

# 磁控溅射制备ZnO压敏电阻电极

## ZnO varistor electrode was prepared by magnetron sputtering

季幼章<sup>1</sup>, 刘佳琪<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031

<sup>2</sup> 苏州博溶新材料科技有限公司 苏州 215200

**摘要:** 磁控溅射是近年来得到广泛应用的成膜方法, 相比于目前电压敏行业中广泛采用的烧银电极, 溅射膜电极具有膜层致密, 厚度均匀, 附着性强等优点。溅射膜电极不管从生产工艺上还是膜层质量上, 都显现出传统的烧银电极不可比较的优越性, 采用磁控溅射制备 ZnO 压敏电阻电极, 将是今后陶瓷金属化的主流技术。

**关键词:** 磁控溅射, 制备, ZnO 压敏电阻, 电极

### 1 引言

ZnO 压敏电阻的电极制备对欧姆接触、焊接性、可靠性等性能有重要的影响, 是制造高性能压敏电阻必须解决的关键问题之一。溅射是近年来得到广泛应用的成膜方法, 相比于目前电压敏行业中广泛采用的烧银电极, 溅射膜电极不仅制备过程绿色环保, 成本低廉, 而且具有膜层致密, 厚度均匀, 附着性强等优点, 溅射膜电极不管从生产工艺上还是膜层质量上, 都显现出传统的烧银电极不可比较的优越性, 毫无疑问, 采用溅射膜电极是今后陶瓷金属化的主流技术。

### 2 二层 (Cr + Cu) 电极

#### 2.1 前言

利用溅射法制备半导体陶瓷表面的电极有着广阔的前景, 但关于溅射膜电极与陶瓷表面的界面机制研究尚鲜有报道。王文婷采用磁控溅射法在 ZnO 压敏陶瓷表面制备了 Cr + Cu 电极, 通过 X 射线光电子能谱等技术研究分析了 Cr/ZnO 的界面反应及界面成分。研究结果表明: 常温下 Cr 膜在氧化锌表面的沉积模式为混态生长模式, 在 Cr 的初始沉积阶段, Cr 价层电子与氧化锌表面存在电子转移作用, 有氧化态的 Cr 生成; 随着覆盖度的增加, 电子转移逐渐减弱, 最后 Cr 完全呈现为金属态的中性吸附。该界面反应生成的化合物对溅射膜电极的欧姆接触, 附着性等性能有重要作用而且能有效阻止电极元素 Cu 或 Ag 的纵向扩散<sup>[1]</sup>。

溅射膜电极通常由过渡层金属和焊接层金属组成, 过渡层一般选用 Cr、Al、Ti 等较活泼的金属, 其与衬底表面

的界面作用对电极的附着力、欧姆接触等起着至关重要的作用, 同时又与焊接层金属形成良好的匹配; 焊接层则选用 Cu 及其合金、Ag 等与焊料浸润良好电阻率低的金属。已有的报道对半导体瓷与溅射膜电极之间的界面机制的研究不够详尽。

本文将对半导体瓷特别是氧化锌压敏陶瓷与溅射膜电极的界面机制开展深入的研究。所制备的溅射膜电极以 Cr 为过渡层, Cu 为焊接层。实验分为两部分, 一是制备 Cr/ZnO 界面, 通过 Ar<sup>+</sup> 离子束刻蚀, 采用 X 射线光电子能谱 (XPS) 研究了 Cr 膜沉积在 ZnO 表面的界面反应; 二是在氧化锌压敏陶瓷表面制备 Cr + Cu 的溅射膜电极, 对压敏陶瓷的电参数、附着力等性能开展比照分析。

#### 2.2 实验部分

##### 2.2.1 Cr/ZnO 界面的制备

由于粉末压制的氧化锌压敏陶瓷其表面粗糙度大, 陶瓷粉体配方中又添加了 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 难以用 XPS 对界面及其成分开展分析, 所以本文采用的 Cr/ZnO 界面样品是在较为平整的纯氧化锌薄膜上溅射沉积 Cr 膜制成的, 同时, 为了防止 Cr 膜暴露大气后表面被氧化, 再在 Cr 膜表面同一个真空室实时镀覆了铝膜对铬膜开展了封闭。实验样品在多靶磁控溅射系统上开展, 在 250℃ 下, 采用反应溅射在经清洗处理的载玻片上制备厚度约为 2μm 的 ZnO 薄膜, 再在 ZnO 薄膜上依次溅射沉积 50 nm 的 Cr 膜和 50 nm 的 Al 膜。所溅射的 ZnO 薄膜经 X 射线衍射 (XRD) 测试分析为多晶构造与氧化锌陶瓷的构造类似, 可以代替氧化锌压敏陶瓷表面。溅射参数为: 本底真空为 3.0×10<sup>-3</sup> Pa, 工作气压为 0.5 Pa, 靶基距为 100 mm。

### 2.2.2 电极的制备

为了评估溅射膜电极的性能,实验选用了国内某电子公司的 ZnO 基压敏陶瓷片 ( $\Phi 14\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ) 作为基片。实验前将基片先后放入去离子水和酒精中各超声清洗 10 min, 烘干后在瓷片表面依次溅镀 150 nm 的 Cr 膜和 3000 nm 的 Cu 膜, 溅射参数同前。

## 2.3 结果与讨论

### 2.3.1 Cr/ZnO 界面机制

样品在多功能电子谱仪上完成光电子能谱的图谱。氩离子束从样品的表面开始刻蚀, 直至刻蚀到 ZnO, 并原位记录能谱。先出现了单质结合态的 Cr 元素, 再出现 Zn 的信号, 到达 Cr/ZnO 界面。表明有氧化态的 Cr 元素存在。Cr/ZnO 界面反应区域的厚度能够根据 Cr 膜的厚度和刻蚀时间推算出来, 约为 15 nm, 也就是说在该区域内为同时含有单质的铬和氧化态的铬的混态生长。

在实际体系中, 由于界面作用随着覆盖度的增加而改变, 使得界面能随着生长的进行由原先的金属与衬底的作用逐渐变化为金属原子之间的作用, 即呈现为混态生长模式。

在真空无氧的情况下, Cr 在 ZnO 表面的氧化应该主要归因于 ZnO 本身释放出来的较弱氧化气氛。但对于半导体而言, 陶瓷表面吸附空气中的氧会与 n 型半导体的载流子 (电子) 之间发生极化作用, 成为高电阻的表面阻挡层。在溅射沉积过程中, 高能粒子轰击基片表面, 还原性较强的 Cr 首先与吸附在基片表面的氧吸附层发生反应, 形成高浓度氧空位, 因而 Cr 与氧化锌压敏陶瓷表面的界面化学反应, 要比 Cr 与纯 ZnO 表面的界面反应激烈得多, 其界面反应区域的厚度也要大于 15 nm。该界面作用对溅射膜电极的欧姆接触, 附着力以及阻挡 Cu 元素纵向扩散起到重要的作用。

### 2.3.2 欧姆接触

氧化锌陶瓷为 n 型半导体, 其表面吸附氧, 产生耗尽层。由于 n 型 ZnO 上形成欧姆接触的金属化技术基于氧解吸附作用和电子隧道效应, 我们可以通过金属与 ZnO 表面发生界面化学反应, 造成 ZnO 表面空位氧增加, 增大隧穿电流, 降低接触电阻率。接触电阻率的公式为;

$$R_c \sim \exp[(2(e_s m^*)^{1/2} / T_a) * (F_B / N^{1/2})] \quad (1)$$

式中  $\epsilon_s$  为介电常数,  $m^*$  为有效质量。由 Bardeen 思想的“钉扎”理论可知, 由于半导体高表面态的锁定, 金属和半导体接触时, 将有电子从金属向半导体表面流动, 但流向

半导体表面的电子并不能改变它的数量级, 半导体的  $E_F$  被钉扎在禁带中某一位置上, 金属与半导体接触的势垒几乎不变。

从上式可得, 对于固定的势垒高度  $F_B$ , 接触电阻率与半导体的掺杂浓度成  $1/N^{1/2}$  的指数关系, 表明半导体表面载流子浓度越高, 接触电阻率越低。

在制备溅射膜电极时, Cr 在氧化锌压敏陶瓷表面生成了 Cr 的氧化物, 使半导体表面积累了大量作为施主的氧空位, 增加表面载流子浓度, 使表面耗尽层变薄, 电子越过势垒顶部产生场发射获得了良好的欧姆接触。

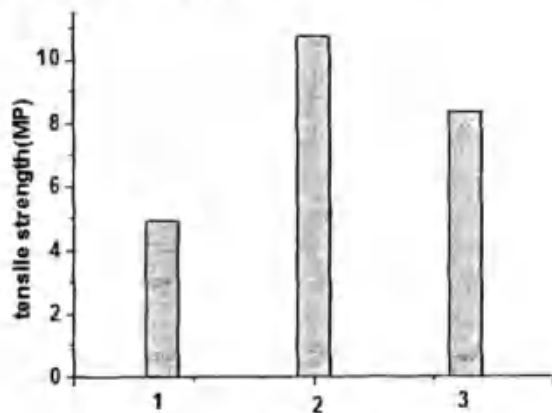
### 2.3.3 界面反应对附着力的作用

通常, 薄膜的附着力包括: 范德华力、机械锁力、化学键力、静电引力等。其中, 只有两种材料界面生产了新的化合物, 化学键力才会存在, 而且较大。

由于在 Cr/ZnO 的界面发生强烈的氧化反应, 生成了 Cr 的氧化物, 使得 Cr 膜与瓷体表面达到化学结合、机械咬合的综合状态, 增强了膜层的附着力。

在溅射膜 Cu 电极、溅射膜 Cr + Cu 电极和烧银电极的氧化锌压敏陶瓷片中, 各随机抽取 20 个作为测量抗拉强度的样品, 其测量结果的平均值就为平均抗拉强度。

三组样品的平均抗拉强度如图 1 所示, 可以看出 Cr + Cu 电机的平均抗拉强度为 10.69 MP, 高于 Cu 电极和烧银电极的平均抗拉强度。



1- 溅射 Cu 电极的 ZnO 陶瓷片; 2- 溅射 Cr+Cu 电极的 ZnO 陶瓷片; 3- 烧银电极的 ZnO 陶瓷片

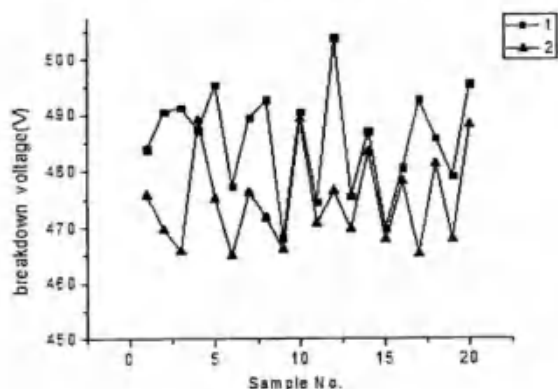
图 1 三组样品的平均抗拉强度

从热力学角度而言, 氧化铬的自由能 ( $-216\text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 要低于铜的氧化物的自由能 ( $-127.2$  或者是  $-142.3\text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 所以溅射沉积时活性高的 Cr (电负

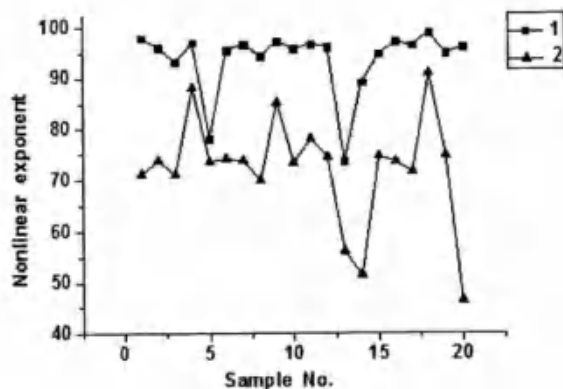
性为 1.6) 比 Cu (电负性为 1.9) 更容易在 ZnO 表面发生氧化反应, 产生化学键力。

## 2.3.4 界面反应阻止电极元素纵向扩散

在制有 Cr + Cu 电极和烧银电极的氧化锌压敏陶瓷片中, 各随机抽取 20 个作为测量压敏电压和非线性系数的样品, 两种样品的压敏电压和非线性系数如图 2、3 所示。可以看出, Cr + Cu 电极的氧化锌压敏电阻器的压敏电压普遍比烧银电极的略高, 非线性系数也要好一些。



1- 溅射 Cr+Cu 电极的陶瓷片;  
2- 烧银电极的陶瓷片  
图 2 两组样品的压敏电压值分布情



1- 溅射 Cr+Cu 电极的陶瓷片;  
2- 烧银电极的陶瓷片  
图 3 两组样品的非线性系数分布情况

这是因为 Cr 与陶瓷表面发生界面化学反应生成了致密的氧化铬, 正是这层氧化铬的存在, 有效地阻挡 Cu 等电极元素向瓷体内扩散, 从而不会降低 ZnO 压敏陶瓷自身

的压敏电压和非线性系数。而烧银电极中的 Ag 会向瓷体内的晶界渗透, 导致瓷片表面一定厚度的区域内界面势垒高度比体内低, 非线性特性较差, 在小电流下, 该区域内每个晶粒上平均压降比体内低。

## 2.4 结论

本文采用磁控溅射法在 ZnO 压敏陶瓷表面制备了 Cr/Cu 电极, 通过 XPS 等技术研究分析了 Cr/ZnO 的界面机制及其作用, 研究结果说明:

(1) Cr 在 ZnO 表面的溅射沉积为混态生长机制, 在 Cr 的沉积初期, Cr 价层电子与氧化锌表面存在电子迁移作用, 有氧化态的铬生成, 该界面反应区域厚度约为 15 nm; 随着覆盖度的增加, 电子转移逐渐减弱, 出现铬与氧化铬的混合态, 最后铬呈现非离子化的中性吸附态。

(2) 由于 Cr/ZnO 陶瓷的界面生成了氧化铬, ZnO 表面积累了大量作为施主的氧空位, 增加载流子浓度, 降低了电阻率, 使溅射膜电极与 ZnO 压敏陶瓷表面形成了良好的欧姆接触。

(3) 由于 Cr/ZnO 陶瓷的界面生成了氧化铬, 存在化学键力, 使 Cr 膜与瓷体表面到达化学结合与机械咬合的综合状态, 增强了膜层的附着力。

(4) Cr/ZnO 陶瓷界面生成的氧化铬, 很好地阻挡 Cu 等金属元素向 ZnO 压敏陶瓷体内的扩散, 溅射膜电极不会减小 ZnO 压敏陶瓷自身的压敏电压和非线性系数。

综上所述, Cr 作为溅射膜电极的过渡层, 与 ZnO 压敏陶瓷界面发生了化学反应, 可以有效提高界面结合力、形成良好的欧姆接触、降低电迁移、改善产品非线性特性等。

## 3 三层电极膜系 (镍铬 / 铜 / 银) 的结构

采用直流磁控溅射工艺实现氧化锌压敏陶瓷的金属化, 陶晔波提出以三层电极膜系 (镍铬 / 铜 / 银) 的结构来获得更优的机械性能和电性能<sup>[2]</sup>。

### 3.1 前言

本文采用直流磁控溅射法来制备 ZnO 压敏电阻表面电极, 并提出以 3 层电极膜系 (镍铬 / 铜 / 银) 组合的结构来获得更好的电性能和可靠性。在这种结构中, 镍铬是直接沉积在 ZnO 陶瓷表面作为过渡层, 保证电极膜与陶瓷基体间具有良好的粘附性; Cu 作为导电层和和中间阻挡层, 在提供良好导电性的同时, 还能阻挡高温焊锡在焊接时对电极层的溶蚀, 并实现过渡层与焊接层材料的匹配; Ag 层作为焊接层和保护层, 可以确保表面电极具有良好的可焊

性，并保护铜层，避免其被氧化。

### 3.2 实验

#### 3.2.1 样品制备

本文采用的 ZnO 压敏电阻型号为 20D681K，直径为  $\Phi 19.3 \sim 19.7$  mm，厚为 2.50 ~ 2.90 mm。实验前先将样品在去离子水中超声清洁约 20 min。烘干后放入 LP-1000B 型立式旋转靶连续自动磁控系统中沉积多层膜电极。实验时，溅射本底真空  $3 \times 10^{-3}$  Pa，工作气压 0.5 Pa，氩气 (99.999 %) 为溅射气体。溅射靶材料分别为 NiCr (Ni,80 %), Cu (99.99 %) 和 Ag (99.99 %), 靶尺寸为 1180 mm $\times$  $\Phi$ 72 mm $\times$  $\Phi$ 54 mm。各项制备参数如表 1 所示。采用金属掩模形成电极形状，电极直径为  $\Phi 15.5$  mm 的圆。NiCr 作为过渡层首先沉积在陶瓷基体表面，然后再沉积 Cu 和 Ag。另外，采用溅射法制备两层电极 (Cu/Ag) 与传统丝印法制备的电极作为对比样品。

表 1 溅射 3 层膜电极的工艺参数

靶材	溅射电压 /V	溅射电流 /A	沉积厚度 /nm
NiCr	450	25	100
Cu	450	25	1700
Ag	450	25	700

#### 3.2.2 测试参数

取每种膜系的样品各 12 片，分别对他们进行测试和表征。采用压敏三参数测试仪 (型号为 MOV TTK-168) 测量 ZnO 压敏电阻的压敏电压、非线性系数和漏电流参数。施加峰值电流 3 kA 的 8/20 $\mu$ s 冲击波试验压敏电阻的耐受通流能力。拉力仪 (K-50) 测试电极膜与陶瓷基体间的附着力。高温负荷寿命试验是在 125oC 环境下，对压敏电阻持续施加最大允许交流电压 100 h，测量计算试验前、后压敏电压的变化率。

### 3.3 结果与讨论

#### 3.3.1 机械性能

(1) 薄膜与基体的附着力可用单位面积上所承受的垂直拉力，即抗拉强度来表征。图 4 为采用不同工艺制备的膜层电极的平均抗拉强度，相比丝印电极和两层溅射电极，磁控溅射 3 层电极具有更优的附着力。

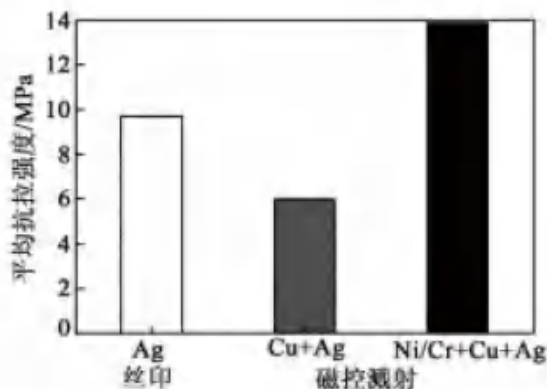


图 4 丝印烧结工艺和溅射金属化膜层的平均抗拉强度比较

由图 4 可知，NiCr/Cr/Ag 膜层的平均抗拉强度为 13.9 MPa，明显大于 Ag 的 9.7 MPa 和 Cu/Ag 的 6 MPa。这是因为在溅射工艺下，离子轰击产生的高能金属原子 Cr 在沉积初期与瓷体表面发生了界面化学反应，生成了厚约 10 nm 的铬的化合物。界面间形成的化学键力增强了 Cr 与 ZnO 压敏陶瓷表面的粘附力，Cr 层与瓷体表面达到了化学结合、机械咬合的综合状态，使电极膜层与基体的附着力远大于丝网烧结银电极。而根据金属的还原能力  $Cu > Ni > Cr$ ，Cr 更易捕捉界面处的空位氧而发生氧化反应，形成化学键，故膜层与基体附着力相对较大。但由于 NiCr 沉积的膜层残余应力较小，且更易做成柱状旋转靶，因此选择 NiCr 合金作为过渡层金属。

(2) 陶瓷与金属膜层间热膨胀系数的匹配程度、膜层间的应力等。如表 2 所示，Cr 在界面处发生化学反应形成的  $Cr_2O_3$  具有与 ZnO 陶瓷相近的热膨胀系数，从而降低膜层和基体间的内部应力。另外，NiCr、Cu 和 Ag 也有着相匹配的热膨胀系数，电极膜层间内应力较小。而丝印电极是由于银浆会在陶瓷内部扩散从而导致电极与 ZnO 陶瓷的附着力提高。

#### 3.3.2 电气性能

磁控溅射电极和烧银电极的主要电性能参数如表 3 所示。

表 2 不同材料的热膨胀系数

热膨胀系数 ( $10^{-6}/^{\circ}C$ )	ZnO	Ag	Ni/Cr	Cu	$Cr_2O_3$	$Cu_2O$
	6.51	29.5	14.3	16.5	6.5	3.5

表 3 不同电极的 ZnO 压敏电阻的电性能参数

电极材料	电极厚度 / $\mu\text{m}$	压敏电压 /V	$\alpha$	漏电流 / $\mu\text{A}$	$\Delta V_1$ /%	$\Delta V_2$ /%
Ag(丝印)	10.0	719	66	1.95	5	1.32
Cu/Ag(溅射)	2.3	759	96	0.97	2	无
NiCr/Cu/Ag(溅射)	2.4	758	96	0.90	2	0.61

### (1) 压敏三参数

溅射工艺制备的二、三层电极的压敏三参数相近，都明显优于烧银电极。由表可知，相比丝印电极，采用磁控溅射样品的  $\alpha$  和压敏电压分别增加 45.5 % 和 5.6 %，漏电流降低了 53.8 %。

(2) 不同金属化工艺的样品均能通过 8/20 $\mu\text{s}$  大电流冲击试验。表中， $\Delta V_1$  为 8/20 $\mu\text{s}$  冲击前后的压敏电压变化率， $\Delta V_2$  为高温负载试验后压敏电压变化率。

(3) 如图 5、6 所示，丝印电极的器件压敏电压和非线性系数分布相对较低，这是因为在丝印烧银过程中，银浆中的 Ag 和 Pb<sub>2+</sub> 沿晶界向瓷体内部晶界层扩散，导致陶瓷表面一定厚度的区域内界面势垒高度比体内低，区域内晶粒平均压降比内部低。

(4) 离子扩散使得在界面处形成缺陷，非线性变差。而在磁控溅射过程中，高能粒子轰击陶瓷表面，吸附界面处的空位氧，消除了表面缺陷，生成了致密的氧化层。氧化层的存在可以有效阻止 Cu 扩散进入 ZnO 陶瓷体中，从而导致压敏电压，特别是  $\alpha$  的大幅增加。丝印工艺的高温退火过程虽然一方面有助于修复部分晶格损伤，但二次热处理过程增加了 ZnO 压敏电阻的静态漏电流。丝印电极和溅射三层膜电极的压敏电压变化率分别为 1.32 %，0.61 %。

(5) 溅射法制备的三层膜电极提高了压敏电阻的可靠性，这可能是由于采用低温溅射法制备的电极缺陷少，过渡层与基体间发生反应生成了阻挡层，能有效避免金属原子对陶瓷产生的不利影响，使陶瓷性能更稳定。

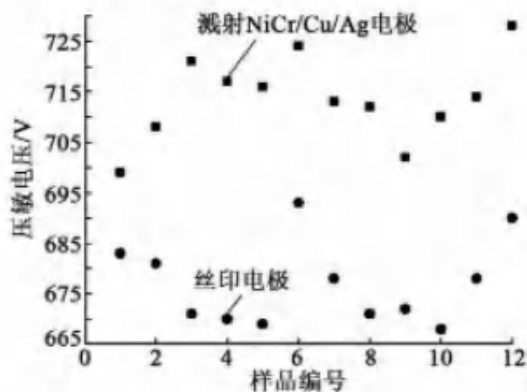


图 5 两组样品的压敏电压值分布情况

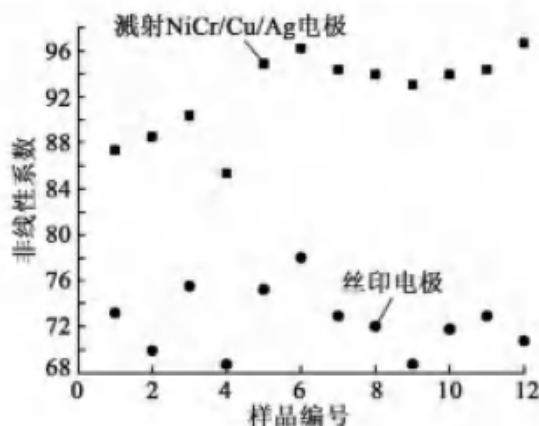
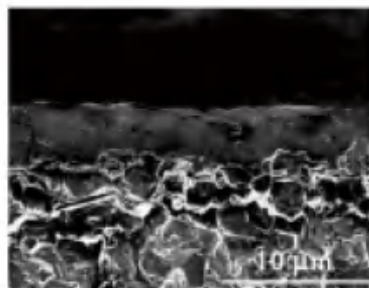
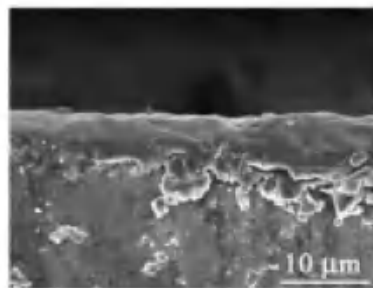


图 6 两组样品的非线性系数分布情况

### 3.3.3 微观结构



(a)



(b)

(a) 溅射 NiCr/Cu/Ag 电极；(b) 丝印电极  
图 7 不同样品的膜层断面 SEM 图

对样品进行扫描电镜 (SEM) 断面结构分析, 其中磁控溅射的样品选用 NiCr/Cu/Ag 膜系。图 7 为溅射工艺和丝印烧结工艺制备的膜层断面微结构图。由图可见, 采用磁控溅射工艺制备的电极, 膜层更均匀、致密, 且与陶瓷基底的界面更清晰。良好的微观结构使磁控溅射工艺表现出更佳的机械及电学特性。

### 3.4 结束语

- (1) 膜层附着力可以从 9.7 MPa 提高到 13.09 MPa ;
  - (2) 器件非线性系数和压敏电压分别增加 45.5 % 和 5.6 % ;
  - (3) 漏电流降低 55 % ;
  - (4) 经过 125℃、100h 的高温负荷寿命试验后, 压敏电压变化率从 1.32 % 降低到 0.61 %。
- 附着力与电性能更优是由于磁控溅射法制备的膜电极

与陶瓷基底间有着良好的界面接触和匹配, 且界面处形成的氧化层有效阻挡了金属元素向磁体内部渗透。

对于氧化锌压敏电阻, 磁控溅射法制备的三层膜电极的电气性能、机械性能和可靠性均远优于烧银电极, 具有良好的应用前景。

### 参考文献

- 1 王文婷, 陶晔波, 王德苗. 溅射膜电极与氧化锌基压敏陶瓷的界面机制研究. 真空科学与技术学报, 第34卷第6期, 2014年6月, 250~258
- 2 陶晔波, 徐晓, 金浩, 冯斌, 王德苗. ZnO压敏陶瓷溅射金属化的研究. 压电与声光, 第38卷第4期, 2016年08月, 603~606

上接47页

表7 三种不同比例的粗细粉混合后成品产出电性良率

搭配类别	试验规格型号	黑片投入 (kpcs)	铜芯片产出 (kpcs)	铜芯片电性良率 (%)	成品产出 (kpcs)	成品产出电性良率 (%)
A	C14D561K	5.00	4.85	97.00	4.79	98.76
B		5.00	4.96	99.20	4.92	99.19
C		5.00	4.95	99.00	4.86	98.18

### 8 结论

- (1) 在配方中加入一定量的抗还原性气氛的材料可以减少氧分子的流失, 提升产品良率。
- (2) 改善粉体特性, 可以减少填充过程中产生的拱桥空腔和气体空间, 增加粉末成型的致密性和烧结致密性, 减少气孔率, 从而也可以降低外来物质对瓷体的侵蚀, 提升产品良率。

### 参考文献

- 1 康雪雅, 陶明德, 涂铭旌. 多元纳米压敏陶瓷粉体的 sol-gel 合成与表征[J]. 电子组件与材料, 2003年3月第3期: 13~15.
- 2 陈艺锋, 唐谟堂, 张保平, 扬声海. 湿法合成氧化锌压敏电阻粉体的现状与展望[J]. 电子组件与材料, 2004年1月第1期: 23~26
- 3 宋建军, 曹全喜, 李智敏. ZnO压敏电阻器性能的改进[J]. 电子组件与材料, 2005年10月第10期: 42~44
- 4 T.Takemura, et al. Effect of Bismuth Sesquioxide on the Characteristics of ZnO Varistor.

- J.AmCeram Soc, 1986, 69(5): 430~436
- 4 T.Takemura, et al. Effect of Bismuth Sesquioxide on the Characteristics of ZnO Varistor. J.AmCeram Soc, 1986, 69(5): 430~436
- 5 T.Takemura, et al. High-temperature X-ray Diffraction Measurements of ZnO Varistor Ceramics Jph. J. Appl. Phys, 1981, 25(2)
- 6 T.K.Gupta and W.G.Carlson. A Grain Boundary Defect Model for Instability/Stability of a ZnO Varistor. J.Mater.Sci, 1985, 20:3487
- 7 姚政, 郑嘹赢, 李国荣, 蔡闻捷, 李玉科. 热处理对 ZnO压敏电阻器电学性能影响的研究. 电瓷避雷器, 2009年第5期: 28~35
- 8 王建文, 杨明, 郭亚平. ZnO压敏电阻器热处理工艺与其耐冲击性能关系的研究. 电瓷避雷器, 1997年第5期: 39~42
- 9 侯清健, 徐国跃, 赵毅, 唐敏. 烧结温度和热处理对 ZnO压敏陶瓷的影响. 电瓷避雷器, 2004年第5期: 36~42