

文章编号: 0258-7025(2008)08-1156-05

折射微光学结构出射复杂光学波前

张新宇^{1,2} 李记赛^{1,2} 季安³ 谢长生²

(华中科技大学¹ 多谱信息处理技术国防科技重点实验室, ² 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)
³ 中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要 通过单掩模紫外(UV)光刻、感应耦合等离子体(ICP)刻蚀及 KOH:H₂O 化学腐蚀,在硅片上制作 5×5 元面阵硅折射微光学结构。通过电化学方法将制成的硅精细图形结构转换成镍版,进而通过压制法将精细的镍版图进一步转印到有机玻璃材料上,从而制成面阵光学波前出射结构。光刻版由结构尺寸在微米量级的大量微孔组成,其特征尺度和排布方式由算法生成。微形貌测试显示了制作的折射微光学波前出射结构具有预期的表面形貌特征。通过常规光学测试,比较和分析了出射复杂波前的情况。

关键词 光电子学;折射微光学结构;波前;制备工艺;高性能成像探测和仿真

中图分类号 O 438;O 47 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1156

Emitting Complex Wavefronts by Refractive Micro-Optics Structures

Zhang Xinyu^{1,2} Li Jisai^{1,2} Ji An³ Xie Changsheng²

(¹State Key Laboratory for Multispectral Information Processing Technology, ²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
³Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract Through a technique mainly consisting of single mask ultraviolet (UV) photolithography, inductively coupled plasma (ICP) etching and KOH:H₂O chemical etching, refractive microoptics structure array of 5×5 over silicon wafer is fabricated. The fine patterns fabricated over silicon substrate are transferred into nickel mask by electrochemical method. The fine pattern structures over nickel mask are further copied into plastic materials by embossing operation. Photomask is composed of a large number of microholes with typical structural size in micrometer order, which are distributed by the algorithm. The surface profile characteristics of the fabricated refractive micro-optics structures are obtained by surface measurements. Through common optical measurement, emitted complex wavefronts are discussed and analyzed.

Key words optoelectronics; refractive micro-optics structure; wavefront; fabrication technology; high performance imaging detection and simulation

1 引言

近年来,高性能光学/光电成像探测技术得到迅速发展。基于图像目标的谱特征(多谱/高光谱/超谱)以及电磁辐射的波前行为,在自适应条件下,快速获取复杂背景环境下的图像目标信息,提取关键性的目标图像特征以及反馈控制参数等,已成为现

代图像信息获取技术中的一个热点研究内容。目前,研究人员正积极研发可见光及红外频域的、基于波前调制的高性能自适应光电成像探测技术^[1~5]。通过探测、分析及调制复杂背景环境下图像目标电磁辐射的波前信息,如波前的形态及其迁移和变动行为等^[6~10],显著提高所获取的目标图像质量及成

收稿日期:2007-07-05;收到修改稿日期:2008-01-16

基金项目:国家自然科学基金(60777003),控制与仿真技术国防科技重点实验室基金(51474020205JW0517),航天创新技术基金(20060122)和武汉光电国家实验室重点基金资助项目。

作者简介:张新宇(1965—),男,陕西人,副教授,博士研究生,主要从事微纳光学与光电技术方面的研究。

E-mail: x_yzhang@yahoo.com.cn

导师简介:谢长生(1955—),男,湖北人,教授,博士生导师,主要从事现代光盘存储技术方面的研究。

E-mail: cs_xie@hust.edu.cn

像探测效能,增强干扰抑制能力,克服甚至摆脱人工因素、大气不稳定性以及气动光学效应等对成像探测的不利影响。因此,研发能灵活出射与背景和图像目标密切相关的复杂波前的技术措施,已成为发展基于波前调制的成像探测及仿真等技术中的一个关键环节。本文讨论和分析了通过标准微电子工艺,制作能将常规的高斯激光束转换成复杂波前的折射微光学结构。

2 折射微光学波前出射结构

2.1 单步光刻与湿法化学腐蚀工艺

采用单步光刻及 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 湿法化学腐蚀方法,制作具有连续轮廓特征的折射微光学波前出射结构。主要工艺环节包括:1) 在 $\{100\}$ 晶向的硅基片上,通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法生长 SiO_2 膜;2) 单步光刻,将光刻版上所预设的大量圆形或方形微图形结构转印到在 SiO_2 膜层上所涂的光刻胶膜上,使由这些微图形结构所标识的大量 SiO_2 膜结构裸露出来;3) 通过感应耦合等离子体(ICP)刻蚀形成 SiO_2 膜结构,还包括了去除分布在 SiO_2 膜表面的残余光刻胶;4) 通过常规的各向异性 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀,形成结构尺寸各异的倒金字塔形硅孔;5) 通过 HF 腐蚀,去掉硅孔周围的 SiO_2 膜层;6) 通过 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 深度腐蚀,形成用于出射波前的、具有连续轮廓特征的折射微光学结构。

实验使用的光刻版在中芯国际集成电路(上海)有限公司制作,光刻和 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 化学腐蚀等工艺,在中国科学院半导体研究所半导体集成技术工程研究中心进行。所使用的 PECVD 设备是英国 STS 公司的复用化学气相沉积(CVD),ICP 设备是英国 STS 公司的复用先进氧化刻蚀(AOE),光刻设备是德国 Suss Microtec 公司的 MA6/BA6 双面对准光刻机。

通常情况下, $\{100\}$ 晶向的硅材料在 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 中的腐蚀呈各向异性。对表面分布有倒金字塔形凹孔的硅片进行 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 深度化学腐蚀,将会出现类凹球面的硅微图形结构。研究表明,倒金字塔形硅凹孔的结构尺寸,如孔径和深度等,与凹球面硅微图形结构的孔径、深度及表面弯曲程度等密切相关^[11]。在工艺条件确定的情形下,倒金字塔形硅凹孔的结构尺寸越大,腐蚀出的类凹球面硅微图形结构的孔径及凹深越大,表面越平缓。因此,通过有序排布具有不同结构尺度的倒金字塔形凹孔,在 KOH 的深度刻蚀作用下,将具有不同凹深、孔径及

表面形态的相邻类凹球面硅微结构相互叠加,就可以获得具有特定表面粗糙度及连续轮廓形貌的折射微光学结构。由于倒金字塔形硅凹孔的成型,源于常规的各向异性 KOH 腐蚀作用,故其结构尺寸和空间排布,可由光刻操作控制。也就是说,通过控制光刻版上所展布的、大量结构尺寸各异的圆形或方形微通光图形的大小及空间排布,就可以对最终的折射微光学结构的形貌轮廓进行设计和控制。这就是通过标准微电子工艺,制作用于出射复杂波前的折射微光学结构的物理和工艺基础。

对复杂波前,由圆球结构来拟合其形貌轮廓,是获得光刻版上的大量微通光图形的结构尺寸及空间分布,仅能在特定算法的变换操作下进行。具体过程如下:1) 选定波前;2) 挑选结构尺寸不同的球形结构拟合波前的轮廓形貌;3) 根据所需制作器件的表面粗糙度要求,确定相邻球形结构间的交叠程度;4) 在确定所用球形结构的尺寸和空间位置后,得到倒金字塔形硅微结构的相应尺寸和空间位置信息;5) 进一步将倒金字塔形硅微结构的尺寸和位置数据,转换成光刻版上的大量圆形或方形微通光结构的图案形态,即获得光刻版的结构数据。如图 1 所示,首先在 $\{100\}$ 晶向的硅基片上,由 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 的

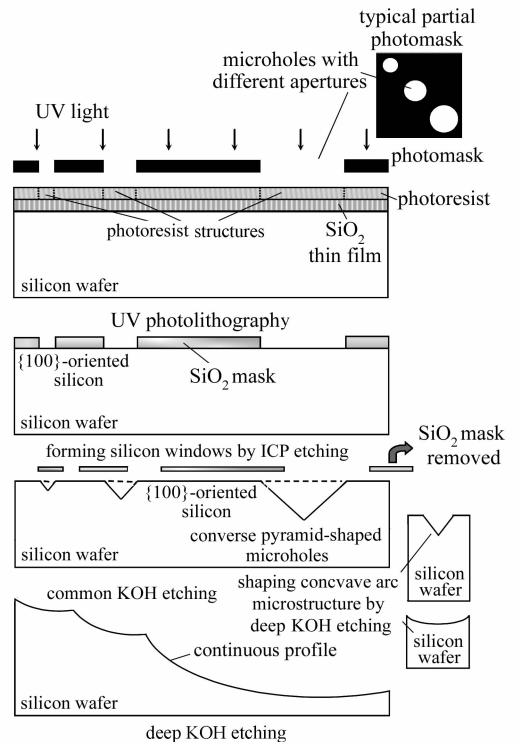


图 1 通过 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀形成连续轮廓的硅图形结构

Fig. 1 Silicon microstructure with continuous profile shaped by $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ etching

各向异性腐蚀作用得到结构尺寸不同的多个倒金字塔形硅孔；然后通过深度 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀，形成结构尺寸不同的相邻类凹球面硅微结构并将它们相互交叠。由于类凹球面硅微结构在硅片上的空间分布是预设的，通过控制腐蚀出来的硅微结构的外形尺寸，形成合理程度的微结构间的交叠，就可以获得按预定参数指标成形的折射微光学结构。相邻硅微结构相互交叠的情形见图 2 所示，深色区域所表示的就是由 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 深度腐蚀所形成的类凹球面硅微结构。

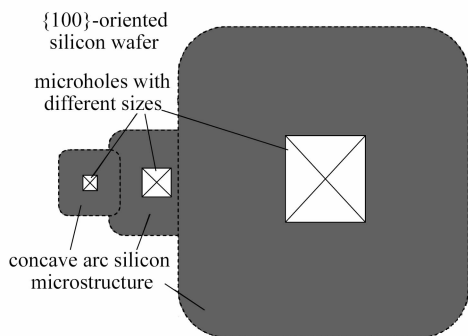


图 2 在硅片上制作的倒金字塔形方孔及进一步的深度化学腐蚀

Fig. 2 Fabricating converse pyramid-shaped microholes over silicon wafer and further deep chemical etching

制备基于上述工艺并具有连续轮廓特征的折射型波前出射结构，首先需要确定其形貌特征，如通过解析关系或有限元分析与采样等。在此基础上，将器件轮廓通过多个球形结构加以拟合。一般而言，由于通过化学腐蚀所遗留的相邻类球形间的突起或凹陷等微结构，其特征尺寸远大于通过 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 深度腐蚀所能得到的硅结构的表面平整尺度。也就是说，形成的这些突起或凹陷，决定了所制微光学结构的表面粗糙度。其结构尺寸越小，所制折射微光学结构的表面粗糙度越低，形貌质量越高。因此，在设计阶段就应将可能出现的凸起或凹陷的结构尺寸，限制在几十个纳米的范围内。上述工作完成后，即进入光刻版图的设计和波前出射结构的仿真测试阶段。在这一过程中，将得到与波前出射结构对应的光刻版图。它决定了硅基片上硅微孔的位置和结构尺度，以及可预测的波前出射结构的形貌和结构参数等。由于所采用的硅湿法腐蚀演化规律是经验性的，形貌拟合简单采用了球形而非实验所显示的类型球形结构，故必须引入与实验条件相关的多个经验关系和参数。

针对一个由解析关系所描述的波前出射结构，

所做的结构仿真和所设计的光刻版图如图 3 所示。图 3(a)为目标结构，由中心处的凹坑及四个相邻的鼓包构成，凹坑和鼓包均为光滑图形，凹坑和鼓包间光滑连接。图 3(b)为采用本文方法进行多个球面图形拟合后形成与(a)对应的仿真结构，标出了与(a)对应的、各鼓包和中心凹坑的情况。图 3(d)给出了与(b)对应的光刻版图，大小不同的黑色圆点代表了大量微通光图形，其结构尺寸和空间分布将决定最终所能获得的波前出射结构的轮廓形貌。如中心部分具有较大通光孔径的微圆孔图形阵列，对应目标及仿真结构上的中心凹坑。在四个顶角处所分布的、具有相对中心处的微圆孔有更小孔径的微圆孔图形阵列所对应的较浅凹陷，以及用椭圆形所标识的四个鼓包区域等。沿着图 3(d)的中心十字线所仿真的，分别在 x 及 y 方向上的结构轮廓见图 3(c)。

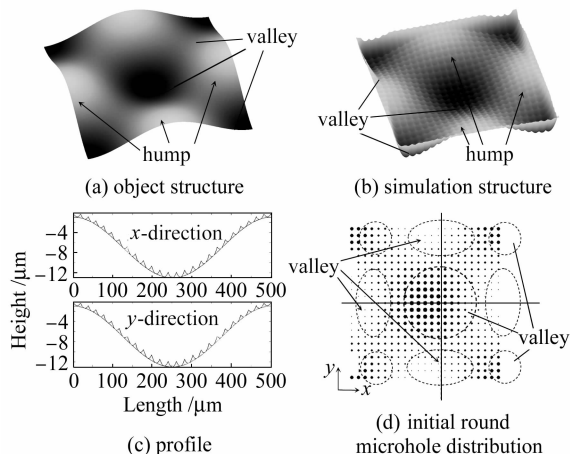


图 3 制备硅折射波前出射结构的关键环节

Fig. 3 Key steps for fabricating silicon refractive micro-structures

基于上述原理和工艺技术，通过 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 深度腐蚀得到了由多个相同折射单元组成的 5×5 元阵列硅折射结构，这些阵列图形中的每个折射单元的显微光学照片如图 4 所示，依图标顺序所示的各折射结构的解析关系分别为：

$$\frac{\sin^2(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{9\pi^2(x^2+y^2)}, \frac{\sin(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{3\pi\sqrt{x^2+y^2}},$$

$$\frac{\sin(4\pi\sqrt{x^2+y^2})}{4\pi\sqrt{x^2+y^2}}, \sin(2\pi x)\sin(2\pi y),$$

$$\sin(3\pi x)\sin(2\pi y), \sin(4\pi x)\sin(2\pi y),$$

$$\cos(2\pi x)\cos(2\pi y), \sin(4\pi x)\sin(3\pi y) \text{ 和}$$

$\sin(4\pi x)\sin(4\pi y)$ ，其中 $-1 \leq x, y \leq 1$ 。可见，尽管组成各单元折射结构的多个基本凹弧状图形仍可被分辨出，表面形貌测试显示，各折射结构的表面粗糙

度已达几十纳米,轮廓清晰完整、光滑顺畅。实验表明,对较为陡峭的弧形轮廓,通过球形结构间的交叠来拟合表面轮廓形貌,由球形结构间交叠处的突起所带来的表面不平整度在微米量级。仿真测试显示,通过将在硅片上所定位的倒金字塔形凹孔的特征尺寸缩小到纳米量级,折射结构浑然一体。

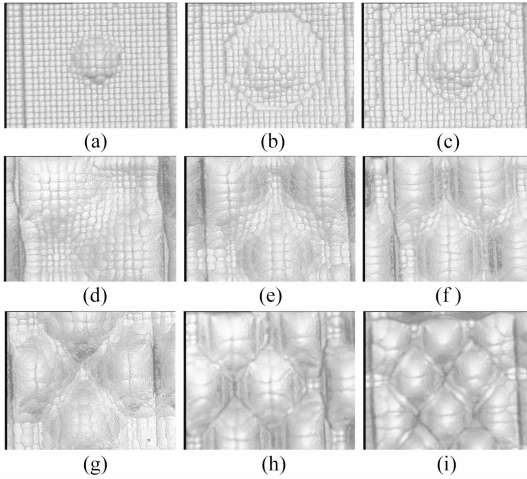


图 4 硅折射元件的轮廓结构

Fig. 4 Profile characteristic of silicon refractive micro-

structures. (a) $\frac{\sin^2(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{9\pi^2(x^2+y^2)}$; (b) $\frac{\sin(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{3\pi\sqrt{x^2+y^2}}$; (c) $\frac{\sin(4\pi\sqrt{x^2+y^2})}{4\pi\sqrt{x^2+y^2}}$; (d) $\sin(2\pi x)\sin(2\pi y)$; (e) $\sin(3\pi x)\sin(2\pi y)$; (f) $\sin(4\pi x)\sin(2\pi y)$; (g) $\cos(2\pi x)\cos(2\pi y)$; (h) $\sin(4\pi x)\sin(3\pi y)$; (i) $\sin(4\pi x)\sin(4\pi y)$

2.2 光学性能测试

为了测试所制折射微光学结构的波前出射效能,首先将已制成的硅折射结构,通过电化学方法复制成镍版,然后通过压制的办法,将镍版图形转印到有机玻璃材料上。通过将波长约为632 nm的连续激光照射到有机玻璃波前出射结构上,获得所需的波前出射效果。所出射的多种与波前对应的光场分布如图5所示。测试光路如图6所示,定量测试结果如图7所示。

图5通过所制折射微光学结构,已成功地

将常规高斯入射光波,转变成了由 $k_1 \frac{\sin^2(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{9\pi^2(x^2+y^2)}$, $k_2 \frac{\sin(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{3\pi\sqrt{x^2+y^2}}$, $k_3 \frac{\sin(4\pi\sqrt{x^2+y^2})}{4\pi\sqrt{x^2+y^2}}$, $k_4 \sin(2\pi x)\sin(2\pi y)$, $k_5 \sin(3\pi x)\sin(2\pi y)$, $k_6 \sin(4\pi x)\sin(2\pi y)$, $k_7 \cos(2\pi x)\cos(2\pi y)$, $k_8 \sin(4\pi x)\sin(3\pi y)$ 和 $k_9 \sin(4\pi x)\sin(4\pi y)$ 等所描

述的出射波前,即实现了相对复杂的光学波前发射。各解析关系中的常数 k 为波前关联因子,用于描述所出射的波前与相应的折射微光学结构的形貌差异程度。 k 与高斯激光波束的形态、折射微光学结构和光源间的距离、折射微光学波前出射结构所用的材料及其形貌特征等密切相关,它随波前出射结构的不同而异。如图6所示,由半导体激光器出射的连续激光经扩束后,直接照射到所制作的折射微光学结构上,所出射的波前被投射到距折射结构约1 m处的显示屏上。所反射的强度图像通过一台 CCD 相机记录下来。该强度图像经算法解算后,既获得所对应的波前。如图7所示,通过测量与图5(b)对应的单元光场能量分布情形,定量获得了这一典型光场的空间能量分布特征。

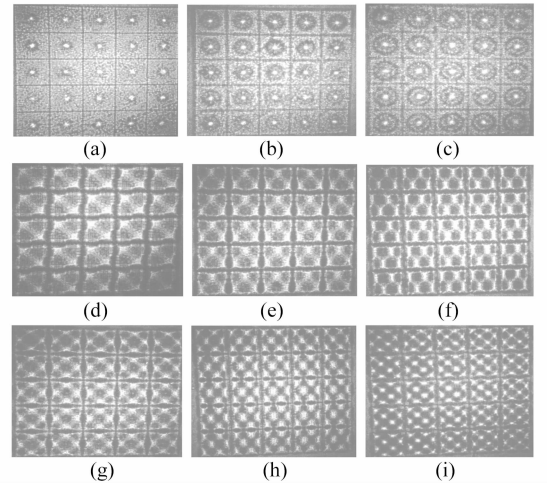


图 5 制作在有机玻璃材料上的折射微光学结构出射远场复杂波前

Fig. 5 Emitting far-field complex wavefront by refractive micro-optics structures fabricated over plastic

materials. (a) $k_1 \frac{\sin^2(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{9\pi^2(x^2+y^2)}$; (b) $k_2 \frac{\sin(3\pi\sqrt{x^2+y^2})}{3\pi\sqrt{x^2+y^2}}$; (c) $k_3 \frac{\sin(4\pi\sqrt{x^2+y^2})}{4\pi\sqrt{x^2+y^2}}$; (d) $k_4 \sin(2\pi x)\sin(2\pi y)$; (e) $k_5 \sin(3\pi x)\sin(2\pi y)$; (f) $k_6 \sin(4\pi x)\sin(2\pi y)$; (g) $k_7 \cos(2\pi x)\cos(2\pi y)$; (h) $k_8 \sin(4\pi x)\sin(3\pi y)$; (i) $k_9 \sin(4\pi x)\sin(4\pi y)$

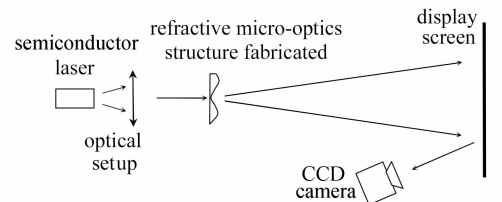


图 6 测试光路示意图

Fig. 6 Schematic of test optical path

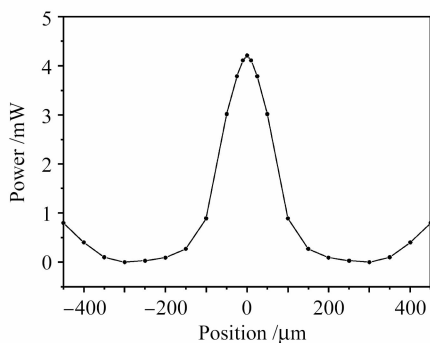


图7 对应波前中的一个突起和两个凹陷处的能量分布

Fig. 7 Energy distribution corresponding to one hump and two valleys in a feature wavefront

仿真和实测表明,由于在制备波前出射结构的初始阶段,选用了较大孔径的倒金字塔形微孔,所以制作的硅孔尺寸均大于 $1\ \mu\text{m}$ 。由多个尺寸不一的类球形微结构交叠所形成的硅微结构,其总的形貌轮廓仍留有拟合不充分的痕迹。

3 结 论

通过单掩模光刻, $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 湿法化学腐蚀以及精细图形结构的压制转印方法,有效制作出可出射多种复杂波前的面阵折射微光学结构。表面形貌测试表明所制作的折射微光学波前出射结构具有良好形貌特征。常规光学测试给出了具有较高关联度的多种复杂波前的出射效果。建立的器件制作和测试方法,为研究基于波前调制的高性能成像探测技术、波前仿真技术、复杂波前的生成和显示技术等,提供了一种基础性手段。

参 考 文 献

1 Lee D. Feinberg. NASA capabilities roadmap: advanced telescopes and observatories [C]. *SPIE*, 2005, **5899**:589906

2 Donald Owens, Michael Schoen, Keith Bush. MEMS deformable mirror embedded wavefront sensing and control system [C]. *SPIE*, 2006, **6113**:61130V

3 Enrique J. Fernández, Boris Považay, Boris Hermann *et al.*. Adaptive optics using a liquid crystal spatial light modulator for ultrahigh-resolution optical coherence tomography [C]. *SPIE*, 2006, **6138**:61380Y

4 Nathan Doble, Geunyoung Yoon, Li Chen *et al.*. Use of a microelectromechanical mirror for adaptive optics in the human eye [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17):1537~1539

5 Brian J. Bauman, Donald T. Gavel, Richard G. Dekany *et al.*. Optical design for the narrow field infrared adaptive optics system (NFIRAOS) petite on the thirty meter telescope [C]. *SPIE*, 2005, **5903**:590303

6 Bian Baomin, Hou Feng, Chen Jianping *et al.*. An investigation of parameters on the front of laser plasma shock wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):155~159

卞保民,侯枫,陈建平等. 激光等离子体空气冲击波前参量的测定及研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(2):155~159

7 Ho Zhijuan, Yan Aimin, Liu Dean *et al.*. Wave-front conversion by photorefractive local volume holographic cylindrical lenses reconstructed with different readout wavelength [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1648~1654

胡志娟,闫爱民,刘德安等. 光折变局域体全息柱透镜变波长读出下的波前转换[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1648~1654

8 Wang Yulei, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. Wavefront reconstruction by means of a new extrapolation method of fringe-prolongation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):401~404

王雨雷,吕志伟,何伟明等. 采用一种新的外推延拓法重构激光波前[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):401~404

9 Xie Wenke, Jiang Zongfu. Real-time wavefront construction approach based on proper orthogonal decomposition basis function [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):327~330

谢文科,姜宗福. 基于本征正交分解基的实时波前重构方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):327~330

10 Ho Zhijuan, Yan Aimin, Liu Dean *et al.*. Study of wave-front conversion by local volume holographic grating diffraction between cylindrical and plane waves [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1127~1131

胡志娟,闫爱民,刘德安等. 局域体全息光栅衍射的平面波与柱面波的波前转换研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1127~1131

11 Don L. Kendall, William P. Eaton, Ron Manginell *et al.*. Micromirror arrays using $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ micromachining of silicon for lens templates, geodesic lenses, and other applications [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(11):3578~3588