

* 博士后研究 *

纳米 Si 薄膜场发射压力传感器研究 *

廖 波 韩建保 林鸿溢 王 越

北京理工大学, 北京 100081

摘要 设计研制了一种基于量子隧道效应机制的锥膜-一体新结构场发射压力传感器原型器件。测试表明当外加电场为 5.6×10^5 V/m 时, 器件有效区域发射电流密度可达 53.5 A/m², 由此可看出低维半导体纳米硅技术有效地引入了微电子和硅微机械加工技术相结合的微机电系统, 对提高器件发射效率, 改善敏感性能效果是明显的。通过三维实体建模与有限元仿真技术, 对器件进行了压力形变计算。结果表明, 尖锥体的存在, 对敏感弹性薄膜在额定压力作用下的最大挠度影响小于 0.4%, 锥膜-一体结构设计是合理的。

关键词 纳米硅薄膜 场发射压力传感器 有限元仿真 压力形变计算

当今传感器技术的主要发展趋势是集成化、多功能化和智能化。这几大趋势都离不开以微机电系统 MEMS (Microelectro-Mechanical Systems) 技术为基础的微型传感器及纳米传感器技术的发展。在各种传感器的开发应用中, 近年随着微电子技术、MEMS 技术和真空电子学的发展, 一种基于量子隧道效应机制的新型真空场发射压力传感器被相继提出而成为开发高灵敏度新机理力敏器件的研究热点^[1~6]。与压阻式、电容式等其他类型的传感器相比, 它具有灵敏度高、耐高低温、抗辐射、体积小等优点。在各种压力、流速、液体高度、声波强度等测量中以及军事领域中将有广泛的应用前景。尤其适用于智能机器人的触觉系统和恶劣的工作环境, 是一种很有前途的器件。

本文将纳米硅薄膜引入微机电场发射压力传感器的制作, 进一步有效结合纳米技术、真空微电子及传感器技术, 利用低维纳米半导体硅薄膜^[7,8]的优异场发射特性, 提高器件发射效率, 改善敏感性能。

1 场发射压力传感器基本原理及设计

从降低工艺难度及确保器件灵敏特性角度综合考虑^[6], 本文设计了锥膜-一体敏感新结构, 克服了传统用敏感膜替代二极管阳极结构而带来的对准和键合困难, 从而不易于器件实用化的缺点, 结构示于图 1。整个器件主要由收集极(阳极)、阴极尖锥阵列发射极、外界压力感知膜件、阴阳极间真空微腔等几部分组成。其工作基础是基于 Fowler-Nordheim 场致发射理论。在阴阳极间加上正向偏压, 阴极表面势垒降低或减薄, 产生量子隧道效应, 阴极尖端会有显著的

2000-08-23 收稿, 2000-11-21 收修改稿

* 国防预研基金资助项目(批准号: 8.7.4.7)

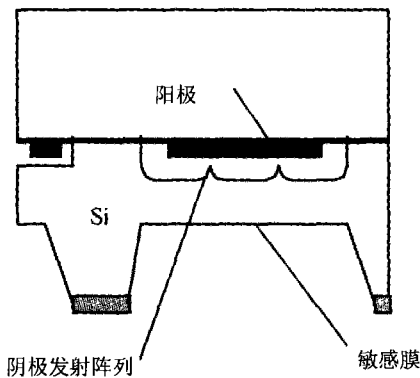


图 1 锥模一体新结构场发射压力传感器示意图

场致电子发射,形成器件的正向电流。这种场致发射电流对阴阳极距离的变化很敏感。于是可设计为通过测量发射电流的大小检测形变膜受力的敏感器件。

本文综合考虑锥模一体器件新结构设计中核心部件阴极的场发射增强优化及独特的带锥敏感膜的形变规律,在器件结构、发射尖锥形状、几何参数特性、新材料降低表面功函数等方面进行优化,设计了一种结构、综合工艺及灵敏度均科学先进的新型纳米硅薄膜场发射压力传感器。

2 纳米硅薄膜场发射压力传感器研制

纳米硅薄膜场发射压力传感器的研制过程实质上是一个体硅 MEMS 加工工艺过程,其关键工艺包括场发射硅锥阵列制作、覆纳米硅薄膜阴极阵列制备、场发射二极管构造及敏感膜腐蚀成形等单项和组合工艺。

在厚度为 $400\ \mu\text{m}$ 、直径约 $10\ \text{cm}$ 的 N 型(100)电阻率为 $4\sim 7\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的双抛硅片上,制作了 300 个以上的单元。每单元有效面积(器件区)为 $3.5\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}$,单元之间留有 $1\ \text{mm}$ 宽的划片道。方形掩膜尺寸约为 $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$,间隔 $5\ \mu\text{m}$,均匀排列。为了获得图 1 所示的器件结构,我们设计了 5 块版图,共进行 5 次光刻。实施硅阴极工艺、玻璃阳极工艺以及最后的硅-玻璃组合工艺完成微封闭式场发射压力传感器器件的研制。

其具体实验结果如下:通过各向同性腐蚀及带掩膜锥干氧锐化削尖制作的单元器件阴极符合设计要求,得到发射总面积 $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$,均匀分布 50×50 个发射尖锥的形状完整的金字塔形硅锥阴极阵列,其实际几何参数为锥高 $1.7\ \mu\text{m}$,曲率半径 $40\sim 50\ \text{nm}$,锥间距为 $10\ \mu\text{m}$ (其阴极硅锥阵列 SEM 照片示于图 2)。电子显微镜观察表明:阵列样品加工的均匀一致性能满足场发射压力传感器的材料发射性能要求。

用 CVD 法在阴极上沉积了晶粒为 $3\sim 9\ \text{nm}$ 、厚度为 $30\sim 40\ \text{nm}$ 的纳米硅薄膜。电子显微镜观察表明硅锥阵列形貌特征未受到影响。

所不同的是由于一定厚度纳米硅膜的沉积,使硅尖尺寸比未覆盖前有所增加,我们可认为以硅尖锥作为一个载体,经过沉积膜工艺后,形成了主要以纳米硅薄膜作为场发射材料的发射体结构,可以进一步考察其发射特性。

制作了镀 Ti/Pt/Au 玻璃阳极。静电键合构造了无形变时阴极锥尖距阳极 $1.8\ \mu\text{m}$ 的二极管结构。最后释放结构,腐蚀敏感膜成形,获得纳米硅薄膜场发射压力传感器原型器件(结构如图 1 所示)。所制器件在 $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ 的小区域内形成 50×50 场发射尖锥阵列,其密度为 10^6 尖锥/ cm^{-2} 。尖锥表面覆盖纳米硅薄膜,以晶粒尺度为 $5\ \text{nm}$ 计,则晶粒的表面密度

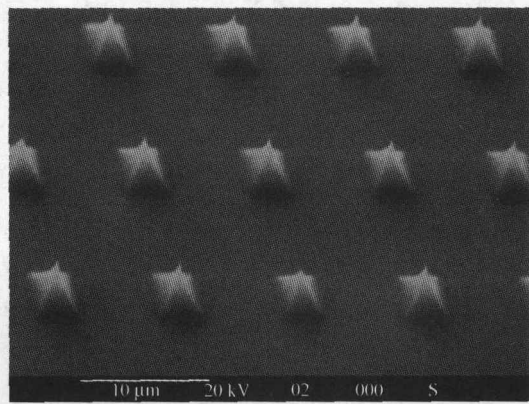


图 2 阴极硅锥阵列 SEM 照片

达 4×10^{12} 晶粒/ cm^{-2} , 所以每个尖锥表面的晶粒将高达 4×10^6 个. STM 观测表明纳米硅薄膜表面晶粒起伏突起, 在电场作用下, 每个晶粒都将成为一个激活中心, 即场致电子发射中心点, 显然将极大提高发射电流, 从而提高传感器灵敏度. 器件的场发射特性经 HP4145B 晶体管参数测试仪测试表明, 外加电场为 $5.6 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 器件有效区域发射电流密度达 $53.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 假设每个尖锥都均匀发射电流, 则单个尖锥发射电流密度达 $0.02 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 其优异的发射效果是明显的.

3 锥膜一体新结构场发射压力传感器有限元仿真与压力形变计算

本文研制了结构简单易于工艺实现的传感原型器件, 但这种结构由于其锥膜一体化, 与传统无锥平膜比较起来, 不再是一简单的薄板结构, 而是带锥薄板的复杂结构. 前者受压力作用而发生的横向挠度, 可根据板壳理论并结合薄膜的边界条件, 近似地计算. 当薄膜的边界比较规则(例如矩形等)以及横向挠度比较小时, 近似计算结果的精度已足够的高. 但对于后者带尖锥体薄膜, 因其复杂的几何边界条件, 是不可能由此得到精度可控的横向挠度近似解, 所以其力学特性分析变得复杂.

本文应用有限元软件 ANSYS 5.5.1, 建立了带四棱尖锥体敏感薄膜结构的三维实体模型, 并用编号为 Solid72 的四面体单元对其网格化. 敏感膜的长、宽、高分别为 $670 \mu\text{m} \times 670 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$. 在仿真计算中, 由于尖锥体敏感薄膜结构的对称性, 只需取其 $1/4$ 为计算目标. 尖锥体的形状比敏感膜复杂得多, 为了既充分反映尖锥体对薄膜变形特性的影响, 又不耗用大量的计算时间, 对尖锥体应用了较小的单元, 而对薄膜应用了较大的单元. 在尖锥体与薄膜之间, 设定了一个 $510 \mu\text{m} \times 510 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的过渡区域, 该区域网格化的细密程度小于尖锥体, 大于薄膜. 整个结构的有限元模型共有 51687 个单元, 17514 个节点. 薄膜和尖锥体材料[100]晶向的弹性模量 $E = 1.67 \times 10^5 \text{ MPa}$, Poisson 系数 = 0.35. 图 3 为网格化的尖锥体敏感薄膜的一个局部, 其左边的垂直棱线, 为尖锥体敏感薄膜结构的中心垂直对称轴, 结构的最大横向挠度即出现在该对称轴上.

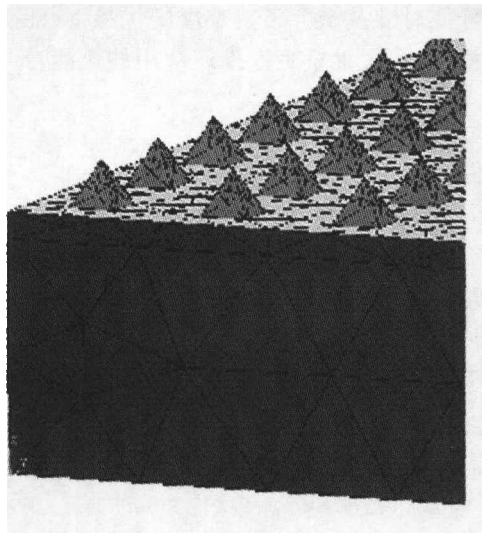


图 3 尖锥体敏感薄膜网格化

图 4 为 $1/4$ 带尖锥体敏感薄膜的受压变形构形. 从图中可以看出, 尖锥体的存在, 对敏感薄膜上下两表面变形后的光滑程度影响不大. 为了分析比较尖锥体的存在对敏感薄膜最大挠度的影响程度, 同时对不带尖锥体的敏感薄膜在相同压力作用下的最大挠度进行了计算.

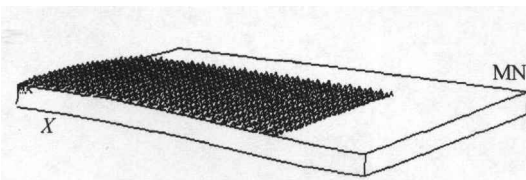


图 4 $1/4$ 带尖锥体敏感薄膜受压变形构形

新结构传感器中, 无形变时阴极锥尖距阳极 $1.8 \mu\text{m}$, 本文计算比较了相应施加压力载荷下, 尖锥体的存在对敏感薄膜最大挠度的影响. 表 1 列

出了在 0.25 ~ 1.0 MPa 压力范围内,带尖锥体与不带尖锥体敏感薄膜弹性变形的最大挠度.从表中可以看出,在静压力作用下,两种敏感薄膜最大挠度之间的最大相对差值也只有 0.33%,表明尖锥体的存在,对敏感薄膜最大挠度的影响非常小,不会给器件的电场变化增加复杂性. 综上计算分析,此器件锥膜一体结构设计是合理新颖简洁的.

表 1 带尖锥体与不带尖锥体敏感薄膜弹性变形的最大挠度比较

施加压力/MPa	不带尖锥膜最大挠度/ μm	带尖锥膜最大挠度/ μm
0.25	0.459	0.458
1.0	1.836	1.830

4 结论

本文设计研制了锥膜一体新结构纳米硅薄膜场发射压力传感器原型器件,对器件结构进行了三维实体建模,并对器件的力学特性进行了有限元仿真计算,结果表明锥膜一体新结构在降低对准及键合工艺难度的优势下,能确保器件受力形变的优良力学特性,此器件是科学先进的,具有大批量生产推广应用的潜能.

参 考 文 献

- 1 Lee H C, et al. A novel field emission array pressure sensor. *Transducers 91: 6th Int Conf on Solid State Sensors and Actuators*. San Francisco CA, 1991, 241
- 2 Jiang J C, et al. Microcavity vacuum tube pressure sensor for robot tactile sensing. *Transducers 91: 6th Int Conf on Solid State Sensors and Actuators*. San Francisco CA, 1991, 238
- 3 Busta H H, et al. The field-emitter triode as a displacement/pressure sensor. *J Micromech Microeng*, 1993, 3: 49
- 4 Nicolaescu D Modeling of the field emitter triode as a displacement/pressure sensor. *Appl Surf Sci*, 1995, 87/88: 61
- 5 Xia S H, et al. Vacuum-microelectronic pressure sensor with novel stepped or curved cathode. *J Vac Sci Technol B*, 1998, 16(3): 1226
- 6 廖 波, 等. 场发射压力传感器研究进展. *真空科学与技术学报*, 2000, 20(6): 413
- 7 Lin H Y. Nano-size materials and nanotechnology. *Materials Review*, 1993, 6: 42
- 8 Lin H Y, et al. Growth dynamics of nano-crystalline silicon films and its computer simulation. *Acta Phys Sinica*, 1996, 45: 655