

新型真空微电子压力传感器 特性研究和实验制作*

夏善红¹ 刘 加² 陈绍凤¹ 韩泾鸿¹ 崔大付¹

(1 中国科学院电子学研究所 传感技术国家重点实验室 北京 100080)

(2 清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 本文提出并研究了新型的“台阶阴极”和“曲面阴极”真空微电子压力传感器. 与普通的真空微电子压力传感器相比, 新型传感器的阴极发射电流大大提高, 使得输出信号易于检测, 抗噪声能力增强, 并在改善输出信号线性、提高灵敏度和扩展量程方面有很大优势. 本文给出了计算机模拟结果, 简述了台阶阵列阴极和阳极压力敏感膜的制作, 并展示了 SEM 照片.

EEACC: 2340E, 7230, 7320V

1 引言

真空微电子(VME)压力传感器出现于九十年代初期, 是在新兴的真空微电子技术发展中诞生的一种新型传感器, 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中.

本文在现有的真空微电子压力传感器结构基础上, 改进了阴极结构, 提出新型的“台阶阴极”和“曲面阴极”真空微电子压力传感器, 通过计算机模拟, 比较了新型传感器与普通传感器的阴极发射电流. 计算结果表明, 在相同的外加压力和阳极电压下, 新型传感器的阴极总发射电流大大高于普通传感器的阴极发射电流, 使得传感器输出信号易于检测, 抗噪声能力增强, 并在改善输出信号线性、提高灵敏度和扩展量程方面优于普通传感器. 文中将介绍新型传感器的原理、结构和计算机模拟结果, 简述台阶阵列阴极和阳极压力敏感膜的制作, 并展示阴、阳极的 SEM 照片.

2 新型真空微电子压力传感器原理和结构

真空微电子压力传感器最早于 1991 年第六届固态敏感器和执行器国际会议(TRANSDUCERS' 91)上提出^[1,2]. 其结构主要由四部分组成, 如图 1 所示: (1) 压力敏感膜作为阳

* 中国科学院院长基金和国家自然科学基金资助项目(批准号 69674030)

夏善红 女, 1958 年生, 研究员, 目前从事真空微电子器件和传感技术研究

刘 加 男, 1954 年生, 副研究员, 主要从事信号处理和电子技术研究

陈绍凤 女, 1947 年生, 工程师, 主要从事半导体工艺和真空微电子器件研制

1996 年 10 月 25 日收到初稿, 1997 年 5 月 14 日收到修改稿

极,采用金属膜或硅薄膜;(2) 阴极,大多采用场发射尖锥阵列;(3) 阴阳极之间的绝缘层;(4) 阴阳极之间的真空微腔. 传感器工作原理是:阳极相对于阴极施加正电压,在阴极表面

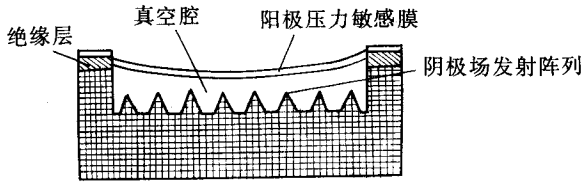


图 1 普通真空微电子压力传感器原理图

压力传感器具有灵敏度高、抗辐照和温度稳定性好等优点.

为了阐明新型传感器的原理和优点,先讨论一下影响真空微电子压力传感器阴极发射电流、灵敏度和量程的因素.

灵敏度主要由压力敏感膜的形变特性和阴极的发射特性两方面决定. 就敏感膜而言,膜越薄、面积越大,受压时越容易发生形变,灵敏度越高. 就阴极发射电流而言,提高阳极电压、减小阴极曲率半径、缩小阴阳极间距有利于增加阴极表面的电场强度,从而提高发射电流密度. 发射电流增加使传感器输出信号易于检测,抗噪声能力增强. 为了提高阴极发射电流,阳极敏感膜与阴极表面要尽量靠近,但又不能使二者接触短路. 制约阴阳极间距的条件是:要保证传感器正常工作,阳极敏感膜在外力作用下发生形变时不得与阴极表面接触. 由于阳极膜的形变大小取决于外加压力大小,因此传感器对压力的测量范围受到阴阳极间距的制约.

由以上分析不难看出,真空微电子压力传感器的阴阳极间距直接影响传感器阴极发射电流密度和压力测量范围. 在图 1 所示的传感器中,发射尖锥分布在同一平面上,减小阴阳极间距有利于提高阴极发射电流,但间距过小必然限制传感器的压力测量范围,即提高阴极电流与扩大量程是相矛盾的. 为了解决这一矛盾,本文提出了新型的阴极结构,如图 2 所示,(a) 阴极有一个台阶,发射尖锥分布在台阶上下;(b)和(c)阴极基面为一曲面,曲面上均

形成电场,使阴极产生电子发射. 当敏感膜受压变形时,阴阳极间距变化,阴极表面场强随之改变,从而导致阴极发射电流变化. 当阴极表面电场很强时,阴极的发射为场致发射,其发射电流密度对于场强变化非常敏感,而温度等因素的影响理论上可忽略不计. 因而真空微电子

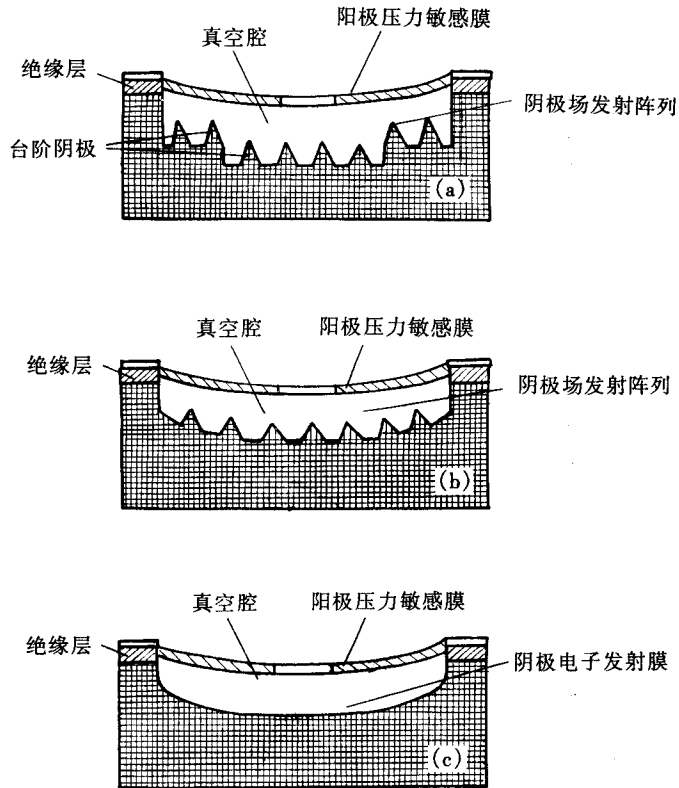


图 2 新型真空微电子压力传感器原理图

(a) “台阶阴极”传感器; (b) 和 (c) “曲面阴极”传感器.

匀分布着发射尖锥或覆盖一层电子发射膜. 图 2(a)所示的“台阶阴极”可看成图 2(b)所示的“曲面阴极”的一种特殊形式, 当台阶的数目不断增加时“台阶阴极”就趋向于“曲面阴极”. “台阶”的高度和尺寸以及“曲面”的形状应根据阳极敏感膜的形变特性而设计. 下面的计算机模拟将表明, 新型的“台阶阴极”和“曲面阴极”传感器在提高阴极发射电流密度等多方面优于普通的“平面阴极”传感器.

3 阴极发射电流的计算

本节通过计算机模拟, 比较新型传感器和普通传感器的阴极发射电流, 从而说明新型传感器的优点.

真空微电子压力传感器的性能主要表现为其压力-电流特性, 即在外加压力作用下传感器阴极发射电流的变化, 其计算步骤一般为: (1) 计算在外加压力作用下阳极力敏薄膜的形变, 即阳极膜与阴极每一发射尖锥的距离; (2) 计算阴阳极之间的电场分布; (3) 计算阴极每一发射尖锥的发射电流及总电流.

为了简化计算过程, 减少烦琐的数值计算, 本文在研究传感器电流特性时假设敏感膜在压力作用下的形状近似为抛物面, 从而简化了上述的计算步骤(1), 这种假设和简化不会影响对传感器一般性质的研究.

电位分布的计算采用有限元方法求解泊松方程 $\nabla^2 U = -\rho/\epsilon_0$ [3~5], 其中 U 为电位; ρ 为电荷密度; ϵ_0 为真空介电常数.

发射电流密度 J (A/cm²) 的计算根据阴极表面场强大小可分别采用 Child's 公式、Schottky 公式和 Fowler-Nordheim 公式^[6]. 在真空微电子压力传感器中, 阴极一般工作于场致发射状态, 其发射电流密度采用 Fowler-Nordheim 公式计算:

$$J = \{ (e^3 E^2) / [8\pi h \varphi t^2(y)] \} \exp \{ - [8\pi(2m)^{1/2} / (3he)] [(\varphi^{3/2} / E)] \theta(y) \} \quad (1)$$

式中 φ 是功函数(eV); E 为电场强度(V/cm), $y = (e^3 E / 4\pi\epsilon_0)^{1/2} / \varphi$, $t(y)$ 和 $\theta(y)$ 的值有表可查. 在实际计算中, $t(y)$ 和 $\theta(y)$ 可近似为^[7]

$$t(y) = 1 + 0.1107y^{1.33}, \quad \theta(y) = 1 - y^{1.69}$$

图 3(见图版 I) 为模拟真空微电子压力传感器阴极发射电流的计算模型: (a) 是采用“平面阵列阴极”的普通传感器; (b) 和 (c) 分别为采用“台阶阵列阴极”和“曲面阵列阴极”的新型传感器. 模型假设: 阴极发射阵列总面积为 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$, 其间均匀分布着 20×20 个发射尖锥, 每个尖锥的尖端曲率半径为 50nm, 功函数 3.5eV. 在图 3 中, L 为阴极发射阵列的边长, 两个模型中均为 $200 \mu\text{m}$; D_c 为阳极膜无形变时阴阳极最大间距, 两个模型中均为 $2 \mu\text{m}$; L_s 为台阶阴极模型中台阶的边长; D_s 为阳极无形变时阴阳极之间的最小距离.

计算结果示于图 4, 该图比较了阳极电压 250V 和 300V 两种情况下曲面阴极(Curved cathode)、台阶阴极(Stepped cathode)和普通阴极(Conventional cathode)的发射电流, 其中横坐标为阳极膜中心变形量, 纵坐标为阴极总发射电流. 由图看出: (1) 阴极发射电流随阳极膜形变量和阳极电压增加而增大; (2) “曲面阴极”发射电流最大, “台阶阴极”的电流大于“平面阴极”的电流. 新型传感器的阴极发射电流比普通传感器的电流提高一个数量级以上, 从而使传感器输出信号易于检测, 抗噪声能力增强. 此外, 新型传感器在改善输出信号线性、拓宽量程和提高灵敏度等方面优于普通传感器.

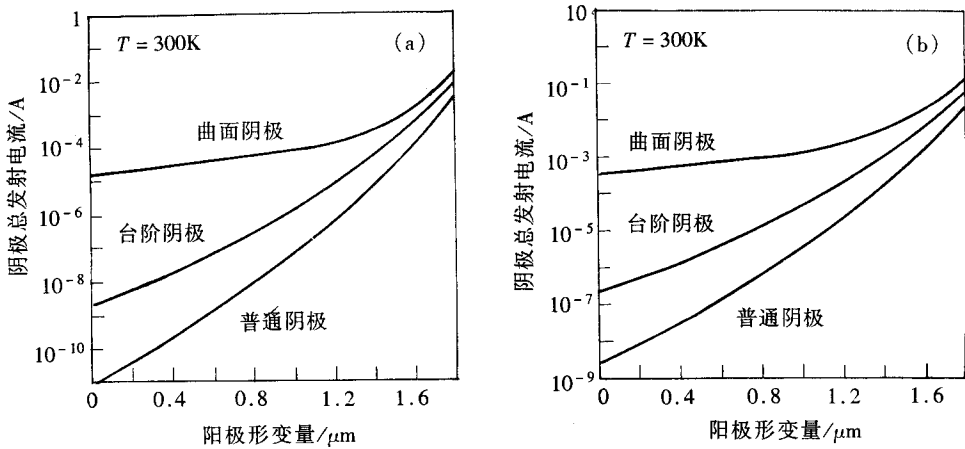


图 4 新型阴极与普通阴极发射电流比较
(a) 阳极电压 250V; (b) 阳极电压 300V.

4 传感器灵敏度的估算

本节估算和比较图 3 所示的三个模型的灵敏度.

灵敏度定义为单位输入所产生的输出. 对于真空微电子压力传感器, 输入量为压力, 输出量为阴极总发射电流, 则灵敏度用公式表示为:

$$S = dI/dP \tag{2}$$

阳极膜的尺寸和厚度根据传感器灵敏度和量程的要求来设计. 设泊松比为 0.3, 在均匀压强作用下方形膜中心形变量由下式计算^[9]:

$$D = 0.0138 (P b^4)/(E t^3) \tag{3}$$

式中 D 为方膜中心的形变量; P 为外加压强; b 为方膜边长; E 为杨氏模量; t 为膜厚. 根据 (3) 式, 可由敏感膜的尺寸和厚度估算待测压强的范围. 精确计算需采用计算机模拟设计.

根据公式 (2) (3), 可由图 4 估算、比较传感器的灵敏度. 由图 4 看出, 当外加压强相同, 即敏感膜中心形变量相等的情况下, 新型阴极发射电流变化量比普通阴极高一个数量级以上, 说明新型传感器的灵敏度大大高于普通传感器的灵敏度.

5 台阶阵列阴极和阳极敏感膜的实验制作

上述的计算机模拟表明, “曲面阴极”是一种理想结构, 但由于工艺条件限制, 这种结构目前不易实现.

台阶阵列阴极的特点是阴极表面呈凹形, 即四周高、中间低, 发射阵列分布在台阶上下. 台阶的高度、中间低凹部分的面积根据设计要求而定. 台阶阵列阴极的制作以前未见报道. 本文作者的实验证明台阶阵列阴极是可以实现的. 作者用两种略微不同的工艺步骤制作了台阶阵列硅尖锥阴极. 图 5 (见图版 I) 为台阶阵列阴极的 SEM 照片, (a) 为一个阵列的全貌, (b) 为台阶阴极的一部分. 台阶高度约 $5\mu\text{m}$, 边缘清晰; 台阶上下均匀分布着大小一致的硅

尖,其尖锥曲率半径约 50nm.

力敏弹性薄膜是感受外力的窗口.从提高传感器灵敏度的角度,希望阳极敏感膜要薄而且均匀.作者采用硅材料设计、制备了阳极薄膜.制作过程包括半导体氧化扩散、MPCVD 生长氮化硅、双面光刻、反应离子刻蚀、Si 各向异性化学腐蚀等,在另一篇文章中作了较详细的报道^[8].图 6(见图版 I)为阳极压力敏感膜的 SEM 照片.选用 n 型<100>双面抛光硅片,在深刻蚀工艺中采用 p⁺阻挡自停止腐蚀法,即在 n 型硅片表面扩散约 10 μ m 的 p 层,从背面 n 区腐蚀至 p 区阻挡自停止.腐蚀出的槽底和槽壁光滑平整,得到均匀、光洁、厚度约 10 μ m 的阳极薄膜.膜厚根据需要控制在 1~10 μ m 范围内.

6 结论

本文提出并研究了新型的“曲面阴极”和“台阶阴极”真空微电子压力传感器.计算、比较了新型传感器与普通传感器的阴极发射电流,表明采用新型阴极有利于提高真空微电子压力传感器的阴极发射电流,从而使传感器输出信号易于检测,抗噪声能力增强,并有利于改善输出信号线性、提高灵敏度和扩展量程.文中简要介绍了台阶阵列阴极和阳极压力敏感膜的制作,并展示了 SEM 照片.传感器封装实验正在进行中.

致谢 本文作者衷心感谢中国科学院院士王守觉先生给予的多方面支持、指导和帮助.

参 考 文 献

- [1] J. C. Jiang *et al.*, *Transducers'91*, 238~240.
- [2] H. C. Lee and R. S. Huang, *Transducers'91*, 241~244.
- [3] 盛剑霓,等,《电磁场数值分析》,北京:科学出版社,1984年.
- [4] S. Xia and A. N. Broers, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 1995, **8**: 109~125.
- [5] X. Zhu and E. Munro, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1989, **7**(6): 1862~1869.
- [6] S. Xia, Ph. D. dissertation, Cambridge University, UK, April 1994.
- [7] P. W. Hawkes and E. Kasper,《Principles of Electron Optics》, Academic Press, 1989, Volume 2: Applied Geometrical Optics, p. 927.
- [8] 陈绍凤,夏善红,等,“真空微电子压力传感器弹性薄膜研制”,中国电子学会第六届学术年会论文集,北京,中国电子学会编辑出版,1996年8月,259~261.
- [9] E. J. Hearn,《Mechanics of Materials》, International Series on Materials Science and Technology, Volume 19, Pergamon Press, 1977, p. 590.

Study and Fabrication of Novel Vacuum Microelectronic Pressure Sensor

Xia Shanhong¹, Liu Jia², Chen Shaofeng¹, Han Jinghong¹ and Cui Dafu¹

(1 *State Key Laboratories of Transducer Technology, Institute of Electronics,
The Chinese Academy Sciences, Beijing 100080*)

(2 *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Received 25 October 1996, revised manuscript received 14 May 1997

Abstract This paper proposes and investigates two new types of vacuum microelectronic pressure sensor, i. e. the sensor with a “stepped cathode” or a “curved cathode” instead of the conventional “flat cathode”. The authors have calculated and compared the emission current of the novel cathodes with that of the conventional cathode. The calculation results show that the new sensors have the advantages of larger cathode emission current, which is easier to detect and less affected by noise. The new sensors also have better linearity of output signals, higher sensitivity and larger measurement range than the conventional vacuum microelectronic pressure sensor. The fabrication of the stepped cathode emission array and the anode pressure sensing film is described, and the SEM photographs are shown.

EEACC: 2340E, 7230, 7320V

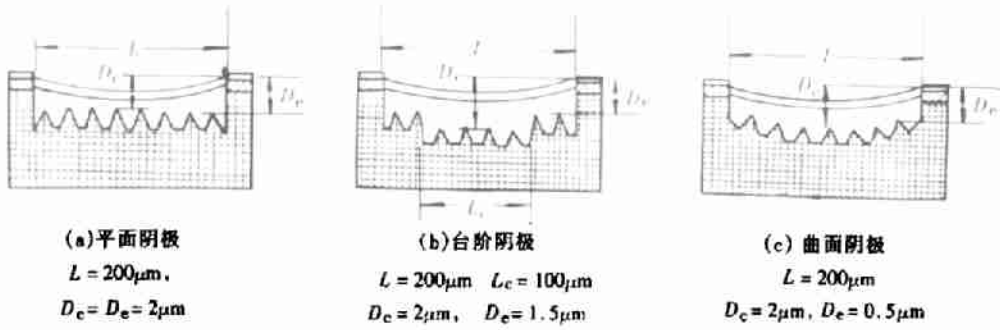


图 3 计算机模拟的传感器模型

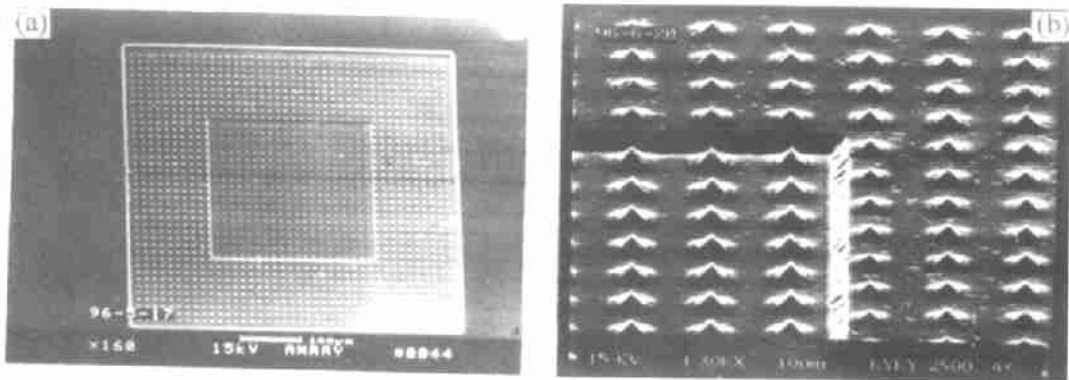


图 5 台阶阵列硅尖锥阴极的 SEM 照片

(a) 一个阵列的全貌；(b) 台阶阴极的一部分。

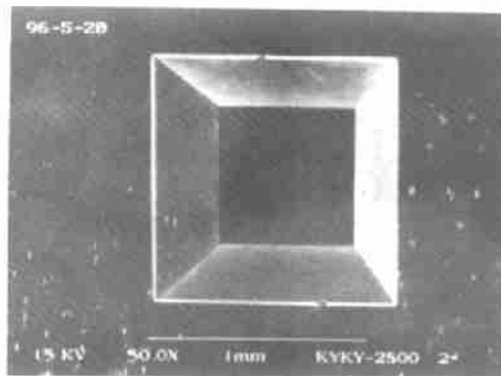


图 6 阳极压力敏感膜的 SEM 照片