

③ 12-16

真空微电子触觉传感器 场致发射阵列的研究

TN48

温志渝 何清义 江永清 林鹏 蒋子平 TP212

(国家教委光电技术及系统开放实验室, 重庆, 400044; 第一作者 47 岁, 男, 教授)

摘要 阐述了真空微电子触觉传感器的工作原理。采用半导体集成电路加工技术和硅微各向异性腐蚀及氧化锐化工艺, 在电阻率为 $3\sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型(100)硅片上制备了真空微电子触觉传感器的场致发射阴极锥尖阵列, 锥尖密度达 $3900 \text{ 个}/\text{mm}^2$, 起始发射电压为 $2\sim 3 \text{ V}$, 反向击穿电压大于 30 V , 收集极电压在 20 V 时, 单尖发射电流达 $0.2 \mu\text{A}$, 实验结果表明这种真空微电子触觉传感器具有良好的触觉效应。

关键词 场致发射; 锥尖阵列; 各向异性腐蚀; 氧化锐化

中国图书资料分类法分类号 TN48

0 引言

真空微电子 触觉传感器

自从 1976 年 Spindt 等人提出场致发射阵列的新概念以来^[1], 各种新型的真空微电子传感器不断出现。这是因为真空微电子传感器具有固体传感器和真空电子器件的优点: 抗辐射、耐高低温、速度快、体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等, 因而成为当前世界各国研究的热点。而研究真空微电子传感器的关键技术之一就是制作场致发射阴极锥尖阵列。

笔者介绍了真空微电子触觉传感器的工作原理, 采用各向异性腐蚀和氧化锐化工艺, 在电阻率为 $3\sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型(100)硅片上成功地制备了 30×30 硅场致发射阴极锥尖阵列, 硅微锥尖密度为 $3900 \text{ 个}/\text{mm}^2$, 起始发射电压 $2\sim 3 \text{ V}$, 反向击穿电压大于 30 V , 在 20 V 收集极电压下, 单尖发射电流达 $0.2 \mu\text{A}$, 实验表明具有良好的触觉效应。

1 真空微电子触觉传感器的工作原理

真空微电子触觉传感器主要由低偏压场致发射硅锥尖阵列, 真空微腔和弹性阳极膜组成。如图 1 所示, 在阴阳极之间加一偏压, 当偏压加到一定时, 阴极锥尖开始场致发射电子, 在阴阳极间形成电流。当弹性阳极膜受力发生形变时, 阴阳极间距离将发生变化。如果阴阳极间电压恒定, 则阴极锥尖表面的电场强度就会随之变化, 从而发射电流发生变化, 于是通过测量发射电流的大小就能检测到弹性膜所受的压力或者检测到弹性膜形变的位移。图 2

• 收文日期 1997-06-10
• 国家自然科学基金资助项目(6958008)

是真空微电子触觉传感器发射电流(I)与阴阳极间距离(d)关系曲线示图。

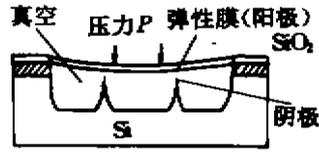


图 1 真空微电子触觉传感器原理示图

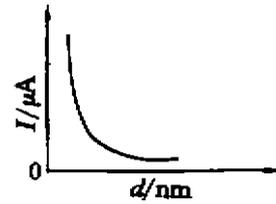


图 2 发射电流与阴阳极间距关系曲线

2 硅微场致发射阴极锥尖阵列的制作

1) 金属的场致发射方程首先是由 Fowler 和 Nordheim 在一定理想的条件下推出^[2]：

$$J = (1.54 \times 10^{-6} E^2 / \varphi) \cdot \exp(-6.85 \times 10^7 \varphi^{3/2} / E) V(y)$$

$$V(y) = 3.62 \times 10^{-4} E^{1/2} / \varphi$$

式中 J 为电流密度(A/cm²)；
 φ 为发射体功函数(eV)；
 E 为电场(V/cm)。

半导体的场致发射与金属的场致发射没有本质的区别，所不同之处只是导带中电子速度分布是麦克斯韦分布，在考虑到镜像力情况下，特别是对于真空微电子尖端场致发射，当电场渗透较深时，由于外加电场表面电荷足够多时，会使势能下降，表面层能级发生简并，电子从表面向内的分布，由费米分布变为麦克斯韦分布。考虑以上因素，可得出^[3]：

$$j = 1.54 \times 10^{-6} t(y) \frac{E^2}{\varphi} \exp\left[-6.83 \times 10^7 \frac{\varphi^{3/2}}{E} \theta(y)\right]$$

其中

$$t(y) = \exp\left(36.8 \frac{\varphi^{1/2}}{\varepsilon^{2/5} E^{1/5}}\right) - \left(1 + 36.8 \frac{\varphi^{1/2}}{\varepsilon^{2/5} E^{1/5}}\right)$$

$$\theta(y) = \theta\left[3.79 \times 10^{-4} \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}\right)^{1/2} \frac{E^{1/2}}{\varphi}\right]$$

在实际应用中，希望场致发射电流密度 j 尽可能大，同时希望发射起始工作电压要低。从上式中可知， j 正比于发射体附近的电场 E ，而电场 E 又正比于工作电压 V 。即：

$$j \propto E$$

这时，发射体附近的电场可用下式表述：

$$E = \beta V$$

从式中可以知道， β 越大，发射锥尖的性能越好。式中的 β 与锥尖的形状，曲率半径及阴阳极间的距离及材料等因素有关。

2) 工艺实验

实验中选用2英寸n型(100)抛光硅片,电阻率为 $3 \sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$,其工艺流程如图3所示。

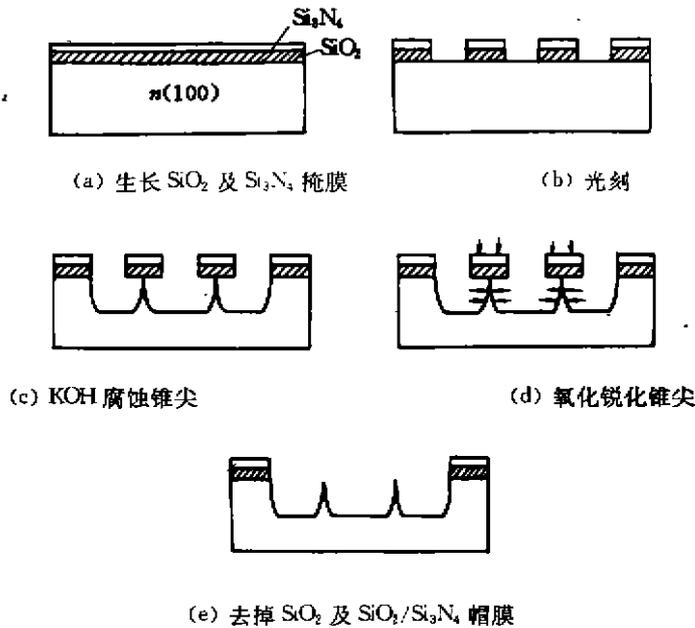


图3 工艺流程图

- ① 硅片热生长 5000\AA 的 SiO_2 , 然后再用 L_{pcvn} 淀积 800\AA 左右的优质 Si_3N_4 .
- ② 光刻腐蚀形成边长 $8 \mu\text{m}$ 的正方形掩膜阵列 30×30 , 中心距为 $16 \mu\text{m}$.
- ③ 采用 KOH 腐蚀液 (KOH, 异丙醇, 水) 进行各向异性腐蚀, 腐蚀至锥尖 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜帽即将脱落之前停止腐蚀.
- ④ 对带帽硅锥尖阵列进行氧化锐化处理.
- ⑤ 用 BHF 溶液去除硅锥尖的 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 和表面的 SiO_2 .

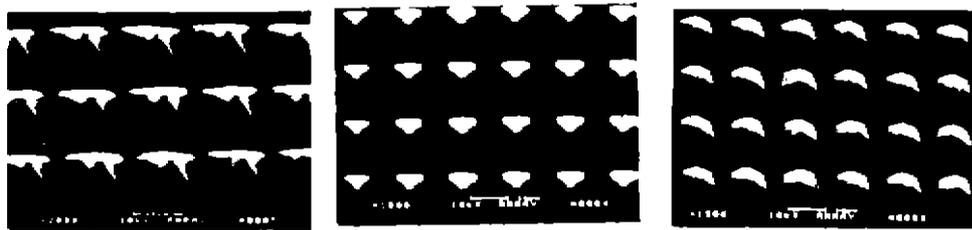
3 实验结果及讨论

1) 用 KOH 腐蚀液腐蚀的硅微场致发射阴极锥尖阵列, 经氧化锐化处理, 用 BHF 溶液去除 SiO_2 和 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 帽膜的外形 SEM 照片如图 4 所示. 该锥尖形状在不同的工艺条件下形成不同的几何形状. 图 4(a) 和 (b) 是在 KOH 溶液腐蚀过程中, 当 (111) 面远比 (110) 副面大或相当时停止腐蚀, 在经较长时间锐化处理中, 因 (111) 面的氧化速率大于 (110) 面, 所以经 BHF 去除 SiO_2 后原有的四个 (110) 副面消失, 形成四棱锥尖体. 图 4(c) 是 KOH 腐蚀到 (111) 面和 (110) 面大小相当, 或 (110) 面大于 (111) 面之后, 经适当的氧化锐化处理, BHF 去除 SiO_2 后, 形成由四个 (111) 面和四个 (110) 副面构成的八面棱锥尖体.

2) 硅微锥尖的氧化锐化

硅微锥尖的氧化锐化工艺是获得发射性能优良的场致发射锥尖的关键之一. 人们在实验研究中总是希望既要性能满足要求, 又要实施方法简单省事. 为此, 进行了以下实验比较.

- ① 采用 Marcus 锐化方法^[4], 去掉锥尖的 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 掩膜帽, 在 $900 \sim 950^\circ\text{C}$ 温度下进行



(a) KOH 腐蚀锐化 (b) 过 KOH 腐蚀锐化 (c) KOH 腐蚀锐化形成八棱锥尖

图 4 硅微场致发射阴极锥尖阵列 SEM 照片

氧化锐化处理,该方法不同于经典的氧化模型,在曲率半径很大的区域,由 SiO_2 和 Si 之间的体积差引起的应力相对集中,该应力阻碍 SiO_2 -Si 界面的氧化进程,从而导致该区域氧化速率下降大约 30%。这种方法可视锥尖锐化的程度,按要求反复数次,可获得精度很高的锥尖曲率半径。但锥尖高度将随之减小,且这种工艺耗时、繁琐、效率低。

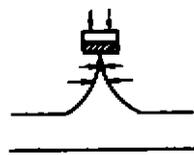


图 5 干-湿-干氧化锐化原理示意图

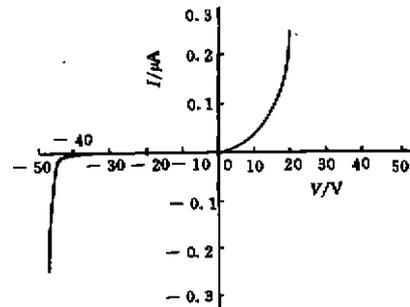


图 6 硅锥尖场致发射二极管特性曲线

② 另一方法是将已腐蚀成的带帽 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 掩膜的锥尖在 1050°C 温度下进行常规氧化一次完成锐化。如图 5 所示,该方法是利用 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 掩膜的阻挡作用,使锥尖处的氧化速度低于锥体侧面平面上的氧化进度,在氧化过程中沿锥体侧向平面平行向内推进,从而实现锥尖锐化。该方法简易省事,但对控制锥尖在 KOH 溶液中腐蚀停止的最佳时刻要求较高,否则很难获得锥尖形貌的一致性。

3) 在动态真空系统中用 GH4821 半导体特性图示仪测得的如图 6 所示的锥尖阵列的 I-V 特性曲线。起始工作电压为 $2\sim 3\text{ V}$,反向击穿电压大于 30 V ,在 20 V 收集极电压时的单尖发射电流为 $0.2\ \mu\text{A}$,实验证明该传感器具有良好的触觉效应。

4 结束语

本文较深入地研究了真空微电子触觉传感器场致发射阴极锥尖阵列的制备工艺,在动态真空系统中对已制成的实验管特性进行了测试分析研究,获得了场致发射特性曲线,并定性地观察到该实验样品具有良好的触觉效应。

参 考 文 献

- 1 Spindt C A. J Appl Phys, 1976, 47(2): 5248
- 2 Fowler R H, Nordheim L W. Proc R SOC. London, 1928, A119: 173
- 3 刘杰明. 电子器件, 1994, 17(3): 16
- 4 Ravi, Marcus, Liu J. Vac Sci Technol B, 1991, 9(6): 2733

Study on Field Emission Array Integrated Vacuum Micro Electron Tactile Sensor

Wen Zhuyu He Qingyi Jiang Yongqing Lin Peng Jiang Ziping

(The Open Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems,
the State Education Commission of China, Chongqing University)

ABSTRACT This paper describes principle of vacuum micro electron tactiles sensor. The silicon tips field emission array have been fabricated by using anisotropic etching and oxidation sharpening on the Si(100) substrate (n type, $P=3\sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$). The density of tips is up to 3900 tips/mm², and the starting emission voltage is 2~3 V, emission current is 0.2 μA at anode voltage of 20 V, and the backward breakdown voltage is 30 V. The experimental results show that the sensor has good tactile effect.

KEYWORDS field emission; silicon-tip array; anisotropic etching; oxidation sharpening

• 下期待发表文章摘要预报 •

用 Riesz 基函数表达的多分辨分析模型

吴 渝^① 李红波^② 曹长修^①

(① 重庆大学自动化系; ② 渝州大学自电系)

摘 要 建立了用 Riesz 基函数表达的多分辨分析模型, 在模型中研究了空间正交性条件与完全重构条件的满足, 得出了包含正交小波分析的更具普遍性的多分辨分析模型。

• 现在重庆邮电学院工作