑但高聚物的流动性和固化过程形成界面的尺寸变化,由此造成界面的实际折射与模拟计算不同。实验中触摸传感单元对施加的外力非常敏感,所以在整个实验过程中需要避免强脉冲型压力,不要使液体回流,而

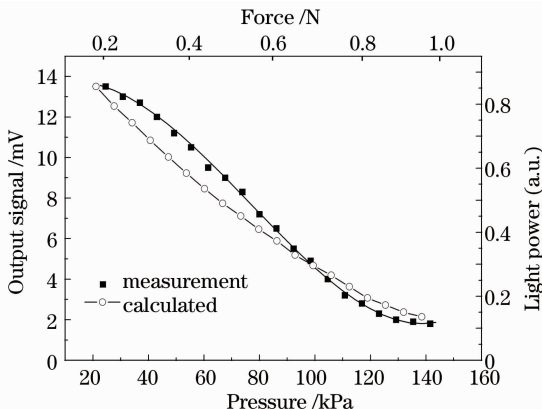


图 9 输出信号随施加外力的变化

Fig. 9 Output signal versus the external pressure

是缓慢地从微流通道的一端流动到充满整个通道,以避免产生误差。同时在制作整个触摸传感器时,需注意微气泡、胶层厚度和尘埃粒子等,这些因素均被观察到会影响波导结构中的光传播,造成系统的误差。

对实验条件下制作的 2×2 阵列结构进行研究,当外界压力分别作用于阵列中的各个单元时,记录图 5 中经过通道 2(纵向信号)的输出结果,得到的数据如图 10 所示。4 个传感器所得到的结果与图 9 中的曲线具有一致的变化趋势,其相应特性的误差在 15% 以内。改善高聚物感光层厚度均匀性和直写光束功率及光斑尺寸的稳定性,可进一步提高器件一致性,并缩小传感单元尺度,阵列尺寸可获得较大的扩展。

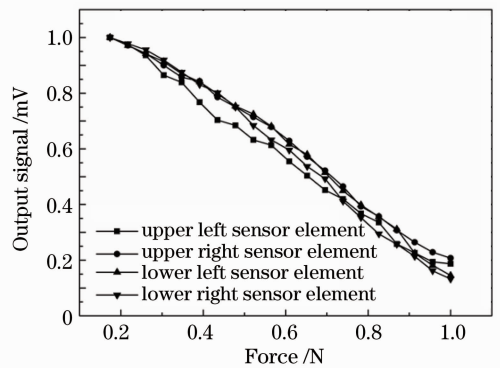


图 10 2×2 传感器阵列通道 2 方向的输出信号

Fig. 10 Output signal from channel 2 of a 2×2 sensor array

5 结 论

基于光学微流思想,设计并利用激光直写技术制作了光学触摸传感器。从传感单元出发,研究了触摸时施加外力与经过微流通道后光强度之间的变化关系以及光束在该传感结构中传播时的影响因素,并用 Zemax 的蒙特卡罗光线追迹法模拟结果与实验结果进行对比。基于此实验结果,提出了光学触摸传感阵列结构。在实验室条件下,完成了由 4.5 mm×4.5 mm 的单元结构形成的二维阵列,并将此传感阵列覆盖于曲面上实现表面触摸的模拟量传感。

参 考 文 献

- Li Fengyou, Xie Yongjun, Sun Qiang *et al.*. Analyzing of line profile for laser direct writing lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 136~139
- 李凤有, 谢永军, 孙 强 等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 136~139

- 2 Wan Jing, Liang Zhongcheng. New techniques of optofluidic chip on actuation of liquid[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091301
万 静, 梁忠诚. 微流控光学芯片中新型液体驱动技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(9): 091301
- 3 I. Hardy, P. Grosso, D. Bosc. Fabrication of polymer waveguides and spot size converters by UV induced refractive index modification[C]. *SPIE*, 2005, **5825**: 290~299
- 4 Alok K. Das. Laser direct writing polymer single-mode waveguide devices with a rib structure[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(7): 1236~1243
- 5 Qi Heng, Wang Xiansong, Chen Tao *et al.*. Fabrication and application of PMMA continuous-flow PCR microfluidic chip with CO₂ laser direct-writing ablation micromachining technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1239~1245
祁 恒, 王贤松, 陈 涛等. PMMA基连续流式PCR微流控芯片的CO₂激光直写加工与应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1239~1245
- 6 J. Heo, J. Chung, J. Lee. Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **126**(2): 312~327
- 7 Ahsanullah, A. K. B. Mahmood, S. Sulaiman. Design and implementation of multi-touch system using FTIR technique for optimization of finger touch detection[C]. *IEEE International Symposium on Information Technology (ITSim)*, 2010, **1**: 1~7
- 8 J. Engel, J. Chen, C. Liu. Development of polyimide flexible tactile sensor skin[J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2003, **13**(3): 359~366
- 9 J. Engel, J. Chen, Z. Fan *et al.*. Polymer micromachined multimodal tactile sensors[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, **117**(1): 50~61
- 10 Demetri Psaltis, Stephen R. Quake, Changhui Yang. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics[J]. *Nature*, 2006, **442**(7101): 381~386
- 11 U. Levy, K. Campbell, S. Mookherjee. On-chip microfluidic tuning of an optical microring resonator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(11): 111107
- 12 R. S. Dahiya, M. Valle, G. Metta *et al.*. POSFET devices based tactile sensing arrays[J]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2010, 893~896
- 13 A. Groisman, S. Zamek, K. Campbell *et al.*. Optofluidic 1×4 switch[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13499~13508
- 14 Jannick Brennum, Michel Kjeldsen, Kai Jensen *et al.*. Measurements of human pressure-pain thresholds on fingers and toes[J]. *Pain*, 1989, **38**(2): 211~217
- 15 Li Shu, Zhuge Qunbi, Lin Qiao *et al.*. Multimode polymeric optical power splitter based on an asymmetrical structure using laser direct writing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3221~3226
李 书, 诸葛群碧, 林 巧等. 激光直写非对称多模高聚物光功率分配器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3221~3226
- 16 Zhi Yanan, Yan Aimin, Shu Rong *et al.*. High-speed digital scanner based on electro-optic crystal switch array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3430~3434
职亚楠, 闫爱民, 舒 嵘等. 高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3430~3434
- 17 Liu Yanting, Ni Wei, Wu Xingkun. A soft-lithography vertically coupling structure for multilayered optical interconnection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 349~354
刘彦婷, 倪 玮, 吴兴坤. 基于软光刻的多层光互连垂直耦合结构[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 349~354

栏目编辑: 韩 峰