

微透镜阵列反应离子束蚀刻传递研究*

许 乔

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

杨李茗 舒晓武 杨国光

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 提出一种微透镜阵列复制的新方法——反应离子束蚀刻法(RIBE)。它在工作原理和参数控制等方面较传统的蚀刻方法有很大的先进性, 能够实现蚀刻过程的精确控制。本文详细阐述了反应离子束蚀刻过程中蚀刻选择性的控制方法, 通过对各种蚀刻参数的控制, 最终实现了微透镜阵列在硅等红外材料上面形传递的深度蚀刻。口径 $\phi 100 \mu\text{m}$ 的 $F/2$ 微透镜阵列在硅基底上的传递精度达 $1 \cdot 1.03$, 无侧向钻蚀。

关键词 微透镜阵列, 微光学, 干法蚀刻, 反应离子束蚀刻, 制作与测试。

1 引 言

用光刻热熔成型的方法能制作高性能的折射型微透镜阵列。与其它制作方法相比, 它具有工艺简单, 对材料和设备的要求不高, 工艺参数稳定且易于控制等优点, 很适于制作较大相对口径的微透镜。另一方面, 光刻热熔法制作的微透镜与器件材料无关, 只须用所需要的材料作为微透镜的基底, 在其上用热成型的方法获得球冠状的光刻胶体, 再将面形转移到基底上即可。

目前, 各种微透镜阵列(包括折射型和衍射型)的面形复制方法主要分为两类: 一类是将微透镜的面形拷贝成模具, 然后再采用类似铸塑的方法进行生产复制。如电铸^[1]、LIG-A^[2]和溶胶-凝胶^[3]技术等。这些“铸造”式的方法对可见光波段微光学器件的复制是十分有意义的; 另一类复制方法是直接将微透镜的表面形状传递到基底材料上(如图 1 所示), 以离子蚀刻方法为代表, 主要应用于红外器件的制作。

目前, 国际上对微透镜阵列蚀刻传递的研究^[4-7], 一般采用的都是离子铣(IM)和反应离子蚀刻(RIE)技术, 工艺过程中可控参数不多, 对热熔微透镜面形的控制不太有利。因此,

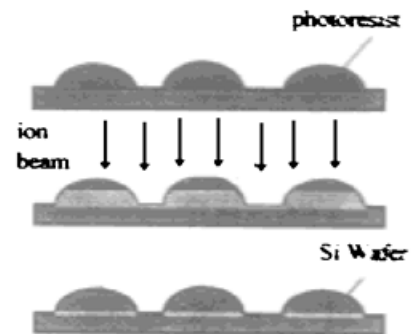


Fig. 1 Schematic representation of transmission of microlens array by ion etching

* 国家科委 863 高技术项目。

收稿日期: 1997-08-28; 收到修改稿日期: 1997-10-29

作者尝试采用一种新方法——反应离子束蚀刻,来实现微透镜阵列(MLA)面形的准确控制。通过对硅片、硫化锌、氟化钡、石英和玻璃等多种基底材料进行蚀刻试验,获得了良好的实验结果:在硅基底上制作了 $F/2$ 的微透镜阵列,蚀刻后单元微透镜的矢高为 $17\ \mu\text{m}$,光刻胶和硅基底的纵向蚀刻速率比为 $1:1.03$,横向蚀刻接近于零。

2 反应离子束蚀刻技术研究

反应离子束蚀刻方法采用离子轰击溅射和化学反应相结合的原理,用化学反应性气体离子束进行蚀刻。根据所要蚀刻的材料选择某种气体或混合气体进入离子源放电室离化,经离子光学系统成为离子束。反应气体离子束轰击材料除了直接溅射外,同时与表面受轰击原子起化学反应,形成蚀刻产物脱离材料表面。在反应离子束蚀刻过程中,离子束的定向轰击一方面给离子与材料原子的化学反应带来了相当好的方向性,使其具有较高的各向异性能力;另一方面吸附气体与表面材料的化学反应使蚀刻速率成倍地提高。因此,化学功能赋予反应离子束蚀刻两个显著的特点:一是成倍地提高了蚀刻速率;二是带来了优良的选择性。

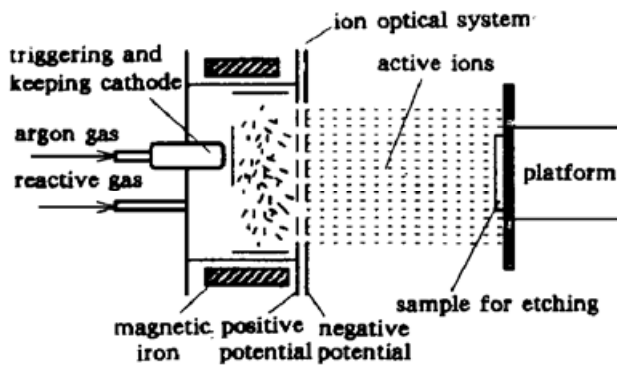


Fig. 2 Schematic diagram of RIBE system

在实现热熔微透镜阵列的面形传递时,作者采用了 LF-RIBE 型反应离子束蚀刻机作为微透镜面形传递的蚀刻设备,整机的工作原理如图 2 所示。这种反应离子束蚀刻具有蚀刻速率快、选择性好的特点,而且没有再沉积现象。产生离子的离子源与安装样品的工件台分开,其蚀刻参数(如离子能量、离子密度、离子入射角等)均能在宽范围内独立调节,准确控制,能灵活地配置成各种工艺过程,选择最佳蚀刻工艺。

整套设备的性能指标为:

- 1) 离子源束流密度: $0.1\ \text{mA}/\text{cm}^2 \sim 1\ \text{mA}/\text{cm}^2$, 束能量稳定度: $\pm 2\% / \text{h}$;
- 2) 离子源束径有效面积: $\phi 150\ \text{mm}$, 离子束均匀性: $\pm 5\%$, 工件台旋转时可达到 $\pm 2\%$;
- 3) 采用触持阴极, 功耗低、稳定、离子轰击不需加热、蚀刻温度低于 80°C 、可保证长时间连续工作;
- 4) 可同时充入 4 路反应气体, 灵活选择各种最佳蚀刻条件。

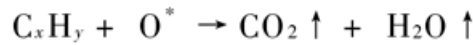
3 微透镜阵列的面形传递

利用离子束蚀刻的方法来实现微透镜阵列的面形传递,其工艺过程控制与传统的光刻蚀刻过程不同。传统的蚀刻工艺以光刻胶或金属薄层为掩膜对基底材料进行蚀刻,要求掩膜材料的蚀刻速率低,以保证将二维掩膜图形转移到基底材料上形成三维微结构。而微透镜阵列的面形传递要求光刻胶与基底材料具有相同或接近的蚀刻速率,使微透镜的球面面形无失真地传递到基底上。因此,微透镜阵列反应离子束蚀刻过程控制的目的是使光刻胶与基底的蚀刻速率比接近 $1:1$,且横向无钻蚀、扩蚀现象。

对反应离子束蚀刻进行的实验表明,影响样品蚀刻速率的主要因素有:离子束束流密度、离子入射能量和入射角度、以及反应气体引起的化学蚀刻机理;影响样品蚀刻质量的主

要参数是离子束均匀性及离子蚀刻的温度效应。在对蚀刻速率产生影响的几个蚀刻参数中,反应气体对不同的蚀刻材料是敏感的,这使蚀刻过程具有较强的材料选择性,基底和光刻胶蚀刻速率的差异主要是由此产生的。而其它参数对蚀刻速率产生的影响虽然存在差异,但是不会有很大的差别。因此微透镜阵列的反应离子束蚀刻实际上是解决蚀刻选择性问题,关键就是通过对反应气体的选择控制实现蚀刻过程的无差异性。下面将就微透镜阵列面形传递的 1·1 蚀刻选择方法进行阐述:

首先考虑光刻胶的蚀刻过程。在通 Ar 气的离子铣纯物理溅射和通 CF_4 的反应离子束蚀刻中,光刻胶 AZ4620 的蚀刻速率均小于 15 nm/min (蚀刻条件:束流密度 1 A/cm^2 ,离子能量 500 eV),很难蚀刻。这就是在传统集成电路制造工艺中光刻胶被广泛地用作掩膜材料的原因之一。众所周知,光刻胶是一种大分子聚合物,可以认为它的分子式为 C_xH_y 。考虑通入反应气体氧气后,氧气经离化形成活性离子 O^* ,对光刻胶产生如下的氧化分解反应:



这样大分子的光刻胶就生成挥发性气体 CO_2 和 H_2O 脱离表面,从而达到剥离材料表面原子的目的。对光刻胶的蚀刻试验证明了以上预期的蚀刻结果:通入氧气后光刻胶的蚀刻速率大大提高,AZ4620 的蚀刻速率 V_{ER} 与氧气流量的关系曲线如图 3 所示,蚀刻条件为:束流密度 1 A/cm^2 ,离子能量 500 eV ,总气体流量为 $3.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。

对硅进行类似的反应离子束蚀刻过程分析,可得到以下结论:用含 F 和 Cl 的气体对硅进行蚀刻,生成 SiCl_4 和 SiF_4 ,很容易挥发脱离基片表面。使用含碳气体蚀刻时,会在蚀刻样品表面形成一层稳定的碳膜,从而阻滞蚀刻过程的进行。为解决碳膜覆盖的问题,通入一定量的氧气或氢气,与 C 反应生成 CO 、 CO_2 或碳氢化合物气体,从而改善 Si 的蚀刻速率。

基于以上对光刻胶和硅蚀刻速率的单独分析,采用如下的方法确定满足蚀刻速率比 1·1 的工艺参数:首先确定对应于光刻胶最大蚀刻速率的氧气通量,固定此条件,然后改变 CF_4 的通入量,确定 Si 的不同蚀刻速率,找到两者的蚀刻速率相同点。此点对应的蚀刻条件就是微透镜阵列面形传递的最佳工艺参数。图 4 是在不同 CF_4 流量下 AZ4620 与 Si 的蚀刻速率变化曲线(蚀刻条件为:束流密度 1 A/cm^2 ,离子能量 500 eV ,总气体流量为 $3.5 \text{ cm}^3/\text{min}$,氧气流量为 $0.42 \text{ cm}^3/\text{min}$),图中两条曲线的交叉点就是满足 1·1 传递的蚀刻条件,称之为平衡点条件。在此蚀刻条件下就能实现微透镜阵列的 1·1 面形传递。

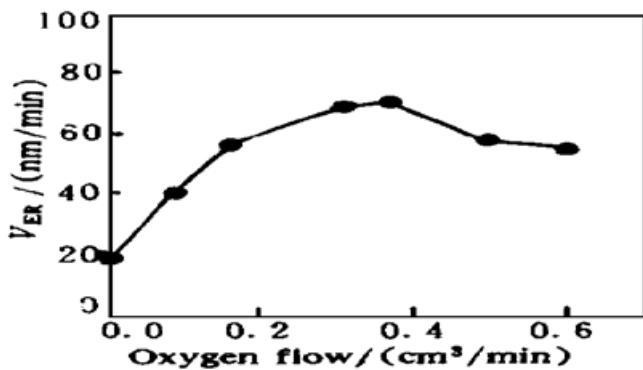


Fig. 3 The AZ4620's V_{ER} versus O_2 flow

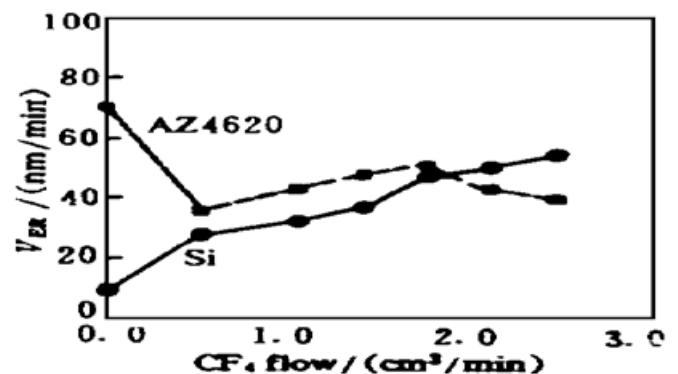


Fig. 4 The V_{ER} of AZ4620 and Si versus CF_4 flow

4 实验结果

采用图 4 中平衡点的蚀刻条件进行微透镜阵列的面形传递, 蚀刻前单元微透镜的矢高为 $16.5 \mu\text{m}$, 光刻胶球面面形轮廓如图 5(a) 所示; 经过反应离子束蚀刻后, Si 片上微透镜的面形轮廓如图 5(b) 所示, 图 5(c) 是蚀刻后微透镜面型与标准球面面形的偏差。以上对微透镜表面面形的测试, 采用了美国 Dektak III 型表面轮廓仪进行表面接触测试。对微透镜矢高的最终测量结果为 $17.0 \mu\text{m}$, 光刻胶与硅的蚀刻速率比为 $1:1.03$, 基本上完成了微透镜面型的 $1:1$ 复制, 而且无侧向钻蚀, 因此蚀刻结果是令人满意的, 图 6 是硅片上的微透镜阵列的扫描电子显微镜图像。

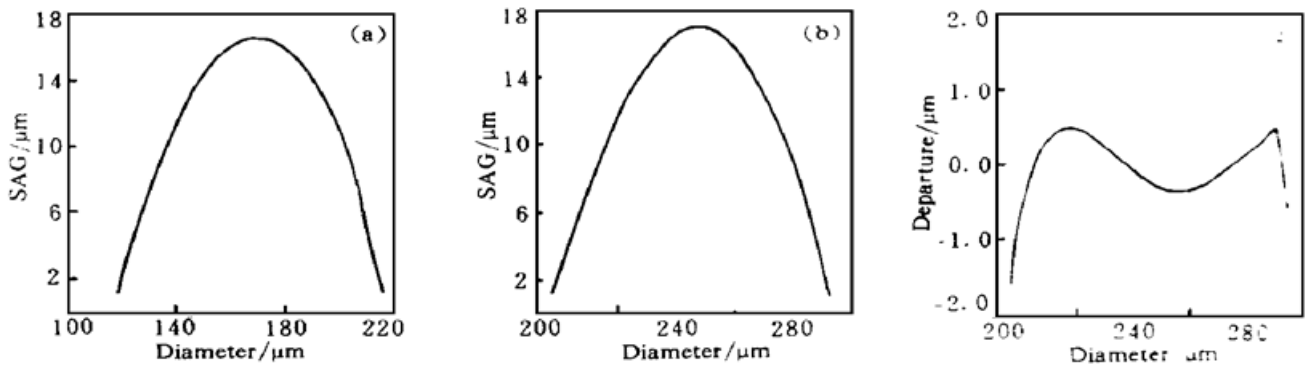


Fig. 5 The experimental result of the transmission of microlens by RIBE; (a) Original profile of microlens; (b) Profile of microlens after being etched; (c) Departure of microlens' profile from standard sphere

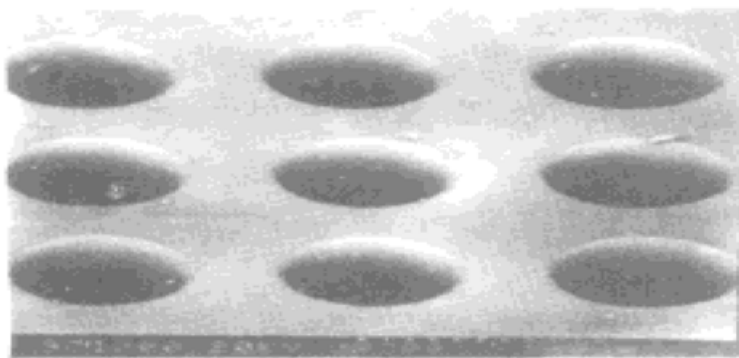


Fig. 6 SEM (scanning electron microscopy) photograph of microlens array in Si wafer

从试验结果看, 反应离子束蚀刻方法较精确地实现了光刻胶微透镜面形在 Si 基底上的 $1:1$ 传递, 而且没有引入明显的面形误差; 另一方面, 反应离子束蚀刻过程中离子束具有较好的均匀性, 能够保证微透镜阵列的均匀性。在整个光刻热熔和反应离子束蚀刻过程中, 蚀刻的均匀性对微透镜阵列一致性的影响比较严重: 光刻热熔后阵列的均匀性误差小于 0.7% , 而反应离子束蚀刻的误差在 2% 左右。所以改善离子束的均匀性应该成为提高微透镜阵列均匀性的主要手段, 这也是需要进一步改进的工作。

结 论 反应离子束刻蚀是一种比较新的工艺技术, 作者所研制、使用的冷源反应离子束刻蚀设备, 离子源的有效面积可达直径 150 mm , 样品刻蚀温度低于 80°C , 采用光学干涉结合蚀刻时间控制的方法, 对刻蚀深度进行实时控制, 控制精度目前已达到 $0.01 \mu\text{m}$ 。此反应离子束刻蚀设备具有高稳定度、高精度控制、刻蚀面积大、可长时间连续工作的特点, 完全适用于各种微光学器件的加工。

用反应离子束蚀刻进行微透镜阵列的面形传递, 具有刻蚀速度快、选择性好的特点。其刻蚀参数均能在宽范围内独立调节, 准确控制, 因此能灵活地配置成各种工艺过程, 选择最佳刻蚀工艺。在微透镜阵列面形传递这一特殊蚀刻背景中, 反应气体的选择性对最终的蚀刻

结果产生决定性的影响。对两种蚀刻状况差别较大的材料(如光刻胶和硅)进行蚀刻时,要获得 1·1 的蚀刻速率,关键在于恰当地选择好反应气体及其流量。用这套微细加工方法获得的微透镜阵列,不仅单元光学特性优良,而且具有很好的阵列均匀性。

参 考 文 献

- [1] J. Jahns, K-H. Brenner, W. Daschner *et al.*, Replication of diffractive microoptical elements using a PMMA molding technique. *Optik*, 1992, **89**(3) : 98~ 103
- [2] A. Rogner, W. Ehrfeld, Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural height by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic molding (LIGA process). *Microelectron. Engng.*, 1986, **4**(1) : 35~ 56
- [3] Sumio, Current status of the preparation of optical solids by the sol-gel method. *Proc. SPIE*, 1992, **1758** : 2~ 13
- [4] M. B. Stern, T. R. Jay, Dry etching for coherent refractive microlens arrays. *Opt. Engng.*, 1994, **33** (11) : 3547~ 3551
- [5] D. L. Kendall, G. R. de Guet, S. Guel-Sadovel *et al.*, Chemically etched micromirrors in silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(10) : 836~ 837
- [6] H. Jerominek, Jin Pan, Laser-assisted deposition and etching of silicon for fabrication of refractive and diffractive optical elements. *Proc. SPIE*, 1993, **2045** : 194~ 204
- [7] N. T. Gordon, C. L. Jones, D. J. Purdy, Application of microlenses to infrared detector arrays. *Infrared Phys.*, 1991, **31**(6) : 599~ 605

Transmission of Refractive Microlens Array by Reactive Ion Beam Etching

Xu Qiao

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041)

Yang Liming Shu Xiaowu Yang Guoguang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 28 August 1997; revised 29 October 1997)

Abstract The results on fabrication of refractive microlens arrays using heat-forming and reactive ion beam etching (RIBE) techniques are presented. RIBE, with high etching rate and flexible etching ability, is a novel dry etching technique for manufacturing micro-optical element. The principle of the method and the controlling of etching selectivity are described. In experimetns, we have fabricated $F/2$ microlens array with 100 μm diameter in the surface of silicon. An accurate control of etching rate ratio between positive photoresist and silicon was obtained by adjusting multiple etching parameters. The measurement of microlenses showed that the lenslet profile was very close to the standard spherical surface profile. The duplicating ratio is 1·1.03.

Key words micro-optics, microlens array, dry etching techniques, reactive ion beam etching techniques, fabrication and measurement.