

利用(110) 硅片制作体硅微光开关的工艺研究*

张 龙 董 玮 张 欣 东 刘 彩 霞 陈 维 友 徐 宝 珂

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130023)

摘要: 采用基于湿法腐蚀工艺的体硅微机械加工方法, 利用(110) 硅片结晶学特性, 通过光刻、反应离子刻蚀和湿法刻蚀等工艺, 在硅片上同时制作出微光开关的微反射镜结构、悬臂梁结构、扭臂梁结构和光纤定位槽结构, 器件的一致性好, 制作工艺简单。利用扇形定位区域, 精确地沿(110) 硅片的{111}面进行定向腐蚀, 可使微反射镜镜面垂直度达到 $90 \pm 0.3^\circ$, 经测量表面粗糙度低于 6nm。

关键词: 微反射镜; {111}面; 湿法腐蚀; 粗糙度; 氢氧化钾溶液

EEACC: 2560Z; 4190; 4250

中图分类号: TN 25; TN 929.11

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)01-0099-05

1 引言

随着光纤通信技术的发展和密集波分复用(DWDM) 系统的应用, 全光交换已经成为一种趋势, 光开关是实现全光交换的关键器件, 它可以实现全光层的路由选择、波长选择、光交叉连接、自愈保护等功能。MEMS 光开关由于具有插入损耗和串话小、消光比高、便于集成、透明性和可扩展性好等一系列优点, 将成为光交换器件的主流^[1]。实现 MEMS 光开关的开关功能的方法有: 光路遮挡、微反射镜移动或转动改变光的传输方向、微透镜移动改变光传输方向、改变全反射条件等, 其中微反射镜移动或转动改变光的传输方向是目前应用最多的工作方式。微反射镜的制作可采用体硅微机械加工工艺和表面微机械加工工艺两种方法。体硅微机械加工工艺分为干法刻蚀和湿法刻蚀^[2~4], 干法刻蚀工艺主要是用 DRIE(深层反应离子刻蚀) 或 ICP(感应耦合等离子体) 在硅衬底上刻蚀出微反射镜, 一般对设备的要求较高, 制作成本较高。湿法腐蚀通常是使用 KOH 或 EDP 溶液对硅进行各向异性腐蚀, 依靠

晶向间的关系腐蚀出微反射镜, 工艺简单, 适于大规模生产。

本文介绍了一种基于硅湿法定向刻蚀工艺的新型体硅微光开关结构, 它由微反射镜、悬臂梁、扭臂梁、光纤定位槽和由(110) 硅片制作的倾斜下电极板组成, 采用静电驱动^[5~7], 结构与制作工艺简单, 预计开关时间小于 10ms。它由光纤定位槽完成光纤自定位保持, 便于做成光开关阵列, 插入损耗小, 路间串音衰减大, 并可以同时工作在不同波长下。

微镜型光开关性能的好坏主要取决于其微反射镜的制作工艺与精确校准各输入光纤与输出光纤的平行度。因此本文着重介绍了一种新的制作微反射镜的工艺。它利用(110) 硅片结晶学特征, 在一定浓度的氢氧化钾水溶液中通过各向异性腐蚀, 得到表面光滑的微反射镜镜面, 经测量可知, 镜面的垂直度达到 $90 \pm 0.3^\circ$, 表面粗糙度低于 6nm, 蒸金后其反射率可达 98%, 大大提高了光开关的性能。

2 基本原理

本文所介绍的体硅微光开关采用静电驱动, 通

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA312023), 国家自然科学基金(批准号: 69937010), 吉林省科学计划(批准号: 20010319) 和跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目

张 龙 男, 1977 年出生, 硕士研究生, 从事微光机电系统研究(MOEMS)。

董 玮 女, 1973 年出生, 博士研究生, 从事微光机电系统研究(MOEMS)。

2002-11-20 收到, 2003-04-12 定稿

©2004 中国电子学会

过悬臂梁(上电极板)带动微反射镜上下移动, 对来自光纤定位槽的光路进行遮挡, 实现光开关的功能, 其结构如图 1 所示。微反射镜、悬臂和扭臂均由(110) 硅片经各向异性腐蚀而成、且为一体, 其所暴露的面全是{111} 晶面, 相邻两个{111} 面的夹角为 70.53° 。

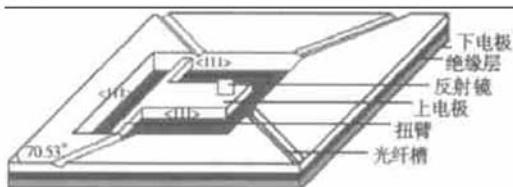


图 1 微光开关结构示意图

Fig. 1 Schematic of micro-mechanical switch

在一定浓度的氢氧化钾溶液中(35wt\% ~ 50wt\%), 硅的{110}面与{111}面的腐蚀速度比近似为 $140:1^{[8]}$, 由结晶学可知, 在(110) 硅片上有四个{111}晶面与硅片表面垂直, 这四个{111}晶面两两平行, 彼此间成 70.53° ^[9] 的夹角。因此利用(110) 硅片的这一特性, 通过各向异性腐蚀的方法可制作 $150\mu\text{m}$ 高的微反射镜, 其侧向腐蚀可忽略, 镜面垂直度高, 表面光滑, 且结构尺寸容易控制。

根据(110) 硅片结晶学特征, 刻蚀图形的方位若与晶体内部的{111}面方向有偏差, 刻蚀图形的侧壁上将产生许多由小的{111}面形成的台阶, 如图 2 所示。

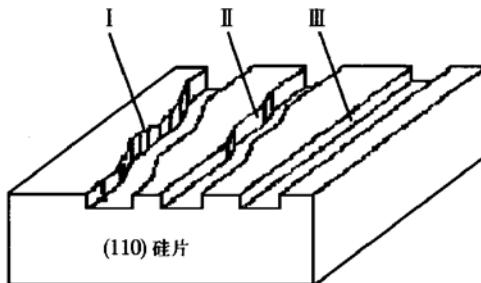


图 2 晶相对准与刻蚀槽的关系

Fig. 2 Relationship of crystal alignment and etching slots

刻蚀槽侧壁 I 的台阶较多, 这是因为刻蚀槽壁的方位和{111}面方向相差较多, 暴露的{111}面不在同一平面上; 刻蚀槽侧壁 II 的台阶比侧壁 I 的少, 表明刻蚀槽壁的方位与{111}面方向比较接近; 刻蚀槽侧壁 III 的方向为精确的{111}面方向, 因此表面非常平整, 没有台阶, 暴露的{111}面在同一个平面上。因此利用(110) 硅片的各向异性腐蚀特征, 成功地定

向刻蚀出表面平整的微反射镜及形状规整、尺寸精确的扭臂、悬臂等一系列微光开关的各部件的技术关键, 是要设法实现在刻蚀工艺中将需加工的微机械图形的定位取向与(110) 硅片内的{111}面方向精确对准。本文通过对硅片进行预腐蚀, 利用扇形定位图形的方法很好地解决了上述取向对准问题。具体操作方法在本文的实验内容部分给予介绍。

3 制作工艺流程

本文设计的微光开关加工工艺, 主要通过两次湿法定向刻蚀工艺完成。其中微反射镜、悬臂梁、扭臂梁和光纤定位槽结构在第二次湿法腐蚀中同时形成, 且为一体, 设计新颖, 工艺简单, 大大提高了光开关的性能并降低了制作成本, 其制作工艺流程如图 3 所示: (1) 在双面抛光的(110) 硅片上用低压化学气相沉积(LPCVD) 的方法生长一层氮化硅(Si_3N_4) 掩膜; (2) 经过光刻和反应离子刻蚀工艺, 在氮化硅(Si_3N_4) 掩膜上刻出悬臂和扭臂形状; (3) 通过第一次湿法腐蚀工艺, 在硅片上腐蚀出 $10\mu\text{m}$ (悬臂梁与扭臂梁的厚度)深的槽; (4) 再通过光刻和反应离子刻蚀工艺除去多余的氮化硅(Si_3N_4) 掩膜, 刻蚀出微反射镜的图形; (5) 经过第二次湿法腐蚀, 可同时制作出微反射镜、悬臂梁、扭臂梁和光纤定位槽结构。

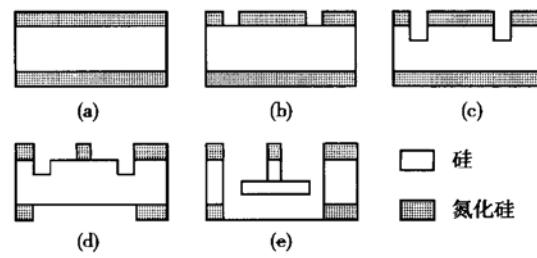


图 3 制作工艺流程图

Fig. 3 Processes of fabrication technology

4 实验内容

若光刻图形未能与(110) 硅片垂直位置的{111}面精确对准时, 在其后的定向腐蚀操作中, 刻蚀槽壁上将形成由一系列{111}晶面构成的台阶, 如图 4 所示。实验表明, 腐蚀方向与晶体内部{111}面方向的误差夹角大于 0.2° 时, 就会产生台阶状的侧表面。因此要制作无台阶的、平整的微反射镜表面, 腐蚀时对准的精度应小于 0.2° , 这在工艺上的难度是相当大

的。即使采用 X 光定向仪测量晶向, 实现 0.2° 对准也是相当困难的, 且无法实现在光刻对准时 X 光的实时原位定向。为解决这一技术难题, 我们对硅片采用预腐蚀定位法, 通过光刻和反应离子刻蚀等工艺去掉硅片上的部分氮化硅掩膜, 在硅片上沿解理面方向制作一个扇形定位区域, 该区域由 60 个 $2000\mu\text{m}$ 长, $10\mu\text{m}$ 宽的小矩形构成, 相邻两个矩形条中心线夹角为 0.2° , 示意图如图 5 所示。再经过对硅片进行湿法腐蚀, 与 $\{111\}$ 晶面有较大偏角的、表面长有氮化硅掩膜的小矩形条被完全或部分地侧蚀掉, 与 $\{111\}$ 晶面方向接近的、表面长有氮化硅掩膜的小矩形条被侧蚀的较小, 在显微镜中可观测到完全没有被侧蚀的、表面长有氮化硅的小矩形条, 它所暴露出的晶面即是精确的 $\{111\}$ 面, 其结构如图 6 所示。

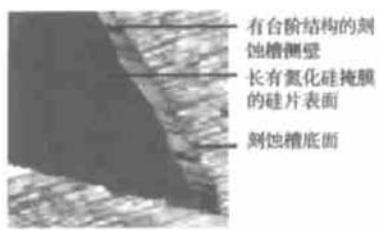


图 4 具有台阶结构的晶面

Fig. 4 Crystal side of edge

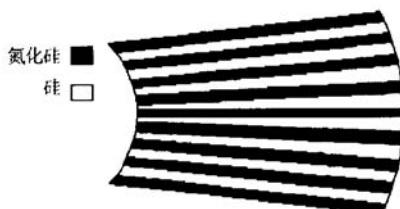


图 5 扇形定位图形示意图

Fig. 5 Sketch of sector orientation



图 6 预腐蚀扇形定位结构

Fig. 6 Advanced etching sector oriented structure (SEM)

精确地找到 (110) 硅片上的 $\{111\}$ 晶面后, 沿该面指示出的方向进行预加工图形的精确对准, 通过光刻、反应离子刻蚀和第一次湿法腐蚀等工艺, 可在硅片上做出微光开关的悬臂与扭臂形状(如图 7), 再经过第二次光刻、反应离子刻蚀和湿法腐蚀工艺, 便可同时制作出一体的微光开关结构, 它包括悬臂结构、扭臂结构、光纤定位槽结构及微反射镜结构(如图 8)。其中两根光纤定位槽夹角为 38.94° , 沿 $\{111\}$ 面所示方位进行腐蚀的定位槽是矩形槽, 沿与 $\{111\}$ 面成 38.94° 的方位进行腐蚀的定位槽由于侧向腐蚀的产生, 最终为倒梯形槽。通过调节定位槽掩膜的宽度, 使每个定位槽均能完全容纳一根单模光纤, 从而实现光纤的自对准。

悬臂与扭臂之间的夹角为 70.53° , 由于硅晶体的腐蚀特征, 悬臂前端和悬臂与扭臂之间产生了不同程度的削角现象(如图 7 和图 8)。通过合理地设计器件尺寸, 可避免削角现象对开关结构带来的影响。作为决定微光开关主要性能指标的微反射镜结构(如图 9), 在第二次湿法腐蚀中一次形成, 微反射镜长 $200\mu\text{m}$ 、宽 $3\mu\text{m}$ 、高 $150\mu\text{m}$, 微反射镜镜面是 (110) 硅片的 $\{111\}$ 面, 根据结晶学特征, 其垂直度好, 表面光滑平整, 在上面蒸上金属层后可获得高的反射率。

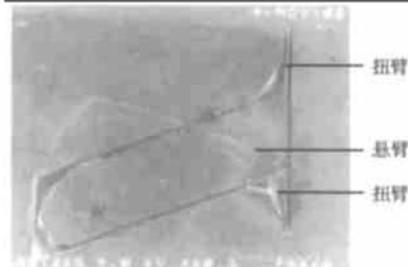


图 7 光开关的悬臂与扭臂结构

Fig. 7 Cantilever and torsion balance structure (SEM)

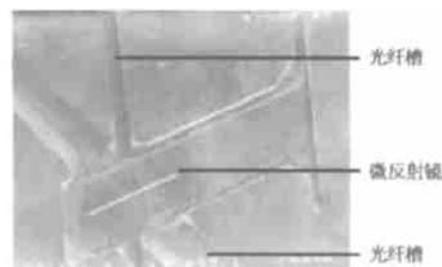


图 8 微光开关结构

Fig. 8 Structure of micro-optical switch (SEM)

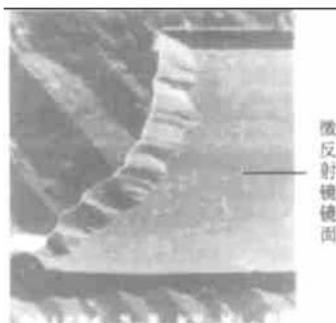


图 9 微反射镜结构

Fig. 9 Structure of micro-mirror (SEM)

5 测量

微反射镜的结构优良,通过测量可知,其镜面垂直度达到 $90 \pm 0.3^\circ$,通过原子力显微镜观察其表面(如图 10),可知其表面粗糙度低于6nm。在上面蒸发一层金后,可用作理想的微反射镜镜面,经测量其反射率高达98%。

6 结论

在微反射镜移动或转动改变光传输方向的微光开关中,微反射镜的结构很大程度上决定了微光开关的性能。利用表面微机械工艺制作的微反射镜大多采用铰链结构,通过多次薄膜生长和腐蚀等工艺,释放掉牺牲层,得到有效结构。这种方法制作出的微反射镜需要组装成三维结构,而且在镜面材料层沉积过程中有残余应力存在,使得镜面的平整性不易控制,制作工艺十分复杂^[10~13]。本文提出的利用(110)硅片通过定向腐蚀工艺制作的体硅微机械光开关,结构简单新颖,只需腐蚀工艺便可制作出反射率高的微反射镜,镜面结构尺寸容易控制,垂直度达到 $90 \pm 0.3^\circ$,表面平整,其粗糙度低于6nm,反射率高达98%,大大减小了插入损耗,而且由于制作工艺简单,光纤定位槽与微反射镜同时生成,能进行自对准,适用于大规模光开关阵列中。

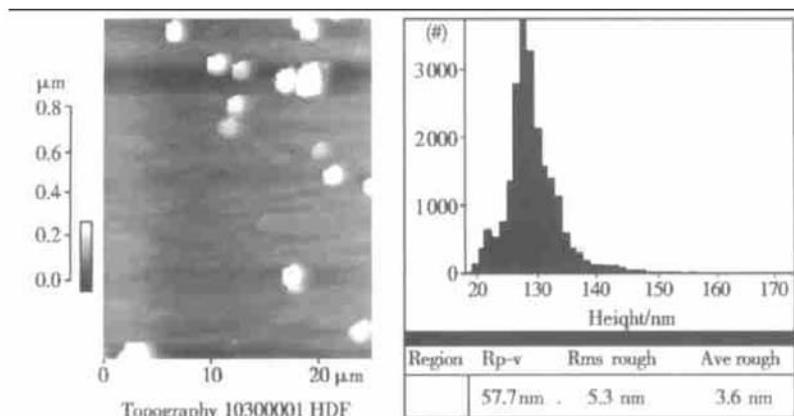


图 10 表面粗糙度图谱

Fig. 10 Surface roughness of micro-mirror (AFM)

参考文献

- [1] Hecht J. All-optical networks need optical switches. *Laser Focus World*. 2000, 18(5): 174
- [2] Marxer C, Nicolaas F. Micro-opto-mechanical 2×2 switch for single-mode fibers based on plasma-etched silicon mirror and electrostatic actuation. *Lightwave Technology*, 1999, 17(1): 2
- [3] Maeloba H, Helin P. Self-aligned vertical mirror and V-grooves applied to an optical-switch: modeling and optimization of bi-stable operation by electromagnetic actuation. *Sensors and Actuators A*, 2001, 87: 172
- [4] Mita M, Miyauchi D, Toshiyoshi H. An out-of-plane polysili-

con actuator with a smooth vertical mirror for optical fibers switch application. *Proc of IEEE MEMS*, 1998: 33

- [5] Xu Yang, Wu Jihong, Liu Litian. Design and fabrication of a F-P optical switch based on MOEMS technology. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(8): 841(in Chinese) [徐杨, 吴霁虹, 刘理天, 等. 基于 MOEMS 技术的一种 F-P 光开关的设计与制作. 半导体学报, 2002, 23(8): 841]
- [6] Zhang Zhengyuan, Wen Zhiyu, Xu Shiliu. Poly-silicon micro-machined switch. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(9): 915
- [7] Wu Wengang, Hao Yilong, Li Dachao. Fabrication and electromechanical characteristics of 2×2 torsion-mirror optical switch arrays with monolithically integrated fiber self-hold-

- ing structures. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23 (10): 1025
- [8] Uenishi Y, Tsugai M. Micro-opto-mechanical devices fabricated by anisotropic etching of (110) silicon. J Micromech Microeng, 1995, 5: 305
- [9] Sawada R, Higurashi E. Silicon (110) grid for ion beam processing systems. J Micromech Microeng, 2001, 11(5): 561
- [10] Lee S, Lin L Y, Wu M C. Realization of FDDI optical bypass switches using surface micromachining technology. Proc of SPIE, 2000, 2641: 41
- [11] Toshiyoshi, Fujita H. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix. Microelectromechanical System, 1998, 5(4): 232
- [12] Lee S S, Lin L Y, Huang L S. Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors. Lightwave Technology, 2000, 7(1): 7
- [13] Lin L Y, Tkach R W. On the expandability of free-space micromachined optical cross connects. Lightwave Technology, 2000, 18(4): 482

Fabrication Technique of Bulk-Silicon Micro-Optical Switch in (110) Silicon^{*}

Zhang Long, Dong Wei, Zhang Xindong, Liu Caixia, Chen Weiyu and Xu Baokun

(Jilin University Region, State Key Laboratory on Integrated Opto-Electronics, Changchun 130023, China)

Abstract: Using bulk-silicon micro-mechanical technique by crystal characters of (110) silicon, in which photolithography, reaction ion etching, and wet-etching technique are included, micro-mirror, cantilever beam, torsion beam, and fiber orientation slots are fabricated simultaneously on (110) silicon. Therefore, the consistency of the device is very good and the fabrication technique is very easy. By advanced etching sector orientation structure, it can be accurately etched along the {111} sides of silicon in KOH solution. So the perfect mirror is got, and its surface roughness is less than 6nm, and its perpendicularity is 90 ± 0.3°.

Key words: micro-mirror; {111} side; wet-etching; roughness; KOH solution

EEACC: 2560Z; 4190; 4250

Article ID: 0253-4177(2004)01-0099-05

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA312023), National Natural Science Foundation of China (No. 69937010), Science Plan of Jilin Province, and Foundation for Excellent Scientist Going Beyond the Century

Zhang Long male, was born in 1977, Master candidate. He is engaged in the research on MOEMS.

Dong Wei female, was born in 1973, PhD candidate. She is engaged in the research on MOEMS.

Received 20 November 2002, revised manuscript received 12 April 2003

© 2004 The Chinese Institute of Electronics