

阵列式薄膜锰铜计的动态压阻响应研究^{*}

滕林, 杨邦朝, 杜晓松, 周鸿仁, 崔红玲

(电子科技大学微电子与固体电子学院, 四川成都 610054)

摘要: 利用直流磁控溅射薄膜工艺制备阵列式薄膜锰铜压阻计, 以氧化铝作为基片和绝缘封装材料。在结构上, 4个具有相同阻值的薄膜锰铜计在同一氧化铝基片上呈对称分布。51.72 GPa 压力下的动态加载实验表明, 4个计的压阻一致性好, 无高压旁路效应, 验证了薄膜锰铜压阻计动态测试的准确性和可靠性。

关键词: 锰铜薄膜; 压阻系数; 阵列式; 热处理

中图分类号: O521.3

文献标识码: A

1 引言

通常用于冲击压力测量的压阻计有锰铜、镱和碳压阻计三种, 尽管锰铜的压阻系数比后两者小, 但它具有电阻温度系数小、材料组分变化能得到较好的控制、在很宽的应力范围内响应线性度好(压阻系数 K 近为常数)的特点^[1], 由于其自身的材料特性, 决定了锰铜本身直到在 125 GPa 下不发生相变, 可测试 100 GPa 以上的压力^[2], 能适用于高温高压环境的压力测量。

绝缘封装材料的选择对压阻计的测压上限有很大的影响, 有机封装材料在高压下会失去其绝缘性, 相当于一个电阻并联在电路中, 产生高压旁路效应, Al_2O_3 无机封装材料的绝缘性能比有机材料好, 即使在 110 GPa, Al_2O_3 的绝缘电阻率为 $6 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ^[2], 并且其热膨胀系数与锰铜相接近, 锰铜薄膜与 Al_2O_3 陶瓷基片的附着性好, 我们认为 Al_2O_3 陶瓷是超高压压力传感器比较理想的绝缘封装材料。

我们首次采用直流磁控溅射法, 在同一氧化铝基片上制作阵列式薄膜锰铜计, 它由 4 个相同阻值的薄膜锰铜计构成, 其结构呈对称分布(图 1)。实验结果表明, 同一阵列薄膜锰铜计在 51.72 GPa 冲击压力下的压阻系数值分别为 1.81、1.79、1.78 和 1.73, 最大测试误差优于 5%, 从而验证了薄膜锰铜压阻计动态测试的准确性和可靠性。

2 镀膜锰铜计制造

选用 1 mm 厚的 99% Al_2O_3 基片, 分别采用直流磁控溅射方法制备薄膜锰铜计和铜电极。锰铜薄膜厚度为 $3.0 \mu\text{m}$, 铜电极为四引线结构, 厚度为 $4.2 \mu\text{m}$, 以利于四端测量, 减少冲击压缩作用下引线电阻变化引进测量误差。采用自行研制的电子束蒸发台在锰铜薄膜和铜电极上沉积 99.99% Al_2O_3

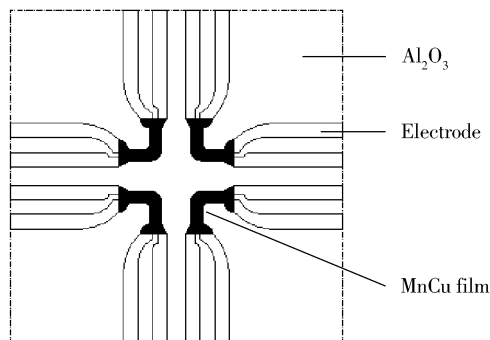


图 1 阵列式薄膜锰铜计

Fig. 1 The array structure of MnCu film gauges

^{*} 收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-12-22

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; 从事薄膜压力传感器的研究. E-mail: tenglin606@sohu.com

薄膜,厚度为 $6.7\ \mu\text{m}$,以保证高压冲击下的绝缘性能。制作的 4 个薄膜锰铜计的初始电阻 R_0 为 $(0.65 \pm 0.02)\ \Omega$ 。 Al_2O_3 薄膜制备的主要参数为:(1) 本底真空 $2.2\ \text{mPa}$;(2) 基片温度 $250\ ^\circ\text{C}$;(3) 电流强度 $80\sim 100\ \text{mA}$;(4) 蒸发时间 $40\ \text{min}$ 。

3 气炮实验和结果

采用西南交通大学高压物理研究所的 $\varnothing 24\ \text{mm}$ 二级轻气炮作为加载工具,铝弹丸在爆炸气体的推动下,撞击铝靶板,在样品中产生高压冲击波。为了确保测试的可靠性,采用后置式结构进行测量,设计的锰铜压阻膜在 $\varnothing 17\ \text{mm}$ 范围内,铝靶和基片的总厚度为 $3\ \text{mm}$,这样沿 45° 角向内侧传播的边侧稀疏波在所希望的测量时间范围内不到达锰铜压阻计,避免了边侧稀疏波对锰铜计的影响,用特种胶将四片 $2.5\ \text{mm}$ 厚的氧化铝基片粘接在锰铜计后部,使得在反射稀疏波到来之前,冲击压缩波信号已经取得,因此避免了边侧稀疏波和反射稀疏波对锰铜计产生干扰,提高了测试精度(图 2),最后用环氧树脂封装、固定,保证整个传感器周围没有空气进入。

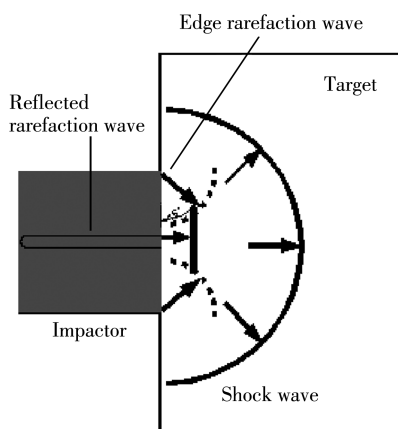


图 2 冲击波衰减机制示意图

Fig. 2 Schematic of shock wave attenuation mechanism

通过 $50\ \Omega$ 同轴电缆将锰铜计连接在恒流源和 TDS684C 数字示波器上,外侧两电极接恒流源, TDS684C 数字示波器接内侧两电极,记录两电极上的电压降,要求恒流源与示波器不共地,接线头用丙酮反复清洗干净,以消除接触电阻及引线电阻对测量的影响。加载电流为 $3\ \text{A}$,不会引起压阻元件过热,因而电信号幅度较低,信噪比较小。

实验采用磁感应测速系统 (MAVIS) 测得飞片碰靶时的速度,铝靶中的应力值由计算公式得到

$$p_x = \frac{\rho_0}{2} \left(C_0 u + \lambda \frac{u^2}{2} \right) \quad (1)$$

式中: u 为弹速, ρ_0 、 C_0 、 λ 分别为铝弹丸和铝靶材料 (LY12 铝) 的初始密度和雨贡纽参数; $\rho_n = 2.78\ \text{g/cm}^3$, $C_0 = 5.33\ \text{km/s}$, $\lambda = 1.34^{[3]}$ 。

根据阻抗匹配法,由界面边界条件等值关系求出波后粒子速度 u_p ,则薄膜锰铜计所受的应力即 Al_2O_3 陶瓷中的应力 δ_n 由下式计算

$$\delta_n = \rho_{0n} (C_{0n} + \lambda_n u_p) u_p \quad (2)$$

式中: $\rho_{0n} = 3.84\ \text{g/cm}^3$, $C_{0n} = 6.13\ \text{km/s}$, $\lambda_n = 2.18^{[4]}$ 。

锰铜计的压阻变化可用 TDS684C 数字示波器上的电平变化来表示

$$(R_G - R_0)/R_0 = (V_p - V_0)/V_0 \quad (3)$$

式中: R_G 、 R_0 分别为锰铜计待测电阻和初始电阻, V_p 、 V_0 分别为应力 δ_n 和常压时的电平。于是锰铜计的压阻系数 K 为

$$K = (R_G - R_0)/R_0 \delta_0 = (V_p - V_0)/V_0 \delta_0 \quad (4)$$

阵列式薄膜锰铜计的压阻系数测试结果见图 3 和表 1。从图 3 看出,4 个锰铜计的讯号起跳不同,且上升沿不一致,可能与弹丸碰撞靶时的碰撞角度稍大有关,也可能与弹丸、靶板表面的光洁度有关系。从表 1 数据看出,在 $51.72\ \text{GPa}$ 冲击压力下,4 个计的压阻系数分别为 1.81 、 1.78 、 1.73 和 1.79 ,最大差别不大于 5% ,说明在实验误差范围内,此种锰铜计是可重复的。

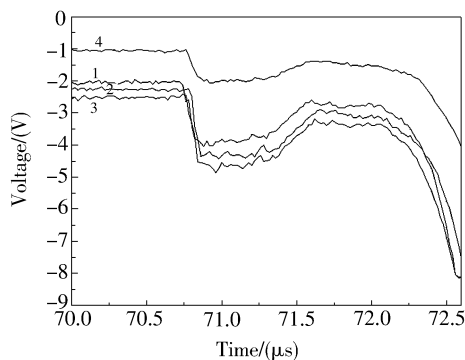


图 3 薄膜锰铜计冲击响应曲线

Fig. 3 Shock response curves of MnCu film gauges

表 1 冲击加载测试结果
Table 1 Results of shock wave loading

No.	Velocity /(km/s)	Pressure/(GPa)		Rising time /(ns)	Life span /(μs)	V_0 /(V)	V_p /(V)	ΔV /(V)	K /(MPa)	Peak pressure width/(μs)	Peak voltage /(V)
		Al	Al ₂ O ₃								
1	3.683	39.96	51.72	60	1.8	2.003	3.883	1.880	18.1	0.625	4.04
2	3.683	39.96	51.72	60	1.3	2.251	4.321	2.071	17.8	0.663	4.43
3	3.683	39.96	51.72	64	1.3	2.501	4.737	2.236	17.3	0.650	4.83
4	3.683	39.96	51.72	65	1.0	1.046	2.017	0.971	17.9	0.638	2.08

4 讨 论

薄膜附着强度是制作薄膜锰铜计的关键技术,我们原来在 SiO₂ 基上制作锰铜计,由于 SiO₂ 与锰铜的热膨胀系数相差较大,两者的附着性比较差,经常出现薄膜脱落的情况,分别采用机械锁合与引进中间过渡层(Ti)的方法制成的薄膜锰铜计^[5],在动态测试中发现,实验曲线不完整,薄膜锰铜计在卸载之前就已经破坏了,改用在 99% Al₂O₃ 基片上溅射的锰铜膜和铜电极非常平整光洁,镀膜的结构牢固,采用垂直拉伸法测得薄膜的附着力大于 44 N,且薄膜致密性好,实验曲线记录了整个装载和卸载过程。

锰铜计压阻系数的大小与锰铜的存在形式、加载方式和工艺条件等紧密相关^[6~8]。薄膜锰铜计由于结构疏松,其压阻系数一般比箔式锰铜计的要小,热处理能增大薄膜的晶粒度,有望进一步提高锰铜计的压阻灵敏度,热处理对镀膜锰铜计性能影响的研究工作有待进行。

锰铜计的压阻效应是由锰铜合金的电子结构变化引起的,我们采用的锰铜靶元素组分为:Cu 86.3%,Mn 11.4%,Ni 2.57%。Ni 的添加使合金对铜热电动势大大降低,改善了电阻温度系数并提高了耐蚀性能^[9],但对锰铜的压阻系数没有贡献。元素锰的存在对锰铜计的压阻响应起决定性作用^[8],过渡金属锰的 d 带与最外层 s 带完全重合,但 d 带是半满的,能态密度大,能容纳较多的电子,且 d 带的最大能级比 s 带的最大能级低,因而容易从外界获得电子,而铜最外层只有一个价电子,容易失去电子进入稳定态。根据休谟-饶塞里定律和合金相的能带理论,铜具有面心立方结构,当融入少量金属锰后,铜中的 $4s$ 电子激发去填补锰原子 $3d$ 带的空位,锰的 $3d$ 电子状态基本上围绕铜离子团运动,形成 γ 固溶体,从而改变了金属的电子结构,宏观上引起了电阻率和压阻性能的变化。这种 $s-d$ 电子跃迁机制在我们制备的 AgMn 合金薄膜压阻计中得到了证实,在相同工艺条件下制备的 AgMn 合金薄膜(Mn 含量 10%左右),其电阻比纯 Ag 大 20~30 倍,静态压阻灵敏度有明显的提高。

5 结 论

(1) 阵列式薄膜锰铜计完好的高压冲击响应性能表明,在严格可重复的工艺流程条件下,以 Al₂O₃ 陶瓷为基质和封装材料的磁控溅射镀膜锰铜计,适合于高压冲击波应力测量,不存在高压旁路效应且有好的重复性。

(2) 膜/基附着性是制作薄膜压阻计的关键,热处理不仅有助于提高膜/基界面的附着性,而且增大了锰铜薄膜的晶粒度。

本工作得到施尚春老师的关心和指导,作者谨致谢意。

References:

[1] Gupta Y M. Stress Measurements Using Piezoresistance Gauges; Modeling the Gauge as an Elastic-Plastic Inclusion [J]. J Appl Phys, 1983, 54: 6256—6266.
[2] de Carli P S. Stress-Gage System for the Megabar Range [R]. [s. l.]; Stanford Research Institute, 1974. 17—19.

- [3] Chi J C, Wu G D. Impact Loading Response of F4/203A MnCu Pressure Gauge [J]. Explosion and Shock Waves, 1983, 3(3): 75—80. (in Chinese)
池家春, 吴国栋. F4/203A 型锰铜压力计对撞击载荷的响应 [J]. 爆炸与冲击, 1983, 3(3): 75—80.
- [4] Nakamura A, Mashimo T. Calibration Experiment of a Thin Manganin Gauge for Shock-Wave Measurement in Solid: Measurements of Shock-Stress History in Alumina [J]. Jpn J Appl Phys, 1993, 32: 4785—4790.
- [5] 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.
- [6] Rosenberg Z, Yaziv D, Parton Y. Calibration of Foil-Like Manganin Gauges in Planar Shock Wave Experiments [J]. J Appl Phys, 1980, 51(7): 3702—3705.
- [7] Gupta S C, Gupta Y M. Experimental Measurements and Analysis of the Loading and Unloading Response of Longitudinal and Lateral Manganin Gauges Shocked to 90 kbar [J]. J Appl Phys, 1987, 62(7): 2603—2609.
- [8] Bernstein D, Keough D D. Piezoresistivity of Manganin [J]. J Appl Phys, 1964, 35(5): 1471—1474.
- [9] Handbook of Functional Materials and Its Application Edited by Group. Handbook of Functional Materials and Its Application [M]. Beijing: Mechanism Publishing Company, 1991. 167. (in Chinese)
《功能材料及其应用手册》编写组. 功能材料及其应用手册 [M]. 北京: 机械出版社, 1991. 167.

Dynamic Piezoresistance Response of Array MnCu Film Gauges

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

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

Abstract: Array MnCu film piezoresistance gauges were fabricated by D. C. magnetism sputtering with 99% Al_2O_3 taken as substrate and insulator. Four MnCu gauges with the same resistance were deposited on one Al_2O_3 substrate symmetrically. Through dynamic loading experiments at the pressure of 51.72 GPa, it is indicated that four piezoresistance gauges have good consistency, and keep insulating trait under high pressure, which verifies the reliability of dynamic testing of MnCu film piezoresistance gauges.

Key words: MnCu film; piezoresistance coefficient; array; heat treatment