

硅微通道板电子倍增器

端木庆铎, 李 野, 卢耀华, 姜德龙, 但唐仁, 高延军, 富丽晨, 田景全

(长春光学精密机械学院, 吉林长春 130022)

摘 要: 本文采用感应耦合等离子体刻蚀机 (ICP) 和低压化学气相淀积 (LPCVD) 技术制备了硅微孔阵列和连续打拿极, 得到具有一定性能的硅微通道板. 同时分析讨论了微孔阵列的表面形貌、反应离子刻蚀的尺寸效应以及电子增益系数等问题. 与传统工艺相比, 新工艺将微通道板基体材料与打拿极材料的选择分开、微孔阵列形成和连续打拿极制作过程分开, 以 MCP 性能的突破找到了新途径.

关键词: 硅; 微通道板; 长径比; 打拿极

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1680-03

Electron Multiplier of Si Microchannel Plate

DUANMU Qing-duo, LI Ye, LU Yao-hua, JIANG De-long, DAN Tang-ren, GAO Yan-jun, FU Li-chen, TIAN Jing-quan

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: A silicon microchannel array and continuum dynode was prepared by processes of Multiplex Inductively Coupled Plasma (ICP) and LPCVD respectively to form a silicon microchannel plate (Si-MCP) with 15 μm of through hole diameters, 16.8 of aspect ratio, and 110 of electron gain at 400V of working voltage. The microchannel topography, dimension effects and electron gain coefficient were analyzed and discussed. In new preparation of MCP, the matrix and dynode materials selections of the new microchannel plates was independent, and no effects existed between their forming processes. By comparing the electron gain of the prepared silicon microchannel plate with conventional one, we found the electron gain of Si-MCP was larger than glass MCP. Though there were some problems to be solved in the manufacture of electron multiplier of Si-MCP, it was expected that Si-MCP would be a new approach to enhance the performances of MCP and the quality of image devices.

Key words: silicon; microchannel plate; aspect ratio; dynode

1 引言

微光夜视、高灵敏度粒子成像探测和光子计数、大屏幕快速图像显示以及 X 射线诊断等系统, 已在现代武器装备、空间技术和核辐射探测等领域中得到广泛应用, 其中微光图像增强器件的核心部件之一就是二维阵列式通道电子倍增器件-微通道板 (MCP-Microchannel Plates). 为了满足图像探测时更高分辨率 (大于 60lp/mm) 的新要求, 通道孔径必须小于 6 μm , 整板性能 (如几何保真度和信噪比高, 固定图案噪声小, 动态范围宽等) 也要有较大的改善; 另外在某些场合, 如大屏幕显示和 X 射线诊断系统等需要高分辨率和大面积 ($\phi \geq 100\text{mm}$) 的倍增器件. 实践证明, 选用传统玻璃多纤维拉制工艺是很难实现的. 九十年代初期, 美国 Galileo 电子-光学公司 J. R. Horton、S. M. Shank 等人^[1,2] 提出利用先进的半导体器件制造工艺和微米/纳米加工技术制造硅微通道板的设想, 做了大量工艺模拟实验, 取得了一定进展. 这种采用单晶硅材料, 通过半导体工艺制备的微通道板称之为硅微通道板. 与传统工艺相比, 新工艺可将基底材料和打拿极材料选择分开, 将微孔阵列和连续打拿极形成工艺分开, 彻底解决了传统 MCP 玻璃多纤维

控制和氢还原处理间相互牵制的矛盾, 也给采用高纯材料和采用新工艺制作打拿极创造了条件, 为 MCP 性能的突破性提高找到了新途径. 因此这种硅微通道板器件的诞生, 将会更进一步提高成像器件的质量, 拓宽 MCP 的应用领域.

2 实验

2.1 硅基体微孔阵列的形成

采用 4 英寸硅 (100) 单晶片, 研磨抛光后, 由 LPCVD 沉积 SiO_2 层. 根据微孔阵列设计, 制备掩膜板, 并用标准的光刻、刻蚀工艺, 将掩膜图复制到 SiO_2 层上, 形成硅基底刻蚀的 SiO_2 掩膜. 采用英国表面技术系统 (STS-Surface Technology Systems) 公司最新产品多路感应耦合等离子体 (Multiplex-ICP 即 Multiplex Inductively Coupled Plasma) 刻蚀系统, 形成微孔阵列. 其刻蚀速率可达 1.5 - 2 $\mu\text{m}/\text{min}$, 选择比: 对胶 > 75, 对 SiO_2 > 150, 垂直偏角 $\pm 0.25^\circ$. 用该系统进行多次刻蚀实验, 在同一硅片上形成四组不同孔径的微孔阵列, 表 1 给出微孔阵列的几何参数.

表 1 微孔阵列的几何参数

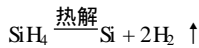
孔直径 (μm)	6	10	15	20
孔中心距 (μm)	14	18	23	28

收稿日期: 2000-10-30; 修回日期: 2001-03-29

2.2 打拿极制作

打拿极由导电层和发射层构成. 导电层是硅或掺氧硅, 方块电阻分别是 $10^{11} - 10^{12}$ 或 $10^{12} - 10^{14} \Omega$, 厚度 10 - 1000nm; 发射层是 SiO_2 , 厚度 2 - 20nm; 二次发射系数: $1.1 < \gamma < 2.2$ ($20\text{eV} < E < 100\text{eV}$), 优化后二次发射系数优于还原铅硅酸盐玻璃的 值.

采用 LPCVD 系统, 使 SiH_4 热分解, 形成硅薄膜作为导电层, 厚度控制在数百纳米. 反应式为:



为使方块电阻有所提高, 可对其实施氧掺杂工艺, 以期方块电阻达到给定范围. 经过敏化后形成 SiO_2 电子发射层, 厚度为

几纳米.

2.3 性能测试

对于已做出的硅微孔阵列, 用扫描电镜观察了正、背表面和孔内壁剖面的形貌. 最后采用紫外光电测试法^[3]测定了硅微通道板样品的电子增益.

3 结果与讨论

3.1 微孔的形貌

图 1 和图 2 是扫描电镜照片. 照片中发现了在传统深槽刻蚀中从未见过的较严重的纵向条带式不均匀分布的新现象, 通道内上部较好, 中部严重, 下部较轻.

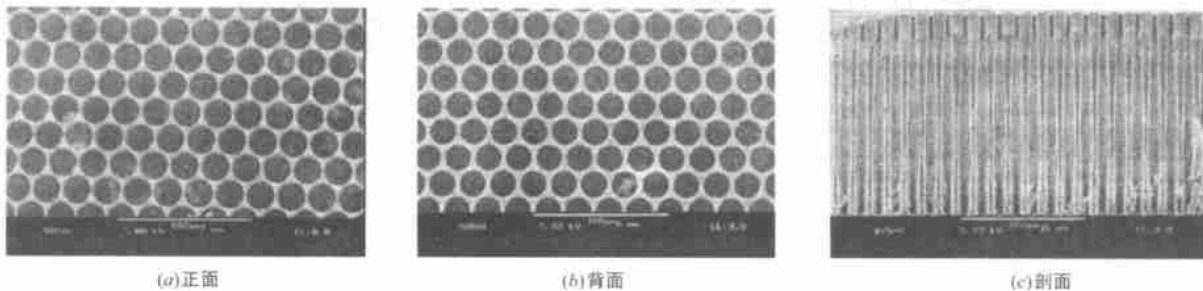


图 1 扫描电镜照片

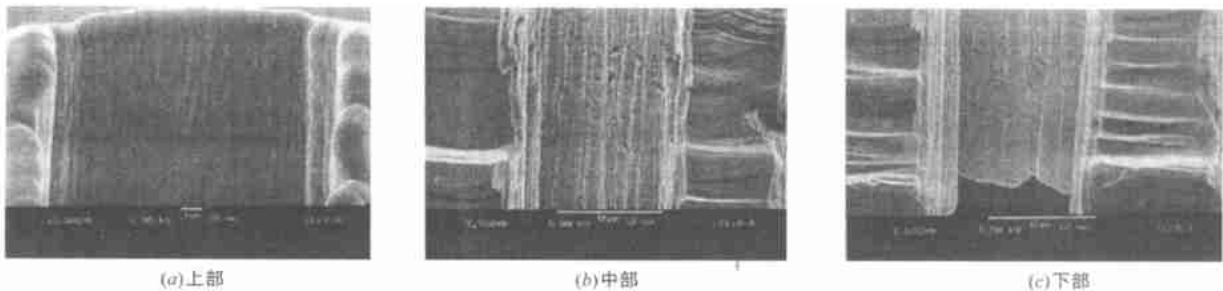


图 2 深通道内壁纵向条带式不均匀分布

深槽刻蚀中气体和气态生成物的输运只受到二个侧壁约束, 系开放式结构, 在刻蚀深度达几十微米甚至一百多微米时, 侧壁陡峭且较光滑, 稍显横向纹理; 而在深孔刻蚀中, 气体和气态生成物的输运仅有一个自由度, 其系属封闭式结构, 刻蚀过程中物理作用、化学反应以及气体输运过程复杂. 由于深槽和深孔刻蚀的微输运机制不同, ICP 系统的刻蚀条件和工艺参数应进行适当的调整. 因此, 欲得到质量优良, 深度大于 100 微米的微孔阵列需要进行深入的理论探索和系统的工艺实验研究. 对于纵向条带问题, 最初认为与最初实验选用的 SiO_2 掩膜图形周边锯齿形或周期性波动形变有关, 但改用金属掩膜后, 情况亦然. 所以, 纵向条带可能是是气体在深通道内部输运时是否存在不同形状的纵向层流, 且刻蚀气体、保护气体和气态生成物分子间相互碰撞, 在不同深度处对层流产生不同的影响所致. 为此, 需探讨气体微输运的规律及其与刻蚀工艺条件和环境的关系, 通过系统的工艺实验, 以期内壁光滑程度得到改善.

3.2 微孔阵列刻蚀的尺寸效应

刻蚀实验中, 用 200 分钟时间, 得到了不同深度分布; 孔

径分别为 6、10、15 和 20 μm , 孔间壁厚为 8 μm , 刻蚀深度分别为 162、205、252 和 276 μm . 图 3 给出在给定实验条件下刻蚀速率与微孔直径的相关性, 这种刻蚀速率随深孔尺寸减小而下降的现象称为尺寸效应. 可以看出, 刻蚀速率随通道直径的加大而增加, 刻蚀滞后不断减小, 最后消失. 相反, 随通道直径的减小, 刻蚀速率快速下降 (从 20 μm 的 1.38 $\mu\text{m}/\text{min}$ 到 6 μm 的 0.81 μm). 这种深孔刻蚀出现的尺寸效应也是由于刻蚀气体和产物的微输运效应所致.

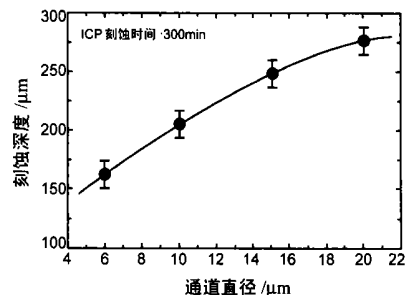


图 3 刻蚀速率与通道直径的关系

目前,由于气体在深孔内的微输运机制还不是很清楚,增加了解决工艺问题的难度.而微输运过程的理论研究,涉及等离子体物理、化学和物理化学,以及近代实验技术等方面,所以需要深入进行这方面的研究工作.

3.3 电子增益特性

硅微通道板微孔阵列刻蚀和连续打拿极完成后,两面镀上电极,采用紫外光电测试法^[3],在一个像管模拟器中进行通道电子倍增器的模拟测试,测试装置如图4所示.其中电子增益是反映微通道板通道电子倍增器二次电子发射的重要参数.微通道板通道电子倍增器的电子增益定义为:

$$G = \frac{I_{out}(\text{输出电流})}{I_{in}(\text{输入电流})} \quad (1)$$

对于通道直径 d 为 $15\mu\text{m}$,长径比 ($=l/d$) 为 16.8 的样品,在 $I_{in} = 3 \times 10^{-11}\text{A}$,工作电压 $U = 400\text{V}$ 时,测得 $I_{out} = 3.3 \times 10^{-9}\text{A}$,计算得 $G = 110$.由于目前还没有作深孔刻蚀工艺条件的优化实验,长径比 还不能做得很大,所以工作电压 U 不高.

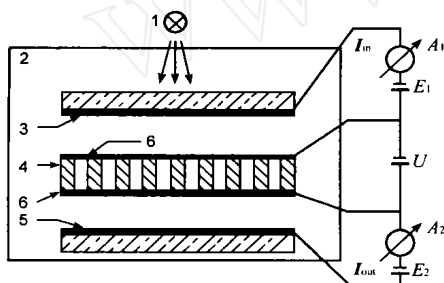


图4 电子增益测试装置示意图. 1: UV光源; 2: 真空室; 3: Au阴极; 4: 硅微通道板; 5: 荧光屏; 6: 电极; A_1 、 A_2 灵敏检流计; E_1 、 E_2 为前后近贴区电压; U 为 MCP 工作电压

下面对比一下硅和玻璃微通道板的增益特性. 微通道板的简化电流表达式^[4]为:

$$g = \left(\frac{ku^2}{4v_0^2} \right)^{4v_0^2/u} \quad (2)$$

式中 k 是材料参数, v_0 在微孔阵列结构和打拿极一定的条件下也近似为常数, u 是工作电压, u 是通道长径比. 一般情况下, u 与 u 成比例, 即: $u = w$, 式中 w 为比例常数. 所以式(2)可改写成:

$$\ln g = bu \quad (3)$$

式中 b 在给定材料和比例系数 w 时为常数, 即:

$$b = \left(\frac{4v_0}{w^2} \right) \ln \left(\frac{ku^2}{4v_0} \right) \quad (4)$$

如果通道长径比作到与玻璃微通道板相同, 即 $= 40$, 在比例常数 w 不变的情况下, 硅微通道板的工作电压可加到 952V. 这时, 根据式(3)估计硅微通道板的电子增益 G 可达 7.22×10^4 , 玻璃微通道板的电子增益一般为 $10^3 - 10^4$. 由此可知, 硅微通道板的电子增益系数大于玻璃微通道板.

4 结论

采用 ICP 刻蚀系统, 首次制备了长径比为 15 - 25 的硅微通道板, 证明了半导体工艺制备微通道板的可行性. 经分析其电子增益大于传统玻璃微通道板. 实验发现, 刻蚀过程中出现纵向条带状表面形貌, 其原因有待研究. 微孔阵列刻蚀存在较明显的尺寸效应.

本文实验得到北京大学微电子所的领导和老师们的热心帮助, 在此表示衷心感谢.

参考文献:

- [1] J R Horton, G W Tasker, J J Fijol. Characteristics and applications of advanced technology microchannel plates [A]. Proc. SPIE [C], 1990, 1306: 169 - 178.
- [2] S M Shank, R J Soave, et al. Fabrication of high aspect ratio structures for microchannel plates [J]. J. Vac. Sci. Technol., 1995, B13 (6): 2736 - 2740.
- [3] Tian Jingquan, Zhang Baifu, et al. UV photo-method for measurement of MCP characteristic parameter [A]. Proc. SPIE [C], 1990, 1230: 228 - 230.
- [4] 邹异松编著. 电真空成像器件及理论分析 [M]. 第一版, 北京: 国防工业出版社, 1989: 74 - 77.

作者简介:



端木庆铎 男. 1956 年出生于吉林长春. 1982 年毕业于长春光学精密机械学院材料工程系, 1991 年获军用光学硕士学位. 现任长春光学精密机械学院教授, 应用理学分院副院长, 光电电子技术研究所所长. 长期从事光电子材料与器件的科研与教学工作. 在国内外发表学术论文 40 余篇.