

引文格式:

蔡亚丽, 刘丽霞, 戴文斌, 等. 高温高湿环境下镍铬合金薄膜电阻器失效分析 [J]. 集成技术, 2022, 11(5): 88-98.

Cai YL, Liu LX, Dai WB, et al. Failure analysis of Ni-Cr film resistor in high temperature and high humidity environment [J]. Journal of Integration Technology, 2022, 11(5): 88-98.

# 高温高湿环境下镍铬合金薄膜电阻器失效分析

蔡亚丽<sup>1,2</sup> 刘丽霞<sup>1</sup> 戴文斌<sup>1</sup> 俞亮<sup>1</sup> 岳文锋<sup>1</sup> 张冲<sup>1,2</sup>

郭全胜<sup>2</sup> 贾婷婷<sup>1\*</sup> 于淑会<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>2</sup>(湖北大学材料科学与工程学院 武汉 430062)

**摘 要** 在 85 °C 和 85% 相对湿度的环境下, 对镍铬 (Ni-Cr) 合金薄膜电阻器进行带载老化试验 (“双 85” 老化试验), 测试其老化试验 3 000 h 后的可靠性。测试结果显示, 在 “双 85” 老化试验环境下, 薄膜电阻器进行老化试验后, 表现出两种失效模式: 阻值漂移和开路。该文进一步对两种失效模式的失效机理进行分析, 阐明了失效的原因。针对失效的薄膜电阻, 采用 3D 共聚焦激光显微镜、扫描电子显微镜、X 射线能谱仪和聚焦离子束等分析手段进行检测, 检测结果显示, 薄膜电阻器的端电极处出现开裂。进一步对失效部位进行分析发现, 电极层除开裂等明显问题外, 还出现了银电极被硫化腐蚀的情况。

**关键词** Ni-Cr 合金; 薄膜电阻器; “双 85” 老化试验; 失效模式

**中图分类号** TM 544 **文献标志码** A **doi:** 10.12146/j.issn.2095-3135.20220221001

## Failure Analysis of Ni-Cr Film Resistor in High Temperature and High Humidity Environment

CAI Yali<sup>1,2</sup> LIU Lixia<sup>1</sup> DAI Wenbin<sup>1</sup> YU Liang<sup>1</sup> YUE Wenfeng<sup>1</sup> ZHANG Chong<sup>1,2</sup>

GUO Quansheng<sup>2</sup> JIA Tingting<sup>1\*</sup> YU Shuhui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>2</sup>(School of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

\*Corresponding Author: tt.jia@siat.ac.cn

**Abstract** The reliability of Ni-Cr alloy thin film resistors were tested by an aging test under an

收稿日期: 2022-02-21 修回日期: 2022-04-16

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2020B1515120019); 深圳科学技术创新委员会项目 (KQTD20170810160424889)

作者简介: 蔡亚丽, 硕士研究生, 研究方向为贴片电阻; 刘丽霞, 助理工程师, 研究方向为贴片电阻失效分析; 戴文斌, 硕士研究生, 研究方向为氧化铅基薄膜; 俞亮, 硕士研究生, 研究方向为贴片电阻失效分析; 岳文锋, 硕士研究生, 研究方向为贴片电阻; 张冲, 硕士研究生, 研究方向为贴片电阻; 郭全胜, 副教授, 博士, 研究方向为微纳电子材料及器件; 贾婷婷 (通讯作者), 副研究员, 博士, 研究方向为多功能材料及器件, E-mail: tt.jia@siat.ac.cn; 于淑会, 研究员, 研究方向为电介质材料。

environment of 85 °C and 85% relative humidity for 3 000 h. The results show that the thin-film resistors exhibit two failure modes, resistance drift, and open circuit, after aging tests at 85 °C and 85% relative humidity. The failure mechanism of both failure modes was further analyzed, and the causes of failure were clarified. The failed resistors were examined by a 3D laser scanning microscope, scanning electron microscope, energy dispersive spectroscopy, and focused ion beam to analyze the cause of resistor failure. The results show that there is a crack in the terminal electrode of the film resistor. In addition to the obvious problems such as cracking, the electrode layer also showed sulfide corrosion of the Ag electrode.

**Keywords** Ni-Cr alloy; thin-film resistor; 85 °C and 85% relative humidity aging test; failure mode

**Funding** This work is supported by Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2020B1515120019), and Shenzhen Science and Technology Innovation Commission (KQTD20170810160424889)

## 1 引言

电阻作为电子工业的黄金配角, 每年消耗量巨大。随着电子信息产业的不断发展, 电阻市场将继续扩大。如图 1 所示(来自华经产业研究院 2020 年电阻行业分类及市场规模分析), 在 2019 年电阻市场中, 中国台湾国巨、日本 KOA、日本罗姆以及日本松下企业占据了 55% 的市场份额, 2020 年中国台湾和日本企业的市场占有率扩大到 64%。在电阻器件市场上, 中国台湾和日

本企业占据市场份额较大, 中国大陆企业虽然已经获得了长足发展, 但与其他企业的差距仍在扩大。中国大陆企业生产的薄膜电阻种类较少且可靠性低, 主要占领中低端电阻市场。就高端电阻市场而言, 中国大陆企业的市场占有率仍需大力提升。

在电子组件微型化发展的过程中, 组件尺寸的缩小主要集中在减少 X 轴和 Y 轴的尺寸。随着科学技术的不断发展, 相关研究者们考虑通过减小 Z 轴的尺寸, 达到缩小组件尺寸的目的, 因

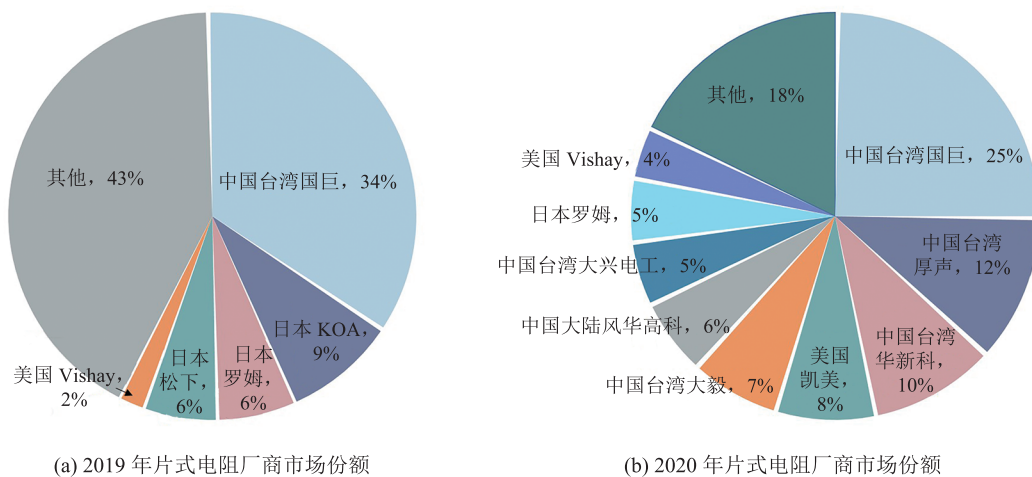


图 1 2019 和 2020 年片式电阻厂商市场份额分布

Fig. 1 Market share distribution of chip resistor manufacturers in 2019 and 2020

此, 高端薄膜电阻进入了人们的视野<sup>[1]</sup>。与扩散电阻、注入电阻相比, 高端薄膜电阻具有更高的方块电阻 ( $R_s > 1\ 000\ \Omega$ )、更好的稳定性(标准偏差  $\leq 1\%$ , 温度系数  $\leq 3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )和更强的抗辐照强度, 在高低温、潮湿环境中都表现出优良的性能, 因此, 在航空、航天、通信、汽车电子、医疗设备、导航系统等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

近年来, 由于外部力量的技术封锁, 中国大陆的技术突破和产业升级明显阻滞, 导致高端电阻技术出现“卡脖子”问题<sup>[2]</sup>。想要研制出微型高端电阻, 达到“超小尺寸、超薄介质、高精度、高可靠”等技术要求, 需突破层层技术关卡, 如高精密陶瓷基板划片技术、高精度印刷技术、高精度封端技术、高精度阻值控制技术以及高精密激光雕刻成型技术等。这一系列电子材料以及工艺等技术短板问题, 如同挡在中国大陆高端电阻领域面前的座座高山<sup>[2-3]</sup>。为早日摆脱掣肘, 发展高端薄膜电阻器必须以电阻失效分析为落脚点, 解决相关电子材料和工艺等技术问题。

片式电阻一般可分为厚膜电阻和薄膜电阻。厚膜电阻是经过丝网印刷、烘干、烧结、调阻、检测等工艺制备而成, 膜厚一般大于  $10\ \mu\text{m}$ 。其阻值范围广、可靠性高和尺寸小, 因此被广泛应用于各种电子产品, 在电阻器中使用占比  $90\%$  以上<sup>[4-7]</sup>。薄膜电阻通常采用真空蒸发、磁控溅射等方法, 将一定电阻率的材料蒸镀于陶瓷基板表面制成, 膜厚可低至  $1\ \mu\text{m}$  及以下。与厚膜电阻相比, 薄膜电阻具有更高的阻值精度和更低的温度系数, 其阻值更为稳定<sup>[8-9]</sup>。市场上商用薄膜片式电阻器的电阻膜层主要为 Ni-Cr 合金, 其经精密加工处理后, 阻值精度可达  $\pm 0.05\%$ , 温度系数为  $\pm 5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 是替代低精度厚膜片式电阻器和传统高精度、高稳定柱状带引线电阻器的理想产品<sup>[10-12]</sup>。近年来, 随着电子设备向短小轻薄的发展方向发展, 电子元器件的集成程度越来越高, 片式电阻器也趋向于在高温高湿的环境下工

作, 这对片式薄膜电阻带来了新的挑战<sup>[13]</sup>。片式电阻器的使用环境在温度、湿度等方面恶化严重, 这给片式薄膜电阻的长期使用带来了不利影响<sup>[14]</sup>。目前, 对薄膜电阻做系统的失效分析仍存在一定难度。一方面, 薄膜电阻器尺寸较小, 涉及多个界面、多种材料和工艺, 尤其是 Ni-Cr 合金膜层较薄(通常为几十到几百纳米)<sup>[15]</sup>, 即使失效也很难找到失效位点, 失效分析困难, 因此, 对于薄膜电阻的失效分析较少<sup>[16-18]</sup>; 另一方面, 失效分析手段缺乏统一的标准流程, 对于失效机理的探索尚不清晰<sup>[19-23]</sup>。

近年来, 一些学者对电阻的失效机理和器件封装做了相关研究。畅玢等<sup>[24]</sup>对一实际案例中阻值增大的电阻器样品进行失效分析, 确定其失效是电阻器硫化所致。赵宇翔等<sup>[25]</sup>对实际应用中片式电阻器的阻值开、短路问题进行失效分析, 确定阻值开路是银金属氧化和电极起翘所致。范士海<sup>[26]</sup>在表贴电阻典型的失效模式及机理分析中提到, 端电极与电阻本体间断开会造成银层断裂, 导致电阻开路。Wang等<sup>[27]</sup>通过研究涂层层对电阻的保护作用, 得出酚醛树脂/环氧树脂涂料保护层在高温高湿环境下易腐蚀, 进而破坏电阻内部的结论。以上研究表明, 电阻的失效机理复杂多样以及器件封装的重要性。“双 85”老化试验, 即按照国家标准 GB/T 2423.50—2012 的要求, 设置环境条件为  $85\ ^\circ\text{C}$  和  $85\%$  相对湿度(Relative Humidity, RH), 主要是为了检验高温高湿的环境对产品性能的影响。相关学者常用“双 85”的试验条件测试产品的性能, 如 Romero 等<sup>[28]</sup>在“双 85”试验条件下, 对多层聚合物铝电解电容器的可靠性进行研究, 并深入探究了电容器的主要故障模式。Matsui 等<sup>[29]</sup>在“双 85”实验条件下, 对钙钛矿太阳能电池在应力测试中的效率和热稳定性进行研究, 从而确定电池的相关优化参数。Iqbal 等<sup>[30]</sup>在“双 85”条件下, 研究了碱金属氧化物对白光二极管玻

璃封装材料中磷的可靠性和降解的影响。因此,“双 85”老化试验是测试薄膜电阻可靠性的常用方法。基于现存的问题和相关学者的研究成果,本文对 Ni-Cr 薄膜电阻可靠性(老化试验)测试和失效( $\Delta R\% \geq \pm 5\%$ )分析进行研究。具体地,在“双 85”试验条件下,对薄膜电阻器进行带载老化试验,测试其耐湿热性能。在“双 85”老化试验期间,定期监测电阻阻值变化,同时对失效电阻进行分析表征,寻找失效机理。

## 2 实验

图 2 为本实验薄膜电阻结构,其由陶瓷基板、电阻体、环氧树脂层、保护层、端电极和字码等部分构成。其中,端电极部分包含面

电极银/钯(Silver/Palladium, Ag/Pd)、侧电极镍/铬(Nickel/Chromium, Ni/Cr)、中间电极镍(Nickel, Ni)和外电极锡(Stannum, Sn)<sup>[19]</sup>。实验选用的薄膜电阻器型号为 1206 商用电阻,共 50 个样品,阻值均为 1 M $\Omega$ ,阻值精度为  $\pm 0.1\%$ ,额定功率为 0.25 W。本次实验采用恒压恒流电源(北京汉晟普源科技有限公司,型号 HSPY-200-1)和恒温恒湿试验箱(爱斯佩克试验仪器(广东)有限公司,型号 GPS-3)提供“双 85”老化试验环境,采用六位半电阻计(泰克科技有限公司,型号 DMM4050)实时测量样品阻值。实验流程如图 3 所示,通过记录样品阻值,建立电阻数据库。首先,将电阻焊接到印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)上,并固定在自制基板上。然后,将电阻放入恒温恒湿

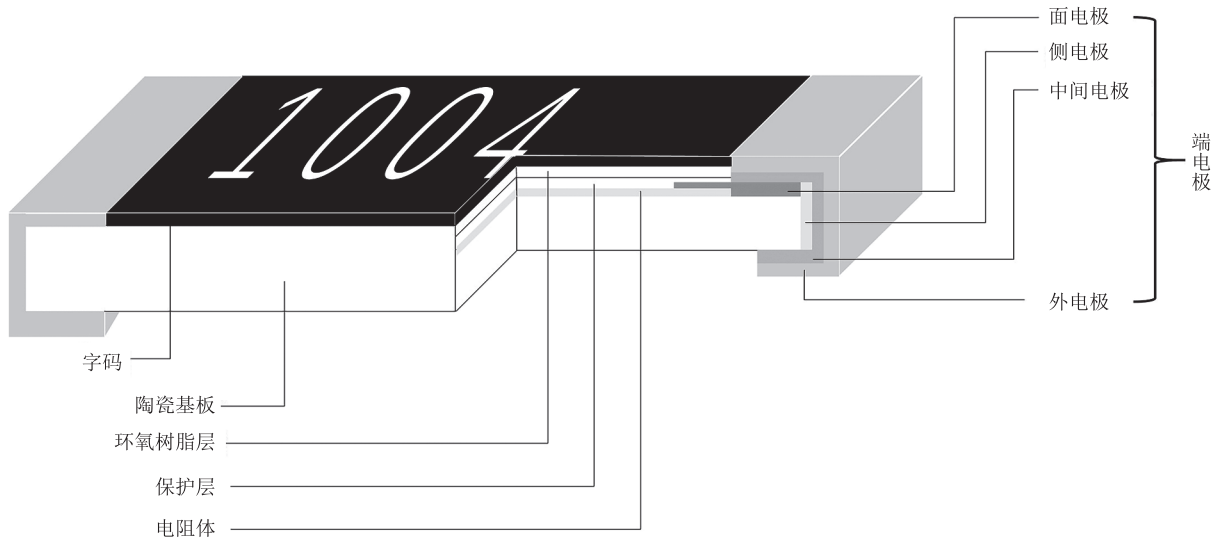


图 2 薄膜电阻结构图

Fig. 2 The structure of thin film resistor

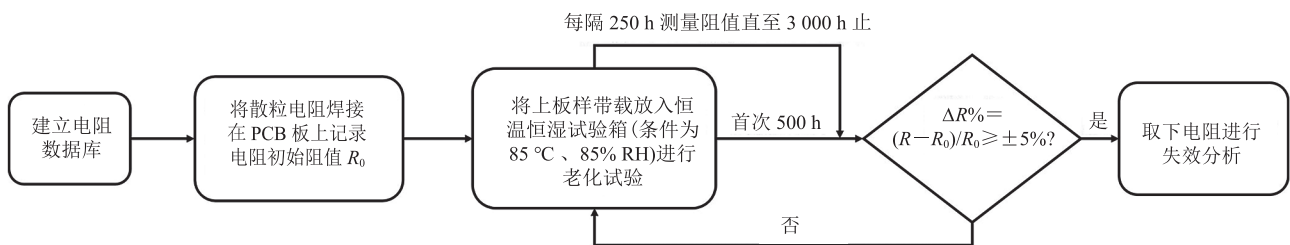


图 3 老化试验流程图

Fig. 3 The procedure of aging test

试验箱中进行老化,老化条件为 85 °C 和 85% RH,给电阻两端加上一定电压,通电时间共计 3 000 h,期间每隔 250 h 测量每个电阻的阻值并记录。试验过程中样品出现  $\Delta R\% \geq \pm 5\%$  即为失效,失效样品可停止试验进行失效分析(也可继续试验);未失效样品则继续试验,直至所有样品失效或通电时间达到 3 000 h,老化试验结束。

利用 3D 共聚焦激光显微镜(型号 VK-X1000)观察样品外观。将环氧树脂液体与固化剂以 2:1 的比例搅拌,使其均匀混合,再利用超声振荡去除搅拌产生的气泡,最后将环氧树脂混合液倒入固定好电阻的模具中,静置 6 h,待环氧树脂固化变硬后,进行磨抛制样。利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)(Thermo Fisher Scientific, 型号 Apreo 2)观察样品,该设备配有 X 射线能谱仪(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)和聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)(型号 Helios 5 UX),可观察抛光样品微观结构。

本文抽取 4 种典型样品,分析薄膜电阻器在“双 85”老化试验中阻值的变化趋势。此外,本文还将老化试验后未失效样品与未老化样品分别置于封闭的加热台上,以 25 °C 为起始温度开

始升温,每升高 25 °C 待温度稳定后测量电阻阻值,升温至 200 °C 时停止,对比分析二者阻值随温度变化的趋势。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 阻值变化测试结果

老化试验结束后,将抽取样品的老化试验数据进行整理,绘制样品阻值随老化时间及温度变化的趋势图,如图 4 所示。由图 4(a)可知,在“双 85”试验条件下,样品阻值变化率出现 3 种变化情况,在测试初期,薄膜电阻器 R1 和 R4 电阻阻值增大,并发生阻值开路(R1 和 R4 分别在 750 h 和 500 h 时,阻值明显增大,1 000 h 和 750 h 时发生阻值开路);在老化 750 h 前,R2 阻值小幅增大,750 h 后阻值增速变大,在 1 500 h 时阻值变化率大于 8.000%,超过失效判定标准 5%,在 1 750 h 时测试发现 R2 阻值开路;R3 在 500 h 时阻值增大了 0.072%,然后保持稳定,继续老化到 3 000 h 时,阻值上升幅度为 3.217%,在 3 000 h 后阻值保持稳定。通过以上样品阻值测量结果可知,“双 85”老化试验后,样品的失效模式主要是发生阻值增大和开路。老化试验后未失效的

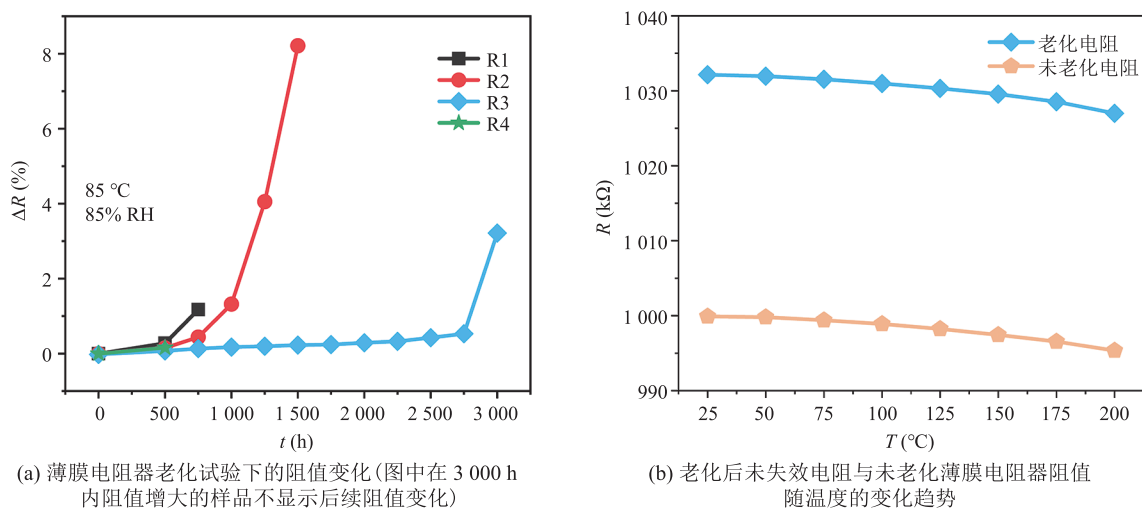


图 4 样品阻值随老化时间以及温度变化的趋势图

Fig. 4 The resistance value of the samples changes with aging time and temperature

电阻 R3 与未经老化测试的电阻的阻值随温度的变化, 如图 4(b) 所示。由图 4(b) 可知, R3 与未老化电阻的阻值都随温度的升高而降低。R3 在 25 °C 时阻值为 1 032.151 kΩ, 升温到 200 °C 后, 阻值为 1 026.996 kΩ, 阻值变化率为 -0.499%; 未老化电阻在 25 °C 时阻值为 999.908 kΩ, 升温到 200 °C 后, 阻值下降到 995.344 kΩ, 阻值变化率为 -0.456%。电阻的变化趋势符合电阻对温度较为敏感的特性, 同时由于电阻的阻值变化较小, 不会影响实际应用。此外, R3 在“双 85”老化试验后, 经升温测试后仍处于正常状态, 证明样品电阻 R3 较为稳定。

### 3.2 失效分析

#### 3.2.1 阻值增大后开路

##### (1) 无损检测

使用 3D 共聚焦激光显微镜对失效样品进行观测, 发现样品端电极表面有明显发黑变暗现象, 说明老化过程中样品端电极金属表面被部分氧化或腐蚀。在 20 倍 3D 共聚焦激光显微镜下, 薄膜电阻器老化试验失效样品典型形貌的变化如图 5 所示。图 5(a) 是薄膜电阻器进行老化试验前的形貌, 其电极和标识都较为明亮, 尤其是两端电极皆呈银白色。图 5(b) 是老化试验后失效电阻的形貌, 电阻标识的颜色变暗发黄, 外部端电极出现发黑, 推测电阻的端电极在老化后被腐蚀, 端电极表面金属发生了氧化反应。

##### (2) 破坏性检测

样品 R2 的破坏性检测结果如图 6 所示, 测



(a) 老化试验前电阻

试部位结构从上到下依次为保护层、Ag/Pd 层和陶瓷基板。EDS 分析结果显示, Ag/Pd 层出现硫 (Sulfur, S) 元素, 因此, 电阻失效的原因可能是 Ag/Pd 层金属电极被硫化。保护层属于非金属绝缘体材料, 电阻端电极是金属导体, 通常两者连接处是电阻封装的薄弱点<sup>[21]</sup>。在制作过程中, 因两者机械性能差异, 所以交接处密闭性较差, 如在高温高湿工作环境下, 环氧树脂容易发生湿热老化, 出现孔洞和裂纹, 这些裂纹不断扩大, 从而使器件封装失效, 最终导致器件失效<sup>[23]</sup>。研究表明, 环氧保护层对器件封装起到重要保护作用, 然而, 在高温高湿环境下, 酚醛树脂/环氧树脂涂料保护层易腐蚀, 从而导致电阻内部被破坏<sup>[27]</sup>。由于大气中有较多的硫化气体, 在高温高湿环境下, 若保护层不能完全覆盖 Ag/Pd 电极材料或保护层出现缺陷, 就会加剧电阻器表面保护层出现裂缝, 从而导致外界硫化气体或水汽进入样品内部。相关研究表明, Pd 金属一般较为稳定不易发生反应, 而 Ag 易与硫化气体结合发生反应。因此, 判断此处是 Ag 金属被硫化产生了硫化银 (Silver sulfide, Ag<sub>2</sub>S), 发生了如 (1) 所示的化学反应<sup>[5,21]</sup>, 导致样品的阻值增大, 且随着样品硫化程度的加深, 阻值会进一步增大失效。



#### 3.2.2 阻值开路

##### (1) 无损检测

图 7 分别为失效样品 R1、R4 在 3D 共聚焦激光显微镜下的观察结果。由图 7 可知, 电



(b) 老化试验后失效电阻

图 5 3D 共聚焦激光显微镜下薄膜电阻器失效前后外观

Fig. 5 The appearance of thin film resistors before and after failed by 3D laser scanning microscope

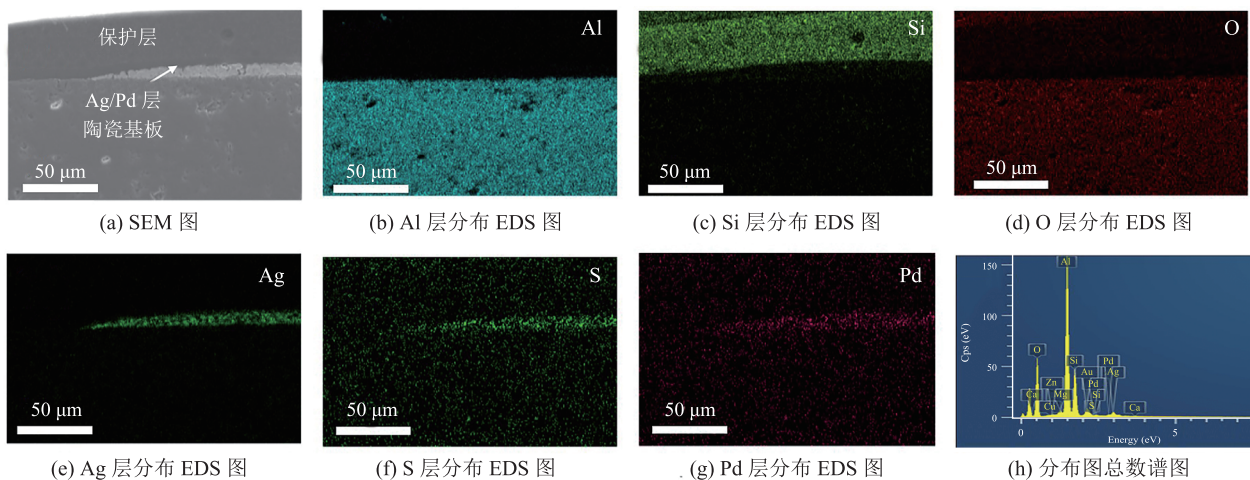


图 6 样品 R2 的检测结果

Fig. 6 The test results of sample R2

极都出现了发黄、变黑、破损以及标识变暗现象，初步判断可能是样品端电极在老化环境下被氧化腐蚀所致。

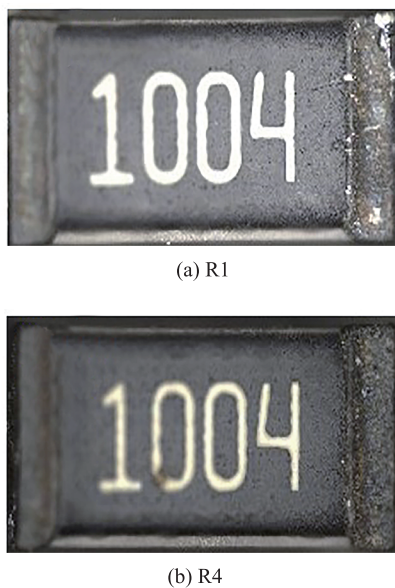


图 7 3D 共聚焦激光显微镜下失效电阻外观

Fig. 7 The appearance of of failed resistors by 3D laser scanning microscope

## (2) 破坏性检测

将失效样品 R1 磨抛制样在 SEM 下观察，并进行 EDS 分析，结果如图 8 所示。测试部位为失效样品 R1 表面环氧树脂保护层与端电极连

接处，测试部位结构从上到下依次为 Sn 层、Ni 层、保护层、Ag/Pd 层和陶瓷基板。SEM 测试结果显示，在保护层与端电极连接处有明显断裂，结合图 8 (b)~(h) 的 EDS 图像及分布图总数谱图分析，判定断裂位置为 Ni 层，其他层元素仍分布均匀连续。因此，R1 电阻的失效位置在保护层与端电极连接处，即 Ni 层处的开裂导致保护层与端电极连接处发生脱离。

除 EDS 分析外，本实验还利用 FIB 观察失效样品 R4。在端电极处进行离子束切割，切割结果如图 9 所示。从电阻 R4 端电极的不同位置进行切割，图中电极结构从上到下依次为 Sn 层、Ni 层、Ag/Pd 层和陶瓷基板。图 9 (a) 显示 Ni 层出现明显开裂。图 9 (b) 中 Ni 层与 Ag/Pd 层交界处同样也出现断裂，且 Ni 层间出现一道微裂纹。相关学者通过大量研究发现，端电极与电阻本体之间的断裂会直接导致电极不连续，从而出现阻值增大甚至开路的现象<sup>[20,25-26]</sup>。综上所述，端电极断裂和微裂纹的产生会使电阻阻值增大，严重开裂的部位会直接导致电阻开路失效。

## 3.3 失效机理

通过上述分析可知，薄膜电阻器在老化试验中有两种失效模式：阻值增大和开路。阻值

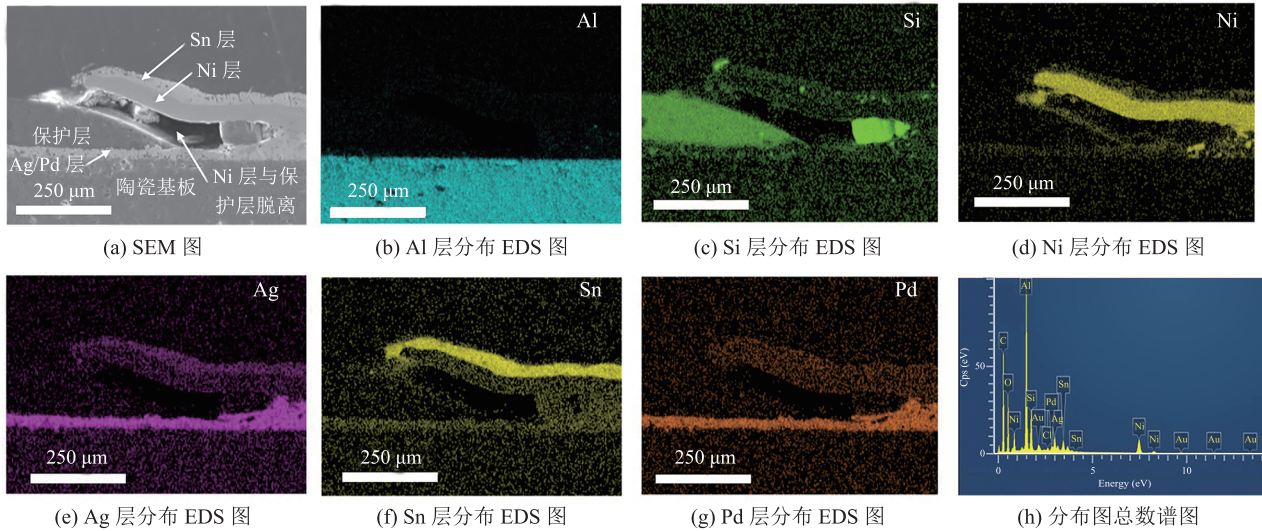
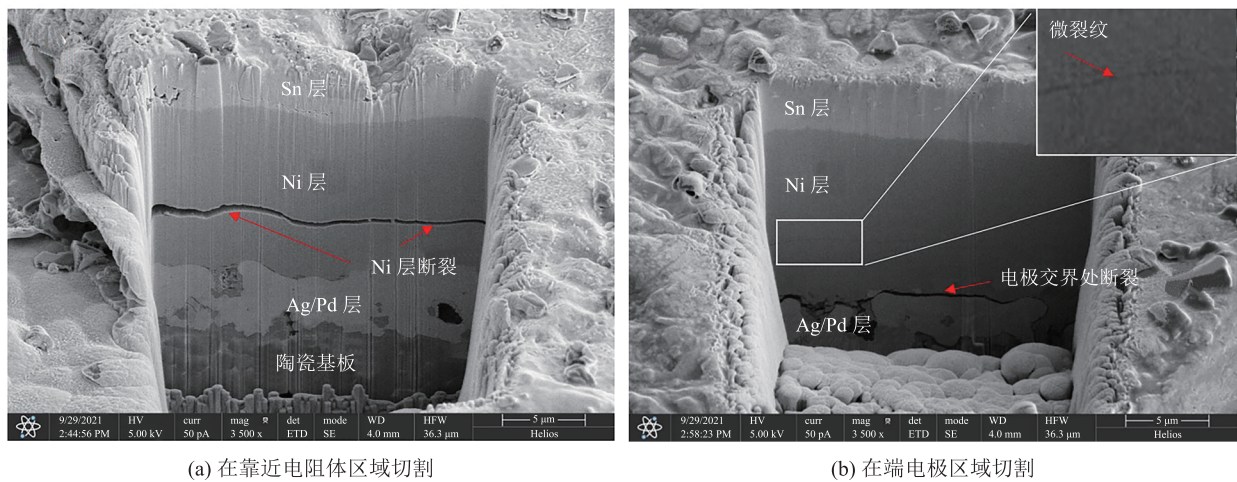


图 8 样品 R1 的测试结果

Fig. 8 The test results of sample R1



(a) 在靠近电阻体区域切割

(b) 在端电极区域切割

图 9 FIB 从样品 R4 的端电极与保护层连接处附近进行切割

Fig. 9 FIB cutting near the junction of terminal electrode of sample R4 with protective layer

增大失效机理为: 保护层和端电极的连接处是电阻封装的最弱点, 硫化物气体从连接处进入样品内部, 随着时间的迁移, 电极被硫化产生不导电的  $\text{Ag}_2\text{S}$ , 硫化气体入侵路径如图 10(a) 所示。金属电极硫化生成不导电的物质降低了电极的导电性, 是电阻阻值升高的原因之一。阻值开路的失效机理则是在高温高湿环境下, 水汽持续侵蚀电阻, 使环氧树脂保护层与端电极之间出现缝隙, 导致大量水汽侵入电阻内部, 又由于内应力的影

响, 金属内部会逐渐出现裂纹, 金属之间部分分离或层间连接处分离导致导电性变差, 出现电阻阻值超差(升高)现象。当裂纹继续发展导致电极层发生断裂最终出现开路, 失效机理图如 10(b) 所示。

## 4 结论

在“双 85”试验条件下, 本文针对 Ni-Cr 合



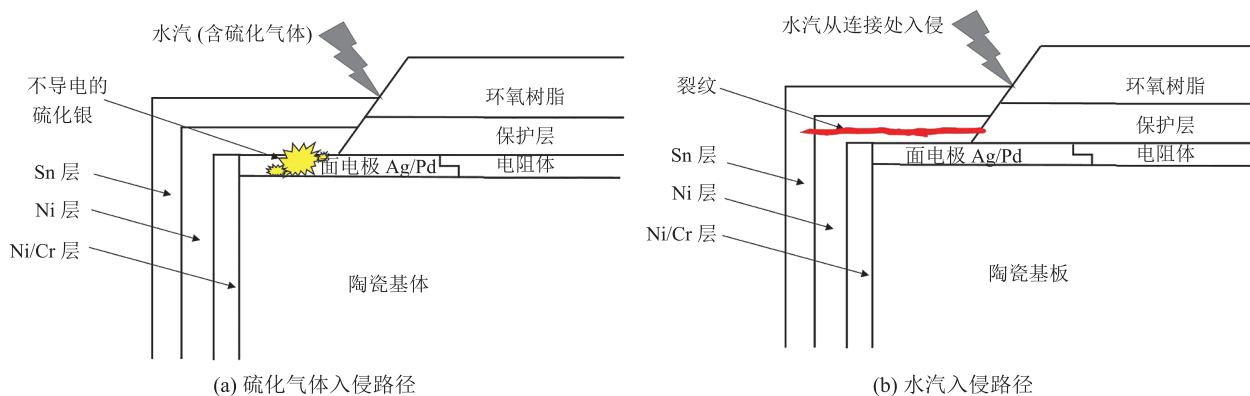


图 10 老化试验薄膜电阻器失效机理

Fig. 10 Failure mechanism of film resistors in aging test

金薄膜电阻器进行了老化试验，以测试薄膜电阻器在高温高湿环境下的可靠性。通过对老化试验后失效的电阻进行失效分析，发现主要的失效模式为阻值升高和开路两种模式。在 3D 共聚焦激光显微镜下观察到失效电阻端电极出现发黄、变黑和破损，说明在高温高湿老化后，电阻端电极发生了较为严重的腐蚀。利用 SEM、EDS、FIB 等显微技术观察失效电阻内部结构，发现端电极处发生断裂和硫化现象。在高温高湿环境下，电阻失效的原因是硫化气体的持续侵蚀，使得环氧树脂保护层与端电极之间出现缝隙，从而使大量水汽侵入电阻内部，端电极出现断裂和硫化导致阻值变大和开路失效，究其根本原因是电阻的封装工艺差。采用性能更好的环氧树脂，并改善其与 2 次保护包覆层的连接，提升其密闭性，从而提升封装效果，使电阻性能更加稳定。本研究为高端薄膜电阻失效分析提供了一种基本研究方法和思路，期望能为我国电阻发展提供一定的研究基础。

### 参 考 文 献

- [1] 王飞, 陈俊, 王学毅, 等. 低温度系数的 CrSi 薄膜电阻的制备工艺 [J]. 微纳电子技术, 2017, 54(5): 355-359.  
Wang F, Chen J, Wang XY, et al. Preparation process of the CrSi thin resistor with low temperature coefficient [J]. Micronanoelectronic Technology, 2017, 54(5): 355-359.
- [2] 柳洲. 突破关键核心技术“卡脖子”困境的制度选择与创新 [J]. 江苏科技信息, 2020, 37(21): 8-10.  
Liu Z. System selection and innovation to break through the “Bottleneck” dilemma of key core technologies [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2020, 37(21): 8-10.
- [3] 杨斌. 先进电子材料领域“卡脖子”技术的研判与对策分析 [J]. 科技管理研究, 2021, 41(23): 115-123.  
Yang B. Research, judgement and countermeasure analysis of “Containment” technology in the field of advanced electronic materials [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(23): 115-123.
- [4] 吴兆希, 罗俊, 谭晓洪, 等. 基于退化数据的厚膜电阻可靠性评估 [J]. 微电子学, 2020, 50(6): 926-931.  
Wu ZX, Luo J, Tan XH, et al. Reliability assessment of thick film resistor based on degradation data [J]. Microelectronics, 2020, 50(6): 926-931.
- [5] 胡小峰, 陈治龙, 张玉芬. 导航产品厚膜片式电阻器的防硫化应用 [J]. 电子工艺技术, 2020, 41(5): 278-282.  
Hu XF, Chen ZL, Zhang YF. Anti sulfurization application of thick film chip resistors for navigation products [J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(5): 278-282.
- [6] 李强, 谢泉, 马瑞, 等. 厚膜电阻的研究现状及发

- 展趋势 [J]. 材料导报, 2014, 28(7): 31-38.
- Li Q, Xie Q, Ma R, et al. Study on research status and development tendency of the thick film resistor [J]. Materials Review, 2014, 28(7): 31-38.
- [7] 王丽莎, 刘利, 任荣, 等. 厚膜成膜工艺与电阻稳定性关系的研究 [J]. 电子测试, 2019, (21): 81-83.
- Wang LS, Liu L, Ren R, et al. Study of thick-film deposition process and the relationship between the resistance stability [J]. Electronic Test, 2019, (21): 81-83.
- [8] 王强文, 郭育华, 刘建军, 等. 硅基高精度镍铬薄膜电阻的制备和性能表征 [J]. 电子器件, 2018, 41(6): 1372-1375.
- Wang QW, Guo YH, Liu JJ, et al. Fabrication and properties characterization of silicon-based high precision nickel chromium film resistors [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(6): 1372-1375.
- [9] 邝栗山, 王坦. 片式电阻结构分析技术研究 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40(9): 176-178.
- Kuang LS, Wang T. Research on structural analysis of chip resistor [J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(9): 176-178.
- [10] 周继承, 田莉. 镍铬合金薄膜的研究进展 [J]. 材料导报, 2005, 19(7): 5-7.
- Zhou JC, Tian L. Research progress in Ni-Cr alloy thin film [J]. Materials Review, 2005, 19(7): 5-7.
- [11] 姜定成, 田茂江, 王勇, 等. 镍铬系精密电阻合金的特性与研究现状 [J]. 电工材料, 2017, (5): 23-28.
- Jiang DC, Tian MJ, Wang Y, et al. Characteristics and research status of nickel-chromium based precision resistance alloy [J]. Electrical Engineering Materials, 2017, (5): 23-28.
- [12] 罗俊尧, 刘光壮, 杨墨, 等. 镍铬硅薄膜电阻层的磁控溅射及湿法刻蚀工艺研究 [J]. 真空, 2019, 56(5): 61-64.
- Luo JY, Liu GZ, Yang Z, et al. Study on magnetron sputtering and wet etching technology of chromium silicon thin film resistive layer [J]. Vacuum, 2019, 56(5): 61-64.
- [13] Wang XY, Zhang ZS, Bai T, et al. Thin film chip resistors with high resistance and low temperature coefficient of resistance [J]. Transactions of Tianjin University, 2010, 16(5): 348-353.
- [14] 张放, 王波, 丁亭鑫. 片式厚膜电阻器长期可靠性及失效模式研究 [J]. 电子工艺技术, 2020, 41(2): 118-121.
- Zhang F, Wang B, Ding TX. Study on long-term reliability and failure mode of thick film resistors [J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(2): 118-121.
- [15] Mao ZY, Shi GM, Li WL, et al. Failure mechanism of nickel-chromium thin film chip resistors [C] // Proceedings of the 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology, 2021: 1-4.
- [16] Rovensky T, Pietrikova A, Vehec I, et al. Stability of miniaturized non-trimmed thick-and thin-film resistors [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 84: 88-94.
- [17] Botau A, Bonfert D, Negrea C. Electrical and thermal behavior for DC and pulsed stress on chip resistors [C] // Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2014: 336-340.
- [18] Salzano LJ, Wilkinson C, Sandborn PA. Environmental qualification testing and failure analysis of embedded resistors [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2005, 28(3): 503-520.
- [19] 崔斌. 片状电阻硫化失效机理及应用可靠性研究 [J]. 电子产品世界, 2017, 32(7): 47-50.
- Cui B. Study on failure mechanism and reliability of sheet resistance curing [J]. Electronic Engineering & Product World, 2017, 32(7): 47-50.
- [20] 刘玮, 高东阳, 席善斌, 等. 某机载电子设备中片式厚膜电阻器失效机理分析 [J]. 电子质量, 2018, (3): 23-25.
- Liu W, Gao DY, Xi SB, et al. Failure mechanism analysis of chip thick film resistor for an airborne electronic equipment [J]. Electronics Quality, 2018, (3): 23-25.
- [21] 王能极. 厚膜片式电阻器硫化机理及失效预防 [J]. 电子元件与材料, 2013, 32(2): 36-39.
- Wang NJ. Sulfuration mechanism and failure prevention of thick film chip resistors [J]. Electronic

- Components and Materials, 2013, 32(2): 36-39.
- [22] David H. Expected termination times of progressively Type-I censored step-stress accelerated life tests under continuous and interval inspections [J]. *Statistica Neerlandica*, 2020, 74(2): 112-124.
- [23] Janeczek K, Arazna A, Futera K, et al. Failure analysis of epoxy molded IC packages [J]. *Microelectronics International*, 2016, 33(2): 94-101.
- [24] 畅玢, 陈传庆, 罗向阳, 等. 表贴式电阻器硫化腐蚀电化学机理及失效分析 [J]. *环境技术*, 2021, 39(2): 18-21.  
Chang F, Chen CQ, Luo XY, et al. Mechanism of conductive layer suffer from sulfide corrosion and failure analysis of thick film chip resistors [J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(2): 18-21.
- [25] 赵宇翔, 项永金, 王少辉, 等. 片状电阻器开短路失效模式浅析 [J]. *电子产品世界*, 2021, 28(4): 85-88.  
Zhao YX, Xiang YJ, Wang SH, et al. Analysis of open and short circuit failure mode of chip resistor [J]. *Electronic Engineering & Product World*, 2021, 28(4): 85-88.
- [26] 范士海. 表贴电阻典型的失效模式及机理分析 [J]. *环境技术*, 2019, 37(4): 75-79.  
Fan SH. Failure mode and failure mechanism analysis of surface mounting resistor [J]. *Environmental Technology*, 2019, 37(4): 75-79.
- [27] Wang XY, Cheng Q, Ma XP, et al. Failure behaviors and mechanisms of high-ohmic resistors protected by PF/EP paint in heat and humid environment [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2016, 22(5): 388-395.
- [28] Romero J, Azarian MH, Pecht M. Reliability analysis of multilayer polymer aluminum electrolytic capacitors [J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 112: 113725.
- [29] Matsui T, Yamamoto T, Nishihara T, et al. Compositional engineering for thermally stable, highly efficient perovskite solar cells exceeding 20% power conversion efficiency with 85 °C/85% 1000 h stability [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(10): 1806823.
- [30] Iqbal F, Kim S, Yie H, et al. Effect of alkali metal oxides on reliability and degradation of phosphor-in-glass encapsulants for white LEDs [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(8): 10393-10398.