文章编号：1000-5773(2004)01-0090-04

镱薄膜传感器压阻灵敏度的研究*

滕 林，杨邦朝，杜晓松，周鸿仁，崔红玲，肖庆国

（电子科技大学微电子与固体电子学院，四川成都 610054）

摘要：采用真空蒸发工艺制备镱薄膜传感器，在小于1 GPa压力范围内对未经任何处理和300 ℃真空热处理1 h两组镱薄膜传感器进行准静态加载标定，后者的压阻系数明显高于前者，并且大于箔式镱传感器的压阻系数，结合扫描电镜和电学性能测试分析，发现热处理有助于薄膜晶粒长大，降低薄膜电阻率，从而提高了镱薄膜传感器的压阻灵敏度。XRD测试分析结果表明，加压有促使薄膜晶粒长大的趋势。镱薄膜传感器制作工艺简单、性能稳定，在工业中具有广泛的用途。

关键词：镱薄膜；传感器；准静态加载；压阻系数；热处理；XRD谱

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

自Souers和Jura等人[1]发现稀土金属镱(Yb)具有压阻效应以来，科研工作者就开始对金属镱进行了大量的研究。1970年，Keough[2]提出将镱制成压阻传感器，用于0～3 GPa压力范围的冲击波实验，从此，用镱传感器研究冲击波在固、液介质中的传播特性得到了广泛的应用。1971年，美国在内华达试验场用镱传感器对核爆时凝灰岩中的应力波进行了测量，使镱传感器在爆破测量和防护工程研究跨入了新的历程。随着现代工程应用研究的深入，镱传感器在航天、军事、石油探测等许多领域有着重要的应用。

在0～4 GPa压力范围，金属镱不会发生fcc→bcc相变，其压阻系数约为MnCu的30倍，为碳阻的2倍，因此可认为是0～4 GPa内测量应力波的最佳材料[3]。通常压阻式镱传感器为箔式结构[3～5]，厚度约为50 μm，响应速度慢，难以对存在的滞后现象进行合理解释[2]，采用薄膜工艺制备的传感器，大大减薄了传感器的厚度，减少了冲击波在传感器中的反射路程，可实现纳秒级快速响应，从而提高了传感器的频率响应，对测量时介质的干扰可降低到最小程度。

在静态高压研究中，包封在绝缘材料中的镱压力应严格限制在2.0 GPa以内，超过这个范围，镱响应依赖于封装材料的特性，这个压力值很可能是fcc→bcc相变的先驱[3]。

我们采用真空蒸发工艺，制作全薄膜式镱传感器，由于镱薄膜厚度可以很小，其初始电阻容易设计得比箔式的大5～10倍，通常箔式镱传感器的压阻系数为0.42～0.78 GPa^{-1}[4,5]，我们制作的镱薄膜传感器的压阻系数为0.58～0.83 GPa^{-1}，其压阻灵敏度比箔式传感器有明显提高，且兼备了金属镱材料的压阻特性和薄膜器件的优点，为镱薄膜传感器动态压阻特性的研究奠定了基础。

2 镱薄膜传感器制作

压阻式薄膜镱传感器设计为在位式结构：上下绝缘封装材料采用柔性材料——聚酰亚胺薄膜，中间

* **收稿日期**：2003-07-01；**修回日期**：2003-10-17

基金项目：军事电子预研基金资助项目(AW030412)

作者简介：滕 林(1971—)，男，博士研究生，主要研究方向为电子薄膜材料与器件.

E-mail:tenglin606@sohu.com

是镱薄膜和电极薄膜,其中镱薄膜设计为两端输出的栅形结构(图 1),电极薄膜为 Cu/Ni-Cr 复合结构。银丝焊接在电极薄膜上,作为外引线,实现了敏感元件和内外引线良好欧姆接触。

钽舟作为蒸发源,金属镱薄膜采用掩膜蒸镀在聚酰亚胺薄膜上。主要实验参数为:基片温度 150～160 ℃,真空度 2.4 mPa,蒸发时间 4 min,膜厚 2.0 μm。

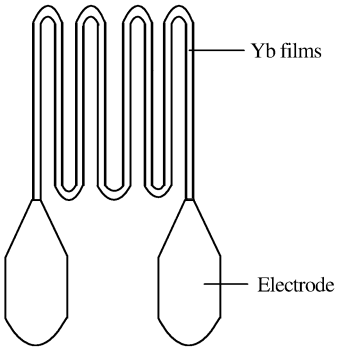


图 1　镱薄膜传感器结构示意图

Fig. 1　The structure of Yb film sensor

3　测量与讨论

纯金属镱(99.99%)的化学特性活跃,其电阻温度系数对环境气氛(温度、加工过程)很敏感。初始镱薄膜的电阻温度系数(TCR)为 1.0×10^{-3}/℃,经过 10^{-3} Pa 量级 300 ℃真空热处理 1 h 后,TCR 增大到 1.3×10^{-3}/℃。

将制做好的镱薄膜传感器放在 AG-25TA 型连续自动压床上进行准静态压阻测量,最大压力为 250 kN,受压面积为 3.14 cm^2。

电阻变化-压力关系曲线如图 2 所示,实验曲线是近似线性的,采用最小二乘法进行拟合,拟合公式为:$\Delta R/R=a+kp+cp^2$,k 为我们所要得到的准静态压阻系数,得到的拟合结果见表 1。

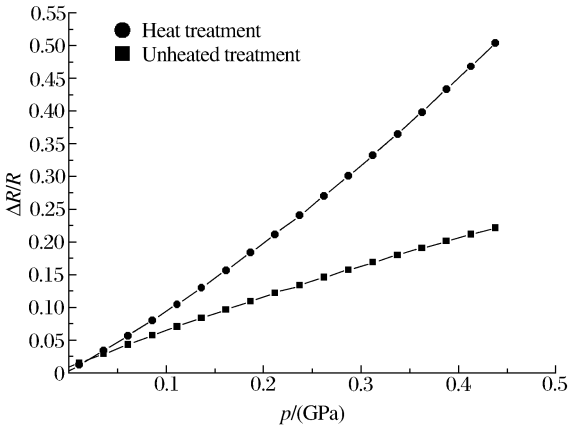


图 2　镱薄膜传感器压阻响应特性曲线

Fig. 2　The piezoresistance response of Yb film sensor

表 1　最小二乘法拟合结果

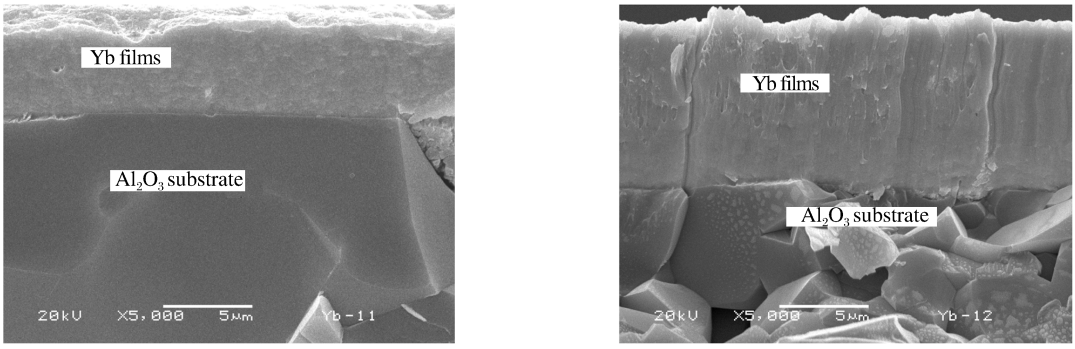
Table 1　The result data by Polynomial Fit

Technological parameters	Unheated treatment	Heat treatment at 300℃ for 1 h in vacuum
$a/(10^{-3})$	9.39	3.72
$k/(GPa^{-1})$	0.57799	0.83252
$c/(GPa^{-2})$	−0.21215	0.71226

与箔式镱传感器相比,金属镱薄膜传感器具有其自身的特殊性,由于薄膜蒸镀在基片上,金属镱的化学特性比较活跃,蒸发参数是制备镱薄膜质量好坏的关键因素。蒸发速率过小,薄膜镱与真空室里残留气体发生反应的几率增大,蒸发速率过大,较大的镱颗粒在蒸发气流的推动下,参与成膜,造成薄膜缺陷增多,薄膜的内应力大,并且蒸发时过高的基片温度会使镱薄膜发生氧化,经过多次实验分析,我们认为,蒸发源在一定几何尺寸下,其蒸发电流在 3.5～4.0 A 之间比较适宜。

薄膜镱传感器电阻随压力的变化关系是由压阻效应和应变效应共同决定的,压阻效应是指当外加压力作用到敏感膜时,引起薄膜电阻发生变化,它与金属薄膜本身的物理性质紧密相关。镱薄膜传感器的初始电阻为 32 Ω,经过 300 ℃、1 h 真空热处理后,其初始电阻下降至 24 Ω,为了对镱薄膜的压阻效应有更深入的理解,我们在同一氧化铝基片上蒸镀镱薄膜,将已镀膜的基片分为两部分,一部分不进行任何处理,另一部分在 2 mPa 的真空环境下、300 ℃温度热处理 1 h,通过对两者断面的 SEM 形貌进行比较(图 3),发现图 3(a)薄膜晶粒细小,晶粒的排列是无序堆积的,图 3(b)是经过 300 ℃、1 h 热处理的薄膜,热处理有助于晶粒的长大,在原始晶粒的基础上出现再次结晶,促使薄膜生长取向一致[6],有效地增大了薄膜晶粒尺寸和结构密度,减少了薄膜内部的缺陷,宏观上导致了薄膜电阻温度系数(TCR)的提

高，电阻率下降，压阻系数明显增大（见图 2、表 1）。Brar 和 Gupta[7] 在研究中发现，不同批次镱箔的压阻特性是不一样的，电阻率大的镱箔由于在轧制过程中存在很多的点阵缺陷，其压阻系数小，文献[8]认为压阻计的灵敏度-压阻系数与其结晶度存在正相关性，晶粒度越大，压阻系数越大，以上观点与本文的实验分析结果相吻合。



(a) Unheated treatment (b) Heat treatment at 300 ℃ for 1 h

图 3 镱薄膜扫描电镜像

Fig. 3 SEM images of Yb films

应变效应是指在外界压力的作用下，引起镱薄膜几何形状发生改变，进而导致薄膜电阻的变化。应变效应的大小主要取决于薄膜结构的致密性和基片材料，实验用的镱薄膜传感器采用聚酰亚胺作为封装材料，这些聚酰亚胺分为预压和未预压处理两批，经过预压处理制做的传感器电阻-压力变化关系稳定，用未经预压处理的聚酰亚胺制做的传感器，在开始加压时，电阻随着压力的增大略有减小，当压力增大到一定程度时，电阻才随着压力的增大而增大。这是因为当压力施加到传感器时，在传感器上产生弹性形变，聚酰亚胺和镱薄膜原本结构疏松，加压促使其结构致密、紧实，当压力大于材料的屈服点后，传感器内部产生塑性形变，电阻随着应变的增大而增大。D. Y. Chen[5] 对箔式镱压阻计进行了准静态装载试验研究，结论与本文的相一致。为了实现传感器的工业用途，保证其压阻性能的稳定，应该事先对绝缘封装材料——聚酰亚胺进行多次预压，以减少形变对传感器压阻特性测量的影响。

采用 X'Pert Pro MPD X 射线衍射仪（Philips Netherlands）对 α-Al_2O_3 基上的镱薄膜进行 XRD 测试，未经处理的镱膜上存在 Yb_3O_4（302）衍射峰（图 5(a)），与在镱膜表面去氧、1 GPa 加压处理后相比较（图 5(b)），两者的 Yb 膜均为单一的 fcc 相，与 L. Spendeler[9] 报道的情况相符合，根据谢乐公式

$$d = 0.89\lambda / B\cos\theta$$

由 Yb(111) 衍射峰半高宽 B 得到薄膜中的晶粒大小 d，计算结果表明，加压有促使膜内晶粒长大的趋势。

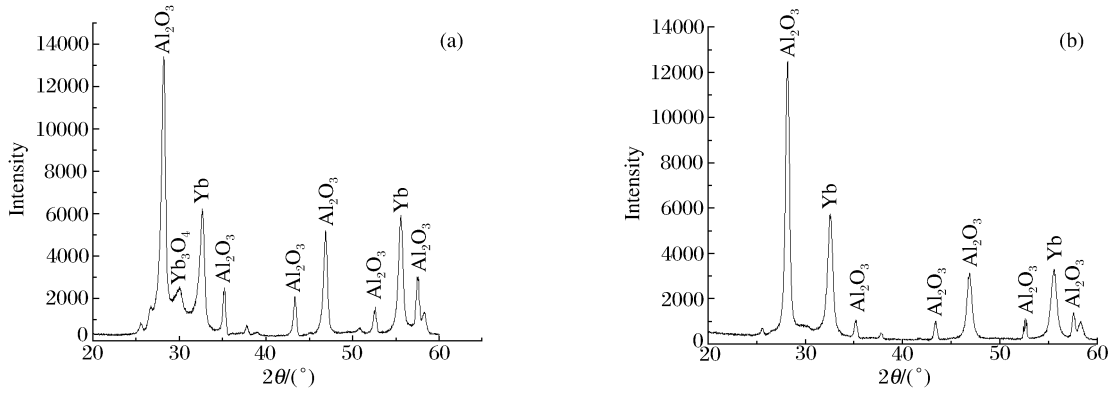


图 4 镱薄膜 XRD 谱

Fig. 4 XRD spectra of the Yb films

4 结　论

(1) 镱薄膜传感器对压力敏感,压阻线性度较好,温度电阻系数较小,在 1 GPa 压力范围内不发生相变,制作工艺简单的特点,决定了该传感器在油井探测(压力从几十兆帕到几百兆帕)等方面有着广阔的应用前景。

(2) 在静态高压研究中,镱薄膜传感器的有效测量范围,不仅取决于金属镱的存在形式、工艺条件,而且还取决于封装材料的特性。

(3) 300 ℃热处理 1 h 增大了镱膜的晶粒尺寸和结构密度,减少了薄膜内部的缺陷,有利于薄膜生长取向一致,提高了薄膜传感器的压阻灵敏度。

References:

[1] Souers D C, Jura G. Semiconducting Region of Ytterbium [J]. Science, 1963, 140: 481－483.

[2] Keough D D. Development of a High-Sensitivity Piezoresistance Stress Transducer for the Low Kilobar Range [R]. DASA01-69-C-0014, 1970.

[3] Gupta Y M. Determining and Modeling the Response of Ytterbium Piezoresistance Transducers [R]. AD-A173-085, 1986.

[4] Gupta Y M, Keough D D, Henley D, et al. Measurement of Lateral Compressive Stresses under Shock Loading [J]. Appl Phys Lett, 1980, 37(4): 395－397.

[5] Chen D Y, Gupta Y M, Miles M H. Quasistatic Experiments to Determine Material Constants for the Piezoresistance Foils Used in Shock Wave Experiments [J]. J Appl Phys, 1984, 55(11): 3984－3993.

[6] Teng L, Yang B C, Cui H L, et al. Improvement of Adhesion between Metallic Films and Substrates [J]. Electronic Components & Materials, 2003, 22(6): 41－44. (in Chinese)
滕　林,杨邦朝,崔红玲等. 金属薄膜附着性的改进 [J]. 电子元件与材料, 2003, 22(6): 41－44.

[7] Brar N S, Gupta Y M. Piezoresistance Response of Different Batches of Ytterbium Foils [A]. Gupta Y M. Shock Waves in Condensed Matter [C]. New York: Plenum Publishing, 1986: 513－518.

[8] Shi S C, Dong S, Huang Y, et al. Crystallization of Plating Manganin Piezoresistance Gauges [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4): 254－258. (in Chinese)
施尚春,董　石,黄　跃,等. 镀膜锰铜压阻计结晶问题研究 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4): 254－258.

[9] Spendeler L, Jaccard D, Sierro J. High Pressure Transport Properties of Pure Ytterbium in the Metallic bcc Phase [J]. Phys Lett A, 1993, 177(4,5): 375－378.

Research on Piezoresistance Sensitivity of Yb Film Sensor

TENG Lin, YANG Bang-Chao, DU Xiao-Song, ZHOU Hong-Ren,
CUI Hong-Ling, XIAO Qing-Guo

(*College of Microelectronics and Solid-State Electronics, UESTC, Chengdu* 610054, *China*)

Abstract: Yb film sensor was fabricated by vacuum evaporation technique, and its performance has been studied under the longitudinal quasi-static loading in the range of 1 GPa. The comparison of two group Yb film sensors, one is unheated treatment and the other is heat treatment at 300 ℃ for 1 h in vacuum, indicates that the piezoresistance coefficient of the heated film is larger than not only the unheated, but also the Yb foils. With the analyses of SEM and electric performance, it is discovered that heat treatment helps to grow crystal, decrease the film resistivity and improve the piezoresistance coefficient. XRD analysis reveals that pressure may promote the growth of Yb crystals. Also, after treatment by pressure (≈1 GPa) Yb film sensors are easy to fabricate and have stable performance, which may have extensive usage in industry.

Key words: Yb film; sensor; quasi-static loading; piezoresistance coefficient; heat treatment; XRD spectra