

采用单步光刻和湿法腐蚀工艺制作高性能 衍射微透镜*

张新宇^{1,†} 陈胜斌¹ 季 安³ 谢长生²

(1 华中科技大学多谱信息处理技术国防科技重点实验室, 武汉 430074)

(2 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(3 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 采用单步光刻和湿法腐蚀工艺,低成本快速制作面向高性能蓝光和红光 DVD 光学头物镜的衍射微透镜.所制微光学结构的表面粗糙度在纳米量级,衍射相位台阶的高度在亚微米量级并可以根据需求灵活调整,通光孔径在毫米至厘米量级的范围内可调.组成衍射微透镜的大量基本相位结构,可以根据入射和出射光束的形貌特征及参数指标,通过衍射积分算法灵活设置和排布.远场光学测试显示了所制衍射微透镜的高衍射效能.

关键词: 高性能衍射微透镜; 衍射积分算法; 单步光刻; 湿法腐蚀工艺; DVD 物镜

PACC: 4225F; 4280K; 4285

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)10-1625-05

1 引言

目前,作为 DVD 系统核心结构之一的光学头物镜,其用量每年以亿只计,我国主要以进口为主,成为制约我国光存储工业持续发展的一个瓶颈因素.通常情况下,制作 DVD 光学头物镜需要精密的加工设备,繁杂的工艺流程以及人工的干预,从而带来了诸如制作成本高,制作周期长,光学性能有限,工艺环节易受人员、设备和环境条件影响等问题.近些年来,尽管通过引入计算机辅助设计和制作以及二元光学技术等,使工艺水平有了不同程度的改进与提高;利用非球面度有限的折射以及二元衍射微透镜,显著增强和扩展了光学结构的性能,有效降低了光学结构的外形尺寸等.但成本高,加工周期长,光学性能有限,光学结构的形貌和结构参数难以根据需求灵活设计和调控等缺陷依然存在.为了解决这些问题,人们提出了多种改进方法和措施.

为了充分利用现代微电子工业的若干成熟工艺,发挥其在可靠性,重复性,价格,精细图形结构的生成、转移和演化,结构耦合与微系统集成等方面的优势,近几年在国际上出现了基于标准微电子工艺,设计和制作高性能光学透镜的化学腐蚀方法,已获得了若干阶段性成果,显示出了良好的发展前景.2003 年,荷兰研究人员采用湿法蚀刻手段,获得了

微米特征尺度的非球面微透镜、微棱镜和微反射镜等,其表面粗糙度已达到几十纳米^[1].2004 年,日本和法国的研究人员采用反应离子刻蚀方法,成功制作了非球面 MEMS 微透镜,其表面粗糙度达到了 25nm 的水平^[2].研究表明,通过该技术可以快速获取通光孔径在厘米和毫米量级,具有球面及非球面轮廓的凸或凹折射透镜,并且非球面度可以在很宽的范围内调节.上述这些工作均基于美国新墨西哥大学 Kendall 教授等所发展的通过 KOH:H₂O 的化学腐蚀作用在{100}晶向的硅单晶材料表面制备凹折射微透镜结构这一技术^[3].

随着衍射微光学理论和实验技术的迅速发展,迄今为止,衍射微光学元件已获得广泛应用,以早期的二元微光学结构,近些年发展起来的基本相位结构基于衍射积分算法生成和调控的高性能衍射元件等为典型代表^[4-7].现代衍射微光学结构所具有的高效光束整形、聚焦和准直效能;可以依据算法对构成衍射元件的大量基本相位结构,进行空间排布和结构特征等的精细设计和调控;以波前为基础的光学变换特性等,为基于现代衍射微光学结构,发展高性能的 DVD 光学头物镜奠定了基础.

鉴于国外在上述技术层面上所呈现的发展趋势,我们与国外同步研究发展,发展了采用标准微电子工艺,低成本快速制作原理性的 DVD 衍射光学头物镜技术.初步研究结果显示,该方法具有衍射光

* 湖北省自然科学基金,控制与仿真技术国防科技重点实验室基金和航天创新技术基金资助项目

† 通信作者,Email: x_yzhang@yahoo.com.cn

2007-04-05 收到,2007-04-18 定稿

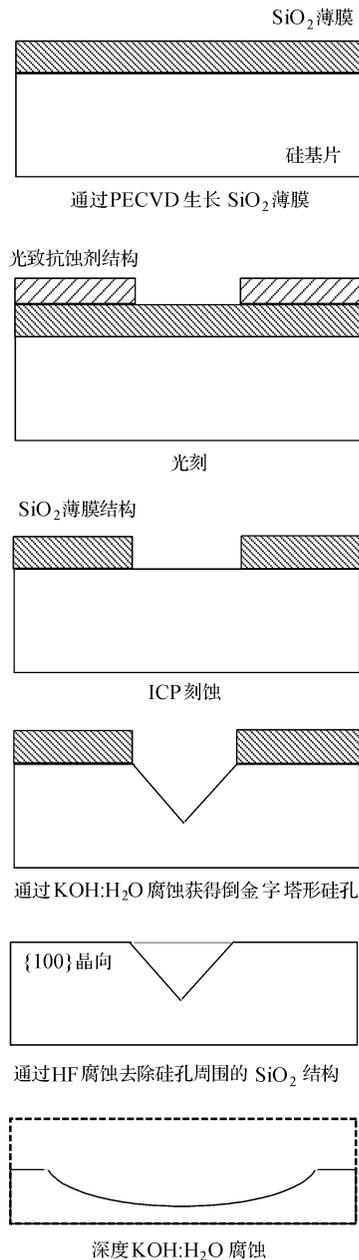


图1 在{100}晶向的硅片上通过 KOH : H₂O 腐蚀制作硅微结构

Fig.1 Silicon micro-structures over {100} silicon wafer fabricated by KOH : H₂O etching

学结构的表面粗糙度可达纳米量级,大量基本相位结构可以根据需求灵活设计与调控,适用于红光和蓝光等特点.

2 高性能衍射微透镜

2.1 单步光刻与湿法化学腐蚀工艺

在硅基片上制作高性能衍射微透镜的工艺流程见图1.如图所示,主要工艺步骤包括在{100}晶向

的硅基片上,通过 PECVD 方法生长 SiO₂ 薄膜;经紫外光刻以及 ICP 刻蚀,形成将大量硅结构裸露出来的微孔所组成的 SiO₂ 薄膜结构,这些微孔的最小结构尺寸在一个微米以上;在所形成的 SiO₂ 薄膜结构保护下,经 KOH : H₂O 腐蚀获得倒金字塔形的硅微孔结构;在此基础上通过 HF 的腐蚀作用将 SiO₂ 薄膜剥离;进一步经 KOH : H₂O 深度腐蚀,最终形成具有多台阶形貌的硅凹衍射微透镜结构.在如上所述的工艺过程中,仅执行了一次光刻操作,硅衍射结构的成形也是在单次 KOH : H₂O 深度化学腐蚀过程中完成.主要工艺参数有:SiO₂ 薄膜的厚度约为 200nm, KOH 溶液的浓度约为 30wt%, HF 腐蚀在室温下进行,通过 KOH 刻蚀形成倒金字塔形微孔结构的温度约为 60℃,形成硅凹微弧形结构的温度约为 80℃.

在中芯国际集成电路(上海)有限公司协助下,我们获得了所需的光刻版.薄膜生长、光刻、ICP 刻蚀和化学腐蚀等工艺,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 Multiplex CVD, ICP 设备是英国 STS 公司的 Multiplex AOE,光刻设备是德国 Suss Microtec 公司的 MA6/BA6 双面对准光刻机.

利用上述工艺制作硅衍射结构的物理基础就是 {100} 晶向的单晶硅材料,在所形成的 SiO₂ 薄膜结构保护下,通过 KOH : H₂O 的各向异性腐蚀特性,形成由四个不同晶向的晶面所组成的倒金字塔形硅微孔结构.在此基础上,进一步通过 KOH : H₂O 对该硅微结构的较长时间的腐蚀作用,就可以形成凹弧状硅图形结构.为了和形成倒金字塔形硅微孔结构的化学腐蚀作用相区别,我们将其称为 KOH : H₂O 的深度化学腐蚀作用.研究显示,结构尺寸不同的倒金字塔形硅微孔结构,经 KOH : H₂O 深度腐蚀所形成的硅凹微结构的孔径、深度和形貌特征等,与 KOH 溶液的浓度、温度以及硅结构本身的材料属性密切相关,详细情形见 Kendall 教授等发表在 Optics Engineering 上的文章^[3].因此,能否获得满足要求的硅衍射图形结构,也就是获得由多个高度各异的平坦等位相面交错排列所构成的功能结构的前提,是将组成衍射结构的大量基本位相结构的参数指标,与实际工艺条件结合起来.在 {100} 晶向的硅基片上,通过排布结构尺寸不同,分布状态各异的倒金字塔形的大量凹孔结构,经深度 KOH : H₂O 腐蚀形成台阶状的衍射微结构的仿真情形如图 2 所示.如图所示,由不同结构尺寸的一类凹球面硅微结构相互套叠后,就可以获得所预期的衍射结构形貌.

制备由类似于上述硅微结构的多个图形单元所组成的衍射台阶结构,首先需要确定其关键性的形

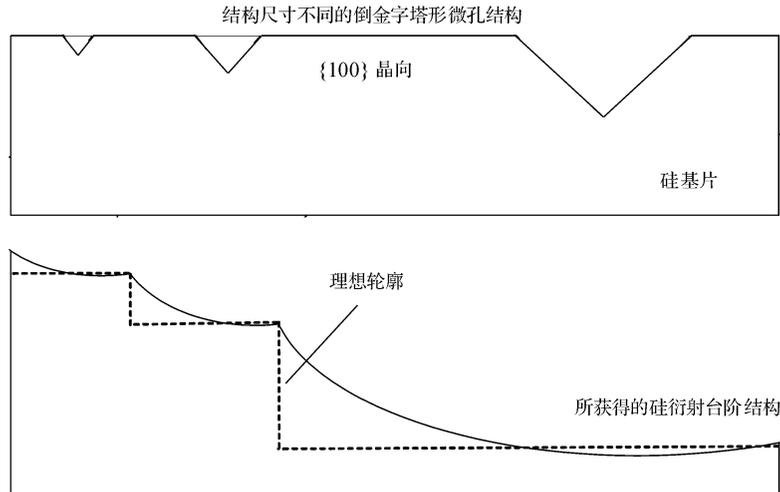


图 2 在 $\{100\}$ 晶向的硅片上制作结构尺寸不同的倒金字塔形的微孔结构后,通过 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 深度腐蚀形成台阶状的硅衍射相位结构

Fig. 2 Silicon diffractive phase structures shaped by $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ etching after fabricating inverse-pyramidal micro-holes with different structural sizes over $\{100\}$ silicon wafer

貌特征和参数指标,如等位相面的高度和面积以及相邻等位相面间的衍射台阶的倾斜程度等.我们所设计的高性能衍射微透镜的位相分布情形见图 3.如图所示,针对 650nm 波长的红光和 405nm 波长的蓝光这两个频谱成份,所设计的衍射微透镜由多个环状位相结构组成.每个衍射位相结构的高度均依照实际需求给定,各衍射位相结构按功能要求排布.

通常情况下,DVD 光学头物镜与盘片间的距离应在毫米甚至微米量级,也就是说 DVD 物镜的焦距应在上述数据所界定的范围内.考虑到我们所发展的是一种全新的衍射微透镜的设计和制备方

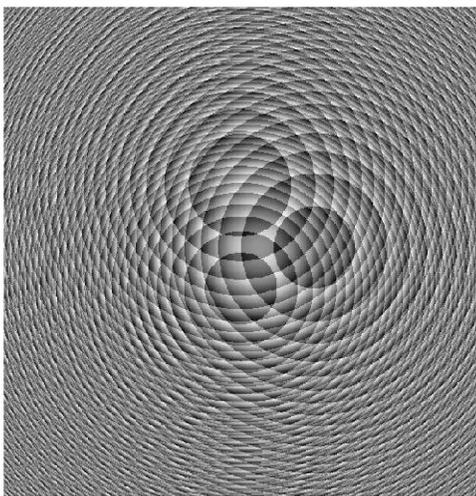


图 3 高性能衍射微透镜相位结构的仿真情形

Fig.3 Simulation of the phase structures of the diffractive microlens with high performance

法,为了在工艺上更易于实现并首先获取高的光学衍射效能,我们将所设计和制作的衍射微透镜的焦距,放大到了厘米量级的远场区域;将所应具有的结构尺寸在纳米量级的倒金字塔形硅微孔结构全部略去,这些纳米微孔结构约占全部硅微孔数量的 30% 左右.这一做法尽管造成了诸如衍射台阶形成了倾斜而非如图所示的理想轮廓所应呈现的陡直情形,微透镜所应具有焦点变成了较大的焦斑,衍射效率也相应降低等现象,但所期望的通过原理性的微光学结构获得高性能的衍射效应这一目的已经达到,从而验证了设计和制备工艺的可行性,为进一步发展可以耦合进 DVD 光学头中的高性能衍射物镜奠定了坚实基础.获取如图 3 所示的衍射位相结构,我们采用了常规的 GS 算法,在首先确定远场焦距和焦斑尺寸的前提下,通过该算法得到了衍射微透镜的相位特征和参数.在此基础上,进一步开展了光刻版图的设计工作.

一般而言,通过 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀所得到的硅结构的表面较为光滑.因此,决定硅衍射结构形貌质量的关键因素是衍射台阶的高度及其倾斜程度,也就是通过结构尺度不同的类圆弧硅图形间的交叉腐蚀,在交错区域内所形成的硅结构的落差以及过渡区域的宽窄等.因此,在设计光刻版图的过程中,通过控制与衍射台阶对应的大量微孔结构的尺寸、分布形态和密度等,就可以控制衍射台阶的高度和倾斜度.见图 4 所示的光刻版图上所标识的宽相位台阶区域,也就是倾斜度较大的衍射台阶,以及窄相位台阶区域,或者相对陡峭的衍射台阶这两种情形.图中所给出的硅微孔结构的尺寸和分布形态较为均匀的区域,对应于 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 化学腐蚀后的等位相

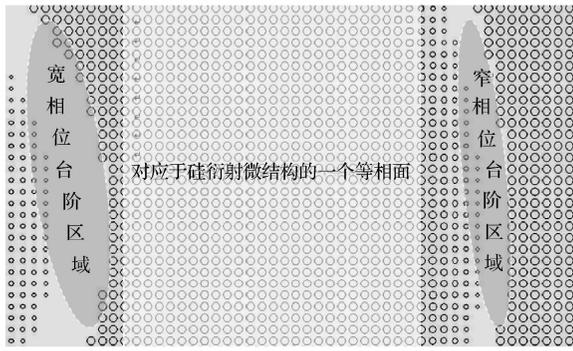


图 4 对应于硅衍射微结构的一个典型等相面及宽度不同的两个相位台阶的光刻版图情形

Fig.4 Mask pattern for one typical phase surface and two phase steps with different widths in silicon diffractive microlens fabricated

面结构.

通过 KOH : H₂O 深度腐蚀所得到的硅衍射微透镜的显微光学照片如图 5 所示. 表面形貌测试表明, 等位相面结构的表面粗糙度在几十纳米的程度, 衍射台阶较为陡峭, 整个器件的表面轮廓清晰完整, 光滑顺畅. 目前, 将倒金字塔形的硅微孔结构的最小尺寸缩小到纳米量级的实验制备工作正在进行.

2.2 光学性能测试

为了检验所制衍射微透镜的远场光学衍射效能, 我们首先将硅衍射图形结构通过电化学方法复制成了镍版. 然后通过压制的办法, 将镍版图形转移或者说复制到了有机玻璃材料上. 通过将波长分别为 650 和 405nm 的连续激光照射到有机玻璃衍射微透镜上, 获得了所需要的衍射出射效果, 所出射的红色和蓝色衍射花样如图 6 所示. 如图所示, 所制衍射微光学结构已成功地对入射高斯光波进行了衍射变换, 两个入射频谱处的衍射花纹细密圆滑, 显

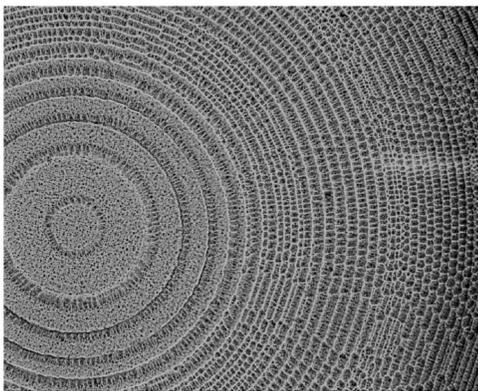


图 5 所制作的硅衍射微透镜局部结构的显微光学照片
Fig.5 Optical micrograph of a part of silicon diffractive microlens structure fabricated

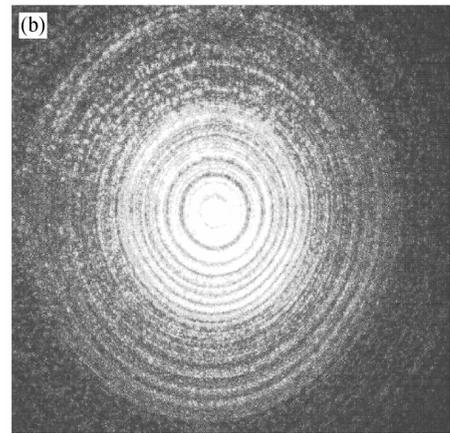
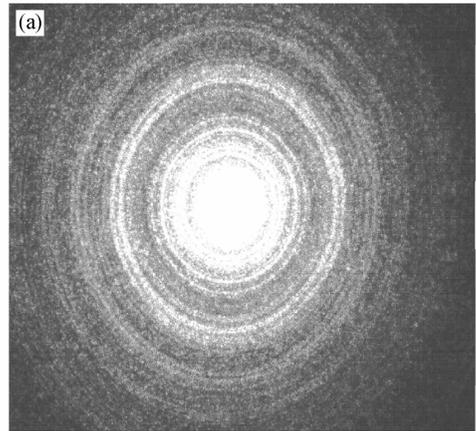


图 6 高斯光束通过制作于有机玻璃材料上的衍射微透镜后的红色和蓝色衍射图案 (a) 650nm; (b) 405nm

Fig.6 Red and blue diffractive patterns generated by Gaussian laser beam out of the diffractive microlens measured (a)650nm; (b)405nm

示了高效率的衍射变换效能. 图中所示的衍射图案, 是直接通过可见光 CCD 相机拍摄衍射屏幕上的衍射图像获得. 屏幕距所测试的衍射微透镜约 80cm, 各衍射图案的直径大于 50cm.

3 结语

通过单步光刻、化学腐蚀工艺以及精细图形结构的压制转移方法, 成功制成了原理性的 DVD 衍射光学头物镜. 表面形貌测试显示了所制微光学结构的良好形貌特征, 常规光学测试给出了预期的远场衍射光学变换效果, 为发展可以实用化的高性能衍射微光学物镜结构奠定了基础. 初步结果显示了该方法具有衍射微光学结构的表面粗糙度可达纳米量级, 大量基本相位结构可以根据需求依算法灵活设计与调控, 适用于红光和蓝光等特点.

参考文献

- [1] De Lima Monteiro D W, Akhzar-Mehr O, Sarro P M, et al. Single-mask microfabrication of aspherical optics using KOH anisotropic etching of Si. *Optics Express*, 2003, 11(18):2244
- [2] Bourouina T, Masuzawa T, Fujita H. The MEMSNAS process; microloading effect for micromachining 3-D structures of nearly all shapes. *J Microelectromech Syst*, 2004, 13(2):190
- [3] Kendall D L, Eaton W P, Manginell R, et al. Micromirror arrays using KOH : H₂O micromachining of silicon for lens templates, geodesic lenses, and other applications. *Optical Engineering*, 1994, 33(11):3578
- [4] Liu J S, Caley A J, Taghizadeh M R. Diffractive optical elements for beam shaping of monochromatic spatially incoherent light. *Applied Optics*, 2006, 45(33):8440
- [5] De Saint Denis R, Passilly N, Laroche M, et al. Beam-shaping longitudinal range of a binary diffractive optical element. *Applied Optics*, 2006, 45(31):8436
- [6] Liu Jinsong, Thomson M, Waddie A J, et al. Design of diffractive optical elements for high-power laser applications. *Optical Engineering*, 2004, 43(11):2541
- [7] Sanner N, Huot N, Audouard E, et al. Programmable focal spot shaping of amplified femtosecond laser pulses. *Optics Letters*, 2005, 30(12):1479

Fabricating High Performance Diffractive Microlens by Single Step Photolithography and Wet Etching*

Zhang Xinyu^{1,†}, Chen Shengbin¹, Ji An³, and Xie Changsheng²

(1 *State Key Laboratory for Multispectral Information Processing Technology, Wuhan National Laboratory for Opto-Electronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*)

(2 *Wuhan State Laboratory of Photoelectricity, Wuhan, 430074, China*)

(3 *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: We discuss a low cost fabrication method of a diffractive microlens with high performance for both blue and red DVD objective lenses, which consists of single-step photolithography and a wet etching process. The surface roughness of the fabricated micro-optics structure is in the nanometer range; The feature height of the diffractive phase step is in the sub-micrometer range; And can be adjusted according to requirements; And the optical aperture of the microlens can be changed from millimeter to centimeter magnitude. A large number of basic phase structures in the diffractive microlens can be set and arranged by a diffractive integrating algorithm according to the appearance and feature parameters of the beam process. Far field optical measurement shows a high diffractive efficiency of the fabricated diffractive structure.

Key words: diffractive microlens with high performance; diffractive integrating algorithm; single step photolithography; wet etching technology; DVD object lens

PACC: 4225F; 4280K; 4285

Article ID: 0253-4177(2007)10-1625-05

* Project supported by the Natural Science Foundation of China, the Foundation of the National Defense Key Laboratory for Control and Simulation Technology, and the Aerospace Innovation Technology Foundation

† Corresponding author. Email: x_yzhang@yahoo.com.cn

Received 5 April 2007, revised manuscript received 18 April 2007