

基于 PDMS 基片的可变焦柱透镜

孟伟东, 孙丽存, 李 强, 普小云*

(云南大学 物理科学技术学院, 云南 昆明 650091)

摘要:设计并制作了一种基于聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)基片的可变焦微型柱透镜。这种柱透镜主要由一根埋入 PDMS 基片中的玻璃毛细管构成,通过选择毛细管内液体的折射率实现变焦功能。液体折射率为 1.451 8 ~ 1.550 2 时,柱透镜焦距可由 21.369 mm 减小到 3.362 mm,变焦倍数达到 6.4 倍。用散射光成像方法观察并拍摄了平行光通过这种可变焦柱透镜后的光线轨迹图;用 ZEMAX 光学设计软件模拟了成像过程,模拟结果和实验图像相符;用高斯光学的逐次成像方法推导出了这种柱透镜的焦距公式,焦距的计算结果和实验以及模拟结果吻合。PDMS 基片中可变焦微型柱透镜的成功制作,为“芯片上的实验室”提供了一种重要的光学成像元件。

关键词:PDMS 基片;变焦柱透镜;玻璃毛细管;液体折射率

中图分类号:TH703 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20130603.0365

Variable-focus cylindrical lens based on a PDMS substrate

MENG Wei-dong, SUN Li-cun, LI Qiang, PU Xiao-yun*

(Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

* Corresponding author, E-mail: xypu@163.com

Abstract: The variable-focus cylindrical lens based on a Polydimethylsiloxane (PDMS) chip is designed and fabricated, which is composed mainly by a glass capillary embedded in a soft PDMS chip, and the focal length varies by selecting different liquids filled into the glass capillary. When the refractive index of liquid changes in the range of 1.451 8 to 1.550 2, the focal length varies from 21.369 to 3.362 mm, which reaches a 6.4 × zoom ratio. With light-scattering imaging method, the ray traces of parallel light passing through various lenses are viewed and photographed. The imaging processes are simulated by using the ZEMAX optical design software, and the simulated results are consistent with the experimental photographs. The focal length formula of a glass capillary buried in PDMS chip is derived with the Gaussian optical successive imaging method, and is verified by the simulated method and experimental results. The successful fabrication of the variable-focus cylindrical lens based on PDMS substrate provides an important optical imaging element for “lab on a chip”.

Key words: PDMS substrate; variable-focus cylindrical lens; glass capillary; refractive index of liquid

收稿日期:2012-12-16;修订日期:2013-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11164033);云南省应用基础研究基金资助项目(No. 2011FA006);云南省高校科技创新团队支持计划资助项目(No. X3111004)

1 引言

随着光学技术的蓬勃发展,光学器件的集成化、微型化以及光学参数的可调化已成为现代光学技术发展的主要方向之一^[1-2]。而传统光学器件存在体积大、可调性和稳定性差等缺陷,已无法满足现代光学系统向微型化与集成化方向发展的需求^[3]。为了降低成本,增强实验的方便性,提高实验精度和可重复性,现代光学研究中常常需要将多种实验功能集成在一块独立的芯片上,即“芯片上的实验室”(lab on a chip)^[4-6]。基底是制作“芯片实验室”的基础,而聚二甲基硅氧烷(PDMS)是现在制作微流控芯片^[7]中最常用的高聚物基底材料,其具有透光性强,透气性高,玻璃化温度低,折射率低,容易塑造,耐用,化学惰性,无毒,化学稳定等优良特性^[8-10]。在PDMS基片中制作可变焦微型柱透镜,可以为“芯片上的实验室”提供一种重要的光学成像元件。玻璃毛细管具有柱透镜的聚光和成像功能^[11-14],在毛细管内注入不同折射率的透明液体可以改变这种柱透镜的焦距并实现变焦功能。

本文通过在PDMS基片中埋入圆柱形玻璃毛细管并改变毛细管中液体折射率的方法,获得了基于PDMS基片的可变焦柱透镜。用散射光成像方法观察并记录了这种柱透镜成像的光线轨迹,用光学设计软件ZEMAX模拟了各种实验条件下的成像过程,实验记录图像和软件模拟结果以及柱透镜焦距的理论计算结果基本吻合。

2 基于PDMS的柱透镜的制作

首先制作一个70.0 mm × 15.0 mm × 8.0 mm (长 × 宽 × 高)的长方体模型槽。将一根外径 $R = 0.644$ mm,内径 $r = 0.493$ mm,长度 $l = 15.0$ mm的玻璃毛细管平行固定在长方体内,其距离底面和侧面分别为4 mm和6 mm。按Dow Corning公司的技术要求^[15],把Dow Corning Sylgard 184产品的预聚物和固化剂按照10:1的质量比均匀混合后注入到长方体模型槽中,并放入真空玻璃罩中

抽真空至 1.33×10^{-4} kPa出气。出气24 h后,取出半固化的PDMS模型槽,放入120 °C的恒温箱中固化0.5 h。按照如上工艺制作出的PDMS基片,排气充分,均匀透明,折射率为 $n_p = 1.4115$ (用2WA-J型阿贝折射仪的实测值)。但由于基片内缺乏气孔,基片对入射光的散射作用极弱,很难用此均匀透明的PDMS基片观察光线行径。为了能够更好地从基片侧面观察光线行径,将注入模型槽中的PDMS混合液在空气中静置24 h来代替在真空中排气的方法,并在PDMS基片中遗留气孔以增加PDMS基片对入射光的散射能力。图1为制成的变焦柱透镜实物照片(长-宽面视图)。

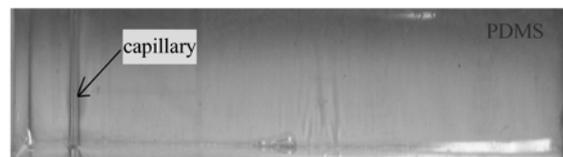


图1 基于PDMS基片的变焦透镜实物照片

Fig.1 Picture of variable-focus cylindrical lens based on PDMS substrate

3 实验安排及实验结果

在埋入PDMS基片的毛细管中充入折射率已知的透明液体后构成液芯柱透镜。用波长为543.5 nm的激光器发出的绿光作为实验光源,激光束经过焦距分别为50和200 mm的两个凸透镜后,把光斑的尺寸扩大为原来的4倍。扩束后的平行光经过宽度为0.98 mm(毛细管内径)的狭缝限光后,垂直毛细管轴向入射到柱透镜上。由于PDMS基片中遗留气孔对激光束的散射作用,沿PDMS基片侧面(毛细管轴向)可以用肉眼清晰地直接观察到平行光经毛细管聚焦前后的光线轨迹。用数码相机拍摄的光线轨迹照片如图2所示(长-高面视图)。

玻璃毛细管内充入的液体和折射率分别为图2a:纯水($n = 1.3330$);2b:体积比为1:1的乙二醇和丙三醇混合液($n = 1.4518$);2c:体积比为2:3的乙二醇和丙三醇混合液($n = 1.4570$);2d:

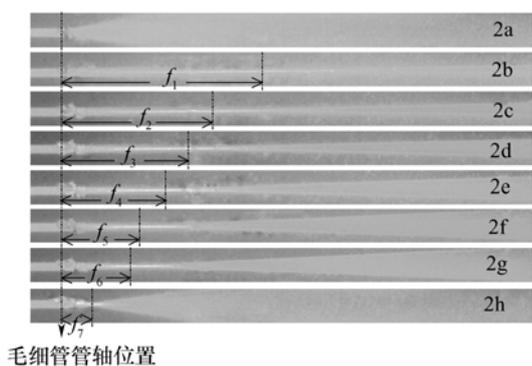


图2 焦距随折射率变化图

Fig.2 Pictures of the focal length varied with the refractive index of liquids

体积比为 3:7 的乙二醇和丙三醇混合液 ($n = 1.4606$); 2e; 体积比为 1:4 的乙二醇和丙三醇混合液 ($n = 1.4646$); 2f; 体积比为 1:9 的乙二醇和丙三醇混合液 ($n = 1.4689$); 2g; 丙三醇溶液 ($n = 1.4773$); 2h; 硝基苯溶液 ($n = 1.5502$)。液体折射率用 2WA-J 型阿贝折射仪测量, 测量值见表 1。

由图 2 可见, 在毛细管内充入纯水时 (图 2a), 平行光经柱透镜后发散, 埋入 PDMS 基片中的毛细管属于发散柱透镜 (负透镜); 增加毛细管内充入液体的折射率后, PDMS 基片中的毛细管变为汇聚柱透镜 (正透镜), 汇聚柱透镜的焦距随充入液体的折射率增加而减小 (图 2b 至 2h)。显然, 埋入 PDMS 基片中的柱透镜可以通过改变液芯折射率的方式实现变焦功能。

表 1 毛细管内液体折射率与焦距的对应关系值

Tab.1 Relationship between the refractive index of liquid in capillary and focal length

物质	纯水	乙二醇-丙三醇混合液					丙三醇	硝基苯
		1:1	2:3	3:7	1:4	1:9		
折射率测量值	1.333 0	1.451 8	1.457 0	1.460 6	1.464 6	1.468 9	1.473 3	1.550 2
计算焦距值/mm	-3.278	21.369	16.423	14.167	12.299	10.780	9.577	3.362
模拟焦距值/mm	-	21.370	16.429	14.169	12.299	10.780	9.576	3.364
空气中计算焦距值/mm	1.449	1.065	1.054	1.046	1.038	1.029	1.021	0.896

4 理论分析

4.1 焦距公式推导

利用近轴条件下满足的高斯公式^[16-17], 采用逐面成像法推导出了基于 PDMS 基片的毛细管焦距公式。设玻璃毛细管的内外半径分别为 r 和 R ; 毛细管的管壁折射率为 n_0 ; 毛细管内液体的折射率为 n ; 固化后的 PDMS 基片的折射率为 n_p 。如图 3 所示, 平行光线经柱面 O_1 (实物成虚像)、 O_2 (虚物成虚像)、 O_3 (虚物成虚像) 和 O_4 (虚物成实像) 4 次成像后, 交光轴于焦点。4 次成像的推导过程如下:

第一次成像:

$$\frac{n_0}{s'_1} + \frac{n_p}{\infty} = \frac{n_0 - n_p}{R}, \quad (1)$$

$$s'_1 = \frac{n_0 R}{n_0 - n_p}, \quad (2)$$

第二次成像:

$$s_2 = (R - r) - s'_1, \quad (3)$$

$$\frac{n}{s'_2} + \frac{n_0}{s_2} = \frac{n - n_0}{r}, \quad (4)$$

$$s'_2 = \frac{(n_p r - n_p R - n_0 r) n r}{n n_p r - n n_p R - n n_0 r + n_0 n_p R}, \quad (5)$$

第三次成像:

$$s_3 = 2r - s'_2, \quad (6)$$

$$\frac{n_0}{s'_3} + \frac{n}{s_3} = \frac{n - n_0}{r}, \quad (7)$$

$$s'_3 = \frac{n n_p r^2 - n n_p R r - n n_0 r^2 + 2 n_0 n_p R r}{2 n n_p R - n n_p r + n n_0 r - 2 n_0 n_p R}, \quad (8)$$

第四次成像:

$$s_4 = (R - r) - s'_3, \quad (9)$$

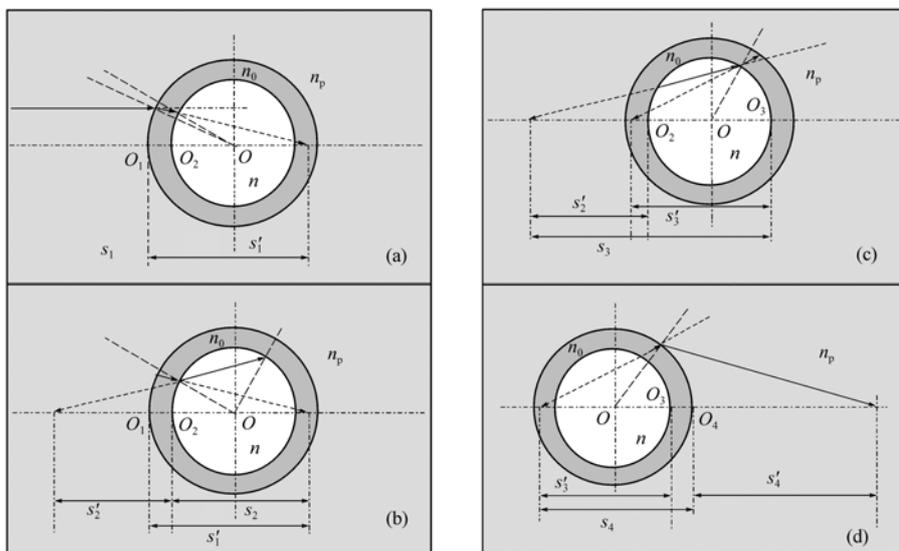


图3 a~d为PDMS逐面成像示意图
Fig.3 Schematic diagram of PDMS imaging process

$$\frac{n_p}{s'_4} + \frac{n_0}{s_4} = \frac{n_0 - n_p}{R}, \quad (10)$$

$$s'_4 = \frac{2nn_pR^2 - 2nn_pRr - 2n_0n_pR^2 + nn_0Rr}{2nn_p r - 2nn_0r - 2nn_pR + 2n_0n_pR}. \quad (11)$$

PDMS 基片中的毛细管焦距满足:

$$f = R + s'_4 = \frac{nn_0Rr}{2nn_0r - 2nn_p r - 2n_0n_pR + 2nn_pR}. \quad (12)$$

取 $R = 0.644 \text{ mm}$; $r = 0.493 \text{ mm}$; $n_0 = 1.5163$ (K9 玻璃); $n_p = 1.4115$; $n = 1.3330, 1.4518, 1.4570, 1.4606, 1.4646, 1.4689, 1.4733, 1.5502$, 按式(12)计算出的毛细管焦距见列表1中的第三行。为做比较,将 $n_p = 1$ (即玻璃毛细管置于空气中)时的毛细管焦距值也列在表1中的第五行。

4.2 ZEMAX 模拟

利用光学设计软件 ZEMAX 模拟了平行光经过变焦柱透镜后的光线轨迹图,模拟结果如图4所示。图4中,4a至4h的模拟条件和图2a至2h的实验条件相同,模拟得到的焦距值 f_1 至 f_7 见表

1,同时标定在图2a至2h

的实验图片中。

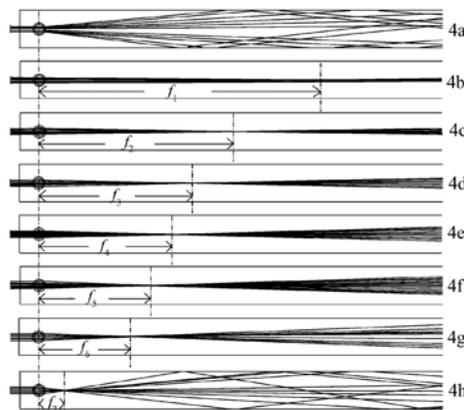


图4 平行光经过变焦透镜的光线模拟图
Fig.4 Simulated drawing of parallel light passing through the variable-focus cylindrical lenses

5 实验和理论比较

比较模拟结果图4和实验结果图2,可见二者反映出完全相同的规律:(1)在充入液体的折射率较小时,基片中的毛细管属于发散柱透镜;

(2)在充入液体的折射率较大时,基片中的毛细管属于汇聚柱透镜,且柱透镜的焦距以及焦深随充入液体的折射率的增加而减小;(3)模拟焦距值非常接近于实验焦距位置。

比较表1中模拟焦距的结果(第四行)和计算焦距的结果(第三行),可见模拟焦距值非常接近于计算焦距值,说明近轴条件下推导出的毛细管焦距公式(12)式是正确的;比较表1空气中毛细管焦距的计算值(第五行)和PDMS中毛细管焦距的计算值(第三行),可见玻璃毛细管埋入PDMS基片后,在液芯折射率从1.4518变化至1.5502,毛细管焦距由21.369mm减小到3.362mm,变焦倍数达到6.4倍,而空气中玻璃毛细管的变焦倍数仅达到1.19倍,说明改变液芯折射率是在PDMS基片中实现柱透镜变焦的一种非常有效的方法。

6 结 论

本文设计并制作了一种埋入PDMS基片中的可变焦微型柱透镜,这种柱透镜通过选择毛细管内液体的折射率实现变焦功能。适当地改变基片中玻璃毛细管内注入的液体,可以实现汇聚柱透镜和发散柱透镜的相互转换。得到的实验图像与用ZEMAX光学设计软件模拟的结果一致,与理论计算结果相符。由理论计算和实验图像可以看出,当注入的液体为水(折射率为1.3330)时,柱透镜为发散透镜;当注入的液体从硝基苯(折射率为1.5502)到丙三醇与乙二醇的1:1混合液(折射率为1.4518),柱透镜为变焦范围可达到6.4倍的汇聚柱透镜。PDMS基片中可变焦微型柱透镜的成功制作,为“芯片上的实验室”提供了一种重要的光学成像元件,具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] PSALTIS D,QUAKE S,YANG C H. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics[J]. *Nature*,2006,442(7101):381-386.
- [2] WHITESIDE G M. The origins and the future of microfluidics[J]. *Nature*,2006,442(7101):368-373.
- [3] 梁忠诚,赵瑞.微流控光学及其应用[J].*激光与电子学进展*,2008,45(6):16-23.
LIANG ZH CH,ZHAO R. Optofluidics and its potential applications[J]. *Laser Optoelectronic Progress*,2008,45(6):16-23. (in Chinese)
- [4] NGUYEN N T. Micro-optofluidic lenses;a review[J]. *Am. Institute Physics*,2010,4:031501.
- [5] MONAT C,DOMACHUK P,EGGLETON B J. Integrated optofluidics;a new river of light[J]. *Nat. Photon.*,2007,1(2):106-114.
- [6] LUO D B,DUAN Y X. Microplasmas for analytical applications of lab-on-a-chip[J]. *TrAC Trends in Analytical Chem.*,2012,39:254-266.
- [7] ANDERSON J R,CHIU D T,JACKMAN R J,*et al.*. Fabrication of topologically complex three-dimension microfluidic systems in pdms by rapid prototyping[J]. *Anal. Chem.*,2000,7:1264-1268.
- [8] JAHNKE A,MAYER P. Do complex matrices modify the sorptive properties of polydimethylsiloxane(PDMS) for non-polar organic chemicals[J]. *J. Chromatography A*,2010,1217(29):4765-4770.
- [9] 王明.聚二甲基硅氧烷(PDMS)微流控芯片研究[D].北京:中国科学院电子学研究所,2003:36-51.
WANG M. Study of microfluidic chip in poly(dimethylsiloxane)[D]. Beijing:Institute of Electronics,Chinese Academy of Sciences,2003:36-51. (in Chinese)
- [10] 杜欣,张平,刘永顺,等.基于PDMS和玻璃材料的毛细管被动阀临界压力分析[J].*光学精密工程*,2011,19(8):1852-1858.
DU X,ZHANG P,LIU Y SH,*et al.*. Burst pressure of capillary burst valve based on the glass and PDMS[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(8):1852-1858. (in Chinese)
- [11] 李强,苏光辉,张瑞凯,等.透明毛细管管壁折射率的无损测量[J].*光学精密工程*,2010,18(6):1264-1270.

- LI Q, SU G H, ZHANG R K, *et al.*. Nondestructive measurement of refractive index of transparency capillary[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1264-1270. (in Chinese)
- [12] 刑曼男, 白然, 普小云. 精确测量微量液体折射率的新方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1196-1202.
XING M N, BAI R, PU X Y. Novel measuring method for refractive index of micro quantity liquid[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1196-1202. (in Chinese)
- [13] 李强, 韩广辉, 邢曼男, 等. 一种精确测量微量液体折射率的仪器: 中国, 20081301. 1[P]. 2009-07-22.
LI Q, HAN G H, XING M N, *et al.*. The apparatus of accurate measuring the refractive index of micro-quantity liquid. Patent of China: CN, 20081301. 1[P]. 2009-07-22. (in Chinese)
- [14] 李强, 韩广辉, 邢曼男, 等. 用毛细管焦点法精确测量微量液体的折射率[J]. *光学学报*, 2009, 29(9):2468-2472.
LI Q, HAN G H, XING M N, *et al.*. Measuring refractive index of micro-quantity liquid by focus method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9):2468-2472. (in Chinese)
- [15] Dow corning[EB/OL]. [2012-12-16]. [http://www.dowcorning.com/applications/search/products/? Ntt = Polydimethylsiloxane&N = 0&Ntx = mode + MatchAllPartial&WT. svl = 4&Nty = 1&Ntk = ProductFinder_en](http://www.dowcorning.com/applications/search/products/?Ntt=Polydimethylsiloxane&N=0&Ntx=mode+MatchAllPartial&WT.svl=4&Nty=1&Ntk=ProductFinder_en).
- [16] Richard Dittion. 现代几何光学[M]. 詹涵菁译. 长沙: 湖南大学出版社, 2004.
Richard Dittion(write). *Modern Geometrical Optics*[M]. ZHAN H J, Translation. Changsha: Hunan University Press. 2004
- [17] 王之江. 光学技术手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987:5
WANG ZH J. *Optical Technology Manual*(Volume 1)[M]. Beijing: China Machine Press, 1987:5. (in Chinese)

作者简介:



孟伟东(1989—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 2007年于河南科技大学获得学士学位, 主要从事毛细管成像分析方面的研究。E-mail: mengweidong19890213@126.com



李强(1987—), 男, 云南昆明人, 博士研究生, 助教, 2011年于云南大学获得硕士学位, 主要从事光学系统的成像及液体折射率测量方面的研究。E-mail: liqiang_ynu@126.com



孙丽存(1990—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 2010年于云南大学获得学士学位, 主要从事液体折射率测量机成像分析方面的研究。E-mail: alicheckzy@126.com



普小云(1957—), 男, 云南昆明人, 教授, 博士生导师, 1982年于云南大学获得学士学位, 1987年于中国科学院物理研究所获得硕士学位, 2000年于香港中文大学获得博士学位, 主要从事光学和光电子学领域的研究。E-mail: xyphu@163.com