

文章编号 1004-924X(2004)06-0603-05

## 真空微电子压力传感器的研制

温志渝<sup>1</sup>,温中泉<sup>1</sup>,徐世六<sup>2</sup>,刘玉奎<sup>1,2</sup>,张正元<sup>1,2</sup>,陈刚<sup>1</sup>,杨国渝<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 光电工程学院,重庆 400044;

2. 中国电子科技集团 第 24 研究所模拟集成电路重点实验室,重庆 400060)

**摘要:**提出了一种带过载保护功能的真空微电子压力传感器。对传感器的压力敏感膜尺寸、阴阳极间距等结构参数进行了分析计算;针对过载保护的问题,在结构上设计了过载保护环,实现了真空微电子压力传感器的过载自保护功能。采用硅的干、湿法结合的腐蚀、氧化锐化和真空键合等工艺技术,成功地研制出传感器实验样品。对传感器实验样品的参数进行了测试分析,其场致发射阴极锥尖阵列密度达 24 000 个/mm<sup>2</sup>,起始发射电压为 0.5~1 V,反向电压 25 V,当正向电压为 5 V 时,单尖发射电流为 0.2 nA,压力灵敏度为 0.1  $\mu$ A/KPa。

**关键词:**压力传感器;过载保护;场致发射阴极锥尖阵列;各向异性腐蚀

**中图分类号:**TP212.1 **文献标识码:**A

## Vacuum microelectronic pressure sensor

WEN Zhi-yu<sup>1</sup>, WEN Zhong-quan<sup>1</sup>, XU Shi-liu<sup>2</sup>, LIU Yu-kui<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Zheng-yuan<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, YANG Guo-yu<sup>2</sup>

(1. College of Photoelectric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Analogous Integrated Circuit Key Lab of No. 24 Institute of China Electronic  
Technology Group, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** A vacuum micro-electronics pressure sensor with the function of overloading protection is brought forward. The analysis and calculation on some structure parameters of the sensor have been done, such as the dimension of pressure sensitive film, the space length between anode and cathode and so on. As to overloading protection, there is a protection ring. Combining of silicon dry corrosion, wet corrosion, oxidizing sharpening and vacuum bonding techniques, a novel vacuum microelectronic pressure sensor was developed. Then, a series of parameters of this sensor has been analyzed and tested. As a result, the density of field emission tip array reaches 24 000 units per mm<sup>2</sup>, the start emission voltage is between 0.5 V to 1 V, the reverse voltage is over 25 V. When the positive voltage is 5 V, the unicuspid emission current is 0.2 nA, pressure sensitivity is 0.1  $\mu$ A/KPa.

**Key words:** pressure sensor; overloading protection; field emission cathode array; anisotropy erosion

收稿日期:2004-10-22;修订日期:2004-11-10.

基金项目:“863”MEMS 重大专项(2002AA404080)资助课题;教育部科学技术研究重大项目(0216)资助课题;重庆市“十五”攻关项目资助课题;微米/纳米加工技术国家重点实验室基金资助课题;国防科技模拟集成电路实验室资助课题。

## 1 引言

压力传感器是一种量大面广的典型力敏传感器,并得到极其广泛的应用。但是,目前多数压力传感器均存在温度稳定性差、信号获取和二次仪表较复杂等不足,很难满足当前高新技术领域的需求。为此,寻找一种温度稳定性好、低电压、功耗小、快响应、体积小的新型压力传感器仍然是人们关注的热点<sup>[1]</sup>。近年来,以场致发射理论为基础开展的真空微电子压力传感器的研究,由于它同时具有真空电子器件和固体器件的优点而备受人们的青睐<sup>[2-4]</sup>。

本文设计了一种带过载保护的真空微电子压力传感器,采用硅的干湿法各向异性腐蚀,氧化锐化、真空键合及阳极膜减薄等工艺技术,成功地研制出真空微电子压力传感器实验样品,经过测试分析表明:这是一种具有过载自保护功能、温度稳定性好、灵敏度高、工作电压低、功耗小、体积小且二次仪表简单等优点的新型压力传感器。文中较详细介绍了这种压力传感器的结构、工作原理、主要研制工艺和试验结果。

## 2 真空微电子压力传感器设计

真空微电子压力传感器的结构如图 1 所示,主要由带过载保护环的硅微场致发射阴极锥尖阵列、真空微腔、绝缘层和阳极弹性膜组成。在阴阳极间加上一定的电压,阴阳极间将形成电场,当阴极锥尖阵列附近的电场达到一定强度时,电子将克服表面势垒溢出阴极锥尖表面而被阳极收集,从而形成正向电流。当阴阳极间的电压恒定时,若在弹性阳极膜上施加一定的压力,阳极膜将发生形变,使阴极锥尖与阳极膜间的距离发生变化,引起锥尖表面附近的电场发生变化,从而使阴阳极间的电流发生变化,通过测量阴阳极间的电流变化便能检测到弹性阳极膜受到的压力大小,当阳极弹性膜所受的压力超过量程时,阳极弹性膜将与过载保护环的顶部接触,从而实现真空微电子压力传感器的过载自保护。

### 2.1 结构设计

由场致发射的理论可知,场致发射的阴极锥尖发射电流为<sup>[5]</sup>:

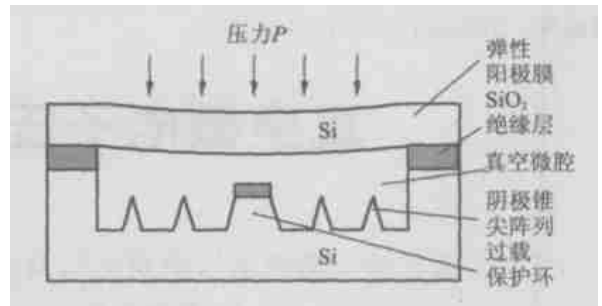


图 1 真空微电子压力传感器

Fig. 1 Vacuum microelectronic pressure sensor

$$J = (1.54 \times 10^{-6} E^2 / \phi^{3/2}) \exp[-6.85 \times 10^7 \phi^{3/2} / E] V(y) J, \quad (1)$$

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

一般情况下,场致发射阴极锥尖附近的电场可用下式表示<sup>[6]</sup>:

$$E = V, \quad (2)$$

式中  $V$  为阴阳极间电压,系数  $V$  为几何放大因子。若锥尖形貌采用抛物面近似,可表示为:

$$V = a / r \ln(d / r), \quad (3)$$

式中,  $r$  为锥尖曲率半径,  $d$  为锥尖尖端到阳极膜的距离,  $a$  为常数。上式表明,  $r$  越小或  $d$  越小则  $V$  越大。为了提高场致发射电流密度,降低起始发射电压,应选取低功函数的阴极发射材料,同时要考虑合适的阴极锥尖的形状、曲率半径和合适的阴阳极间距离。根据现有工艺条件,锥尖曲率半径  $r$  一般能作到 50 nm 左右。因此主要对阴阳极间距离  $d$  进行设计。

确定阴阳极间距离  $d$  必须注意两点。一是要考虑极间的击穿电压,二是要考虑阳极弹性膜受力弯曲的位移大小,在综合考虑以上两种情况下,可以将极间距离  $d$  表示为:

$$d = d_0 - W, \quad (4)$$

式中,  $W$  为弹性阳极膜受力时的变形量,  $d_0$  为弹性阳极膜未受力的极间距离,相当于真空微电子压力传感器正常工作,最大外加电压时的  $\text{SiO}_2$  绝缘层击穿的厚度。因此,  $\text{SiO}_2$  绝缘层临界击穿场强  $E_{\text{SiO}_2}$  应满足下式:

$$E_{\text{SiO}_2} > V / d_0, \quad (5)$$

压力传感器的弹性阳极膜的形变是有限的,可以近似看成是小挠度形变,变形量  $W$  可以根据薄板小挠度理论计算得到。对于正方形弹性膜,在点  $(x, y)$  处的变形为<sup>[7]</sup>:

$$W = \frac{l^4 q}{10^4 H} \cos^2 \frac{(x - \frac{l}{2})}{l} \times \cos^2 \frac{(y - \frac{l}{2})}{l} \begin{cases} 0 \leq x \leq l \\ 0 \leq y \leq l \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $l$  为正方形弹性膜的边长,  $q$  为压强,  $H = Et^3/12(1 - \mu^2)$  为弹性膜的弯曲刚度,  $t$  为弹性膜的厚度,  $E$  为薄板的杨氏模量,  $\mu$  为泊松比。

### 2.2 过载保护设计

压力传感器的设计中的另一关键问题是过载保护的考虑,真空微电子压力传感器的过载保护尤为重要,若不能过载保护,则弹性阳极膜将直接与锥尖接触,造成传感器的失效,主要表现在两个方面:一是,阴极锥尖半径一般都在 50 nm 左右,在阳极膜的挤压下锥尖会折断;二是,锥尖与阳极膜接触后造成短路,瞬时通过锥尖的电流将足够大,以致烧毁锥尖。目前,压力传感器的过载保护用得较多的是从封装或电路出发,这样将大大增加成本和稳定性等。为此,本文从传感器结构出发,在硅微场致发射阴极锥尖阵列中设计了一个过载保护环,该过载保护环略高于锥尖阵列,如图 1 所示。过载保护环表面淀积有一层二氧化硅层,当过载保护环与阳极接触时,以保证其与阳极膜绝缘,此二氧化硅层的厚度也需满足公式(5)的条件。当阳极弹性膜所受的压力超过量程时,阳极膜将和过载保护环的顶部接触,从而实现真空微电子压力传感器的过载自保护功能。若要提高过载保护能力,只需增加过载保护环的尺寸或在阵列中增加过载保护环的个数,由于过载保护环的存在将会减少场致发射锥尖个数,从而影响阴极锥尖阵列总的发射电流和传感器的灵敏度。因而设计保护环时,还须综合考虑过载保护能力和传感器的灵敏度之间的矛盾。

## 3 研制工艺

根据真空微电子压力传感器的工作原理和结构,应用微电子技术和 MEMS 技术实现该传感器的一体化三维集成<sup>[8-9]</sup>。下面简述集成真空微电子压力传感器的主要研制工艺,其核心是传感器芯片的制作,随后根据不同的应用要求按常规封装方法完成封装。其主要工艺流程如下:

A. 真空微电子压力传感器芯片的制作,其工

艺流程如图 2 所示。

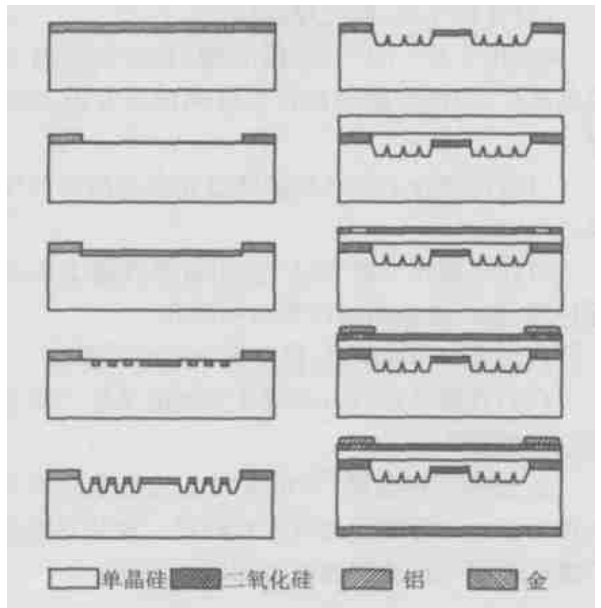


图 2 工艺流程图  
Fig. 2 Process flow diagram

- (1) 根据硅的各向异性腐蚀和所用材料的低功率函数的要求,选用电阻率为 0.5 ~ 1 cm 的 n 型(100)单晶硅片,进行预处理。
- (2) 热氧化生长 1.5 μm 的 SiO<sub>2</sub>。
- (3) 光刻、腐蚀完成过载保护环与硅微场致发射阴极锥尖阵列的一定高差。
- (4) 热氧化生长 SiO<sub>2</sub>, 随后 LPCVD 淀积 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 形成 SiO<sub>2</sub>/ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合膜。
- (5) 光刻、干法腐蚀和湿法腐蚀相结合的方法,初步形成硅微场致阴极锥尖。
- (6) 对阴极锥尖阵列进行氧化锐化处理,随后用 HF 漂去 SiO<sub>2</sub>,形成硅微场致阴极锥尖阵列。图 3 为制作出的锥尖阵列的扫描电镜照片。

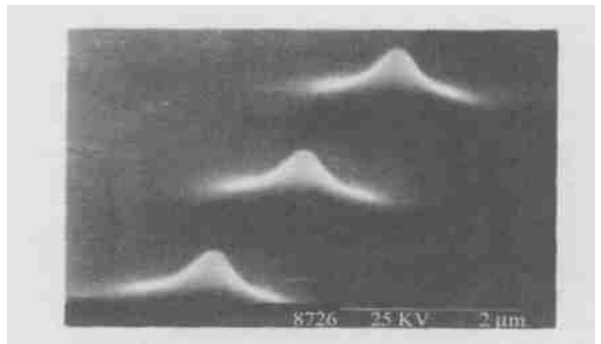


图 3 锥尖阵列照片  
Fig. 3 SEMS of tips

- (7)对阴极锥尖阵列溅射金刚石薄膜。
- (8)背面光刻,形成对位标记。
- (9)用 0.5~1 cm 的 n 型(100)双面抛光单晶硅片,与已形成阴极锥尖阵列的硅片真空键合。
- (10)将键合上的硅片减薄抛光形成阳极弹性膜。
- (11)热氧化生成 SiO<sub>2</sub>,在阳极弹性膜上形成保护膜,随后光刻阳极压焊点引线孔。
- (12)蒸镀 Al,返刻、合金形成阳极压焊点。
- (13)背面溅射 Au,完成真空微电子压力传感器芯片的制作。

B. 根据应用要求,采用常规工艺技术完成真空微电子压力传感器的封装和标定。封装后的真空微电子压力传感器的照片如图 4 所示。

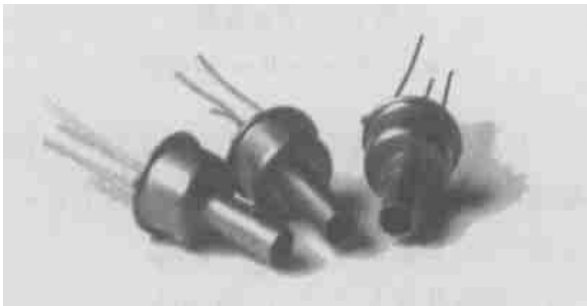


图 4 压力传感器照片  
Fig. 3 Picture of pressure sensor

### 4 测试结果及讨论

用 GH4821 半导体特性图示仪对所研制的真空微电子压力传感器样品进行了测试分析,得到如图 5 所示的场致发射特性曲线。起始发射电压为 0.5~1.5 V,反向电压 25 V;当正向电压

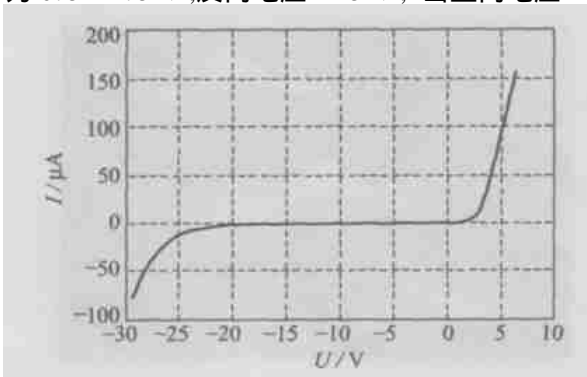


图 5 场致发射特性曲线  
Fig. 5 Field emission characteristic curve

为 5 V 时,单尖发射电流为 0.2 nA。按如图 6 所示的测试系统对真空微电子压力传感器实验样品进行测试,其中压力校验仪采用六位数字的 CST2002 智能数字压力校验仪,压力测试模块为 0~400 KPa。在工作电压 5 V 的情况下,所测真空微电子压力传感器样品的压力-电压关系曲线如图 7 所示。计算得到压力灵敏度为 30.1mV/KPa,非线性度 0.5%。

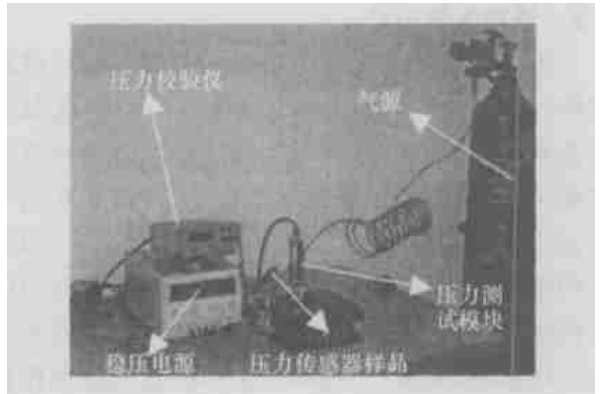


图 6 压力传感器测试系统  
Fig. 6 Pressure sensor testing system

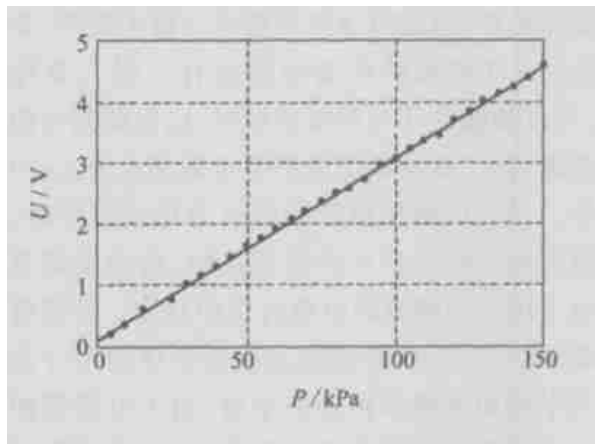


图 7 压力-电压输出特性曲线  
Fig. 7 Pressure-Voltage curve

### 5 致谢

在本真空微电子压力传感器的研制过程中,得到了中国电子科技集团第 24 研究所模拟集成电路重点实验室的陈光炳高工、张正番博士等,第 49 所范茂军研究员等的指导和帮助,在此表示真诚的感谢。

## 参考文献:

- [1] 张晓群,吕惠民.压力传感器的发展、现状与未来[J].半导体杂志,2000,25(3):47-50.  
ZHANG X Q,LU H M. Past, today and future of pressure sensor[J]. *Semiconductor magazine*, 2000, 25(3):47-50. (in Chinese)
- [2] 夏善红.真空微电子传感器研究及进展[J].机械强度,2001,23(4):535-538.  
XIA SH H. Research and development of vacuum microelectronic sensors[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(4):535-538. (in Chinese)
- [3] 钟先信,李建蜀,肖沙里,等.微系统集成技术研究的动向[J].光学精密工程,1998,6(4):1-6.  
ZHONG X X,LI J SH,XIAO SH L, et al. Progress in microsystems integrated technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(4):1-6. (in Chinese)
- [4] LEE H C,HUANG R S. A study of field-emission array pressure sensors[J]. *Sensors and Actuators*, 1992, A34:137-154.
- [5] JIANG J C. Fabrication of micromachined silicon tip transducer for tactile sensing[J]. *J. Vac. Sci. Tech. B.*, 1993, (11):1962-1967.
- [6] FLOWLER R H,NORDEIM L W. Proc R SOC London, 1982[Z].
- [7] LEE H C,HUANG R S. Transducers. 91[Z].
- [8] 张福范著.弹性薄板[M].科学出版社,1984.  
ZHANG F F. *Elastic thin plank*[M]. Beijing: Science Publishing House, 1984. (in Chinese)
- [9] 温志渝,何清义,江永清,等.真空微电子触觉传感器场致发射锥尖阵列的实验研究[J].重庆大学学报,1998,21(4):12-16.  
WEN ZH Y,HE Q Y,JIANG Y Q et al. Study of vacuum micro electronic field emission tactile sensor[J]. *Journal of Chongqing University*, 1998, 21(4):12-16. (in Chinese)
- [10] WEN ZH Y,WU Y. Development of an integrated vacuum microelectronic tactile sensor array[J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, 103:301-306.

作者简介:温志渝(1949-),男,教授,重庆人,重庆大学光电工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为微型传感器与微型分析仪器;

温中泉(1975-),男,重庆云阳人,重庆大学光电工程学院在职博士,主要研究方向为微型传感器、微能源技术。