

压敏电阻电特性测试研究

王敬举 肖智 刘和方

摘要： 本文通过测试普通电阻与压敏电阻的伏安特性曲线，并将其进行对比，从而显示出压敏电阻的电阻值随电压呈非线性变化的特性。在此基础上，对该特性的物理机理进行了讨论，并简单介绍了压敏电阻的应用与发展前景。

关键词： 压敏电阻，过电压保护，非线性，ZnO，晶粒边界缺陷模型

一. 引言

压敏电阻相应的英文名称叫“Voltage Dependent Resistor”，简称为“VDR”。在 IEC 关于压敏电阻器的标准中，对压敏电阻器所下的定义是：压敏电阻器是在一定温度下，其电导值随施加电压的增加而急剧增大的元件。压敏电阻器的电阻材料是半导体，所以它是半导体电阻器的一个品种。现在，大量使用的氧化锌压敏电阻器，它的主体材料由二价元素锌和六价元素氧所构成。所以从材料的角度来看，氧化锌压敏电阻器是一种“II—VI族氧化物半导体”。从氧化锌压敏电阻器伏安特性来看，在正常工作电压下，它的电阻值很高，几乎是兆欧级、漏电流是微安级；而随着电压加大，阻值急剧下降。在浪涌电压冲击时，阻值几十欧姆，甚至 1—2 欧姆，可见阻值随电压的变化而变化。

二. 实验的物理基础

材料的导电性往往受多种因素的影响，本实验涉及到材料中载流子在电场力的作用下是否遵循欧姆定理。大多数材料的导电特性在通常条件下遵循欧姆定理，即经由该材料做成的电阻的电流与加在两端的电压成正比，这种情况下我们说材料具有线性电阻特性。而有些陶瓷材料，当加在由这样的材料制成的电阻上的电压到一定程度后，流经电阻的电流随加在电阻两端的电压不再成正比，而呈现出急剧上升的非线性关系，也就是说不服从欧姆定理，这样的材料就是电压敏感材料，通常称为压敏电阻材料。

1. 压敏电阻的结构 压敏电阻的电路符号、外形和内部结构如图 1 所示。它是以陶瓷工艺加工而成，图 1(a)为电路符号；图 1(b)为外形，图 1(c)是以氧化锌(znO)为核心材料的内部结构图，其中包括氧化锌晶粒和晶粒周围的晶界面。

氧化锌晶粒的电阻串较低；而晶界面的电阻串较高，相接触的两个晶粒之间形成一个相当于齐纳二极管的势垒，成为一个压敏电阻单元，各单元经串、并联组成的压敏电阻器基体。当压敏电阻工作时，每个单元都承担能量，而不像齐纳二极管仅在结区承担电功率，因此陶瓷压敏电阻比齐纳二极管的最大允许电流和额定功率耗散值大得多。

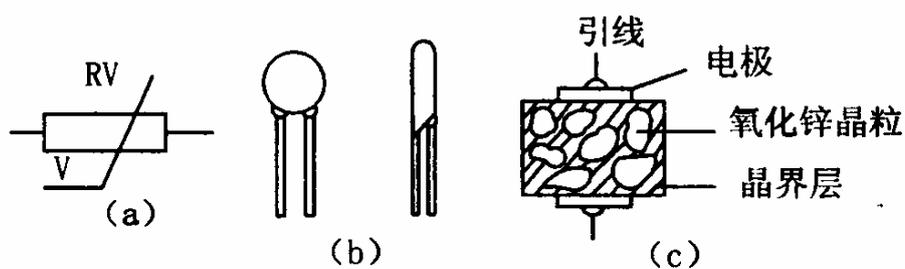


图1

2. 压敏电阻的特性 当压敏电阻两端所加电压在标称电压内时，其阻值几乎为无穷大，处于高阻状态，其漏电流 $\ll 50\mu\text{A}$ ，当它两端电压超过额定电压时，其阻值急剧下降，压敏电阻导通，工作电流增加几个数量级，反应时间为毫微秒级。

压敏电阻的伏安特性如图 2 所示。它与两只特性一致的背靠背连接的稳压管性能基本相同。

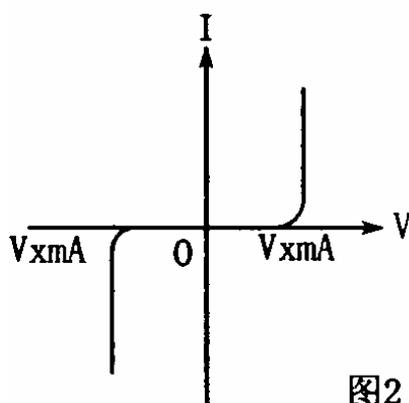


图2

压敏电阻又可作为“限幅器”，在电网叠加有过电压脉冲时，接入压敏电阻后，过压脉值波形被削平，限制在一定幅度内；它又可作为“斩波器”，当开启或关闭带有感性、容性负载电路时，波形出现开、关尖脉冲，压敏电阻在电路中能吸收该反电动势，有效地保护开关电路免受损害。

3、压敏电阻的主要参数 压敏电阻的主要参数为标称电压、漏电流和通流量，介绍如下：(1) 标称电压，也称压敏电压，指压敏电阻通过 1mA 直流电流

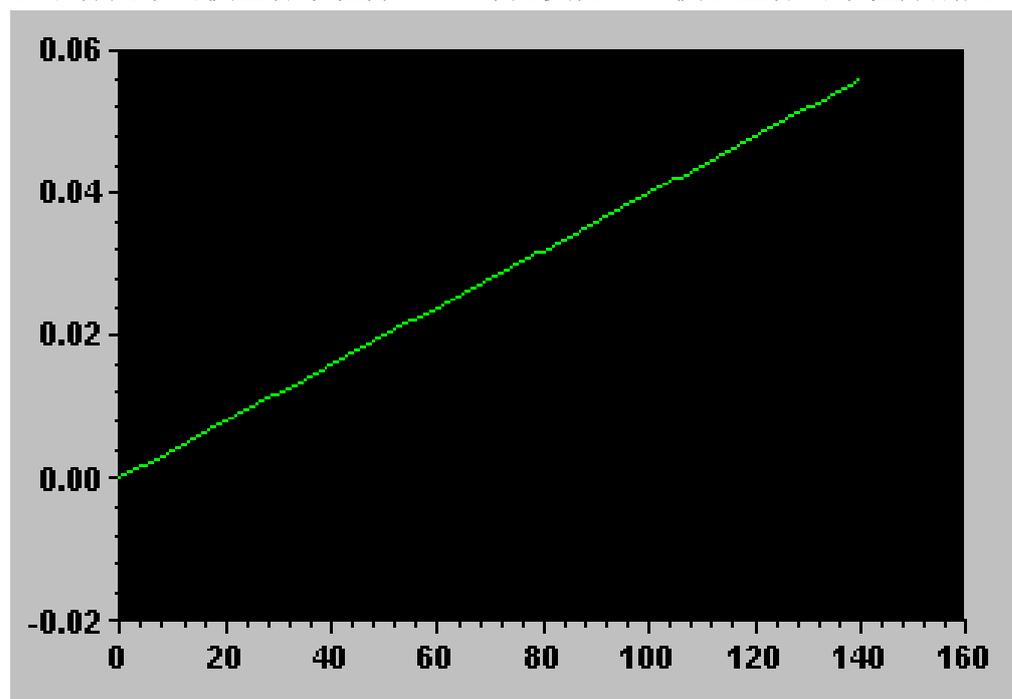
时，其两端的电压值。对于直径 $<7\text{mm}$ 的压敏电阻，则以 $V_{0.1\text{mA}}$ 为标称电压，对于低压大电流产品，则以 $V_{10\text{mA}}$ 为标称电压。(2)漏电流。当压敏电阻两端电压等于 $75\%V_{\text{xmA}}$ 时，通过该压敏电阻的直流电流。(3)最大允许电流量。在规定时间内($8/20\mu\text{s}$)内，允许通过压敏电阻脉冲电流的最大值。其中脉冲电流从 $90\text{—}100\%V_p$ 的时间为 $8\mu\text{s}$ ，峰值持续时间为 $20\mu\text{s}$ 。

三. 实验内容介绍

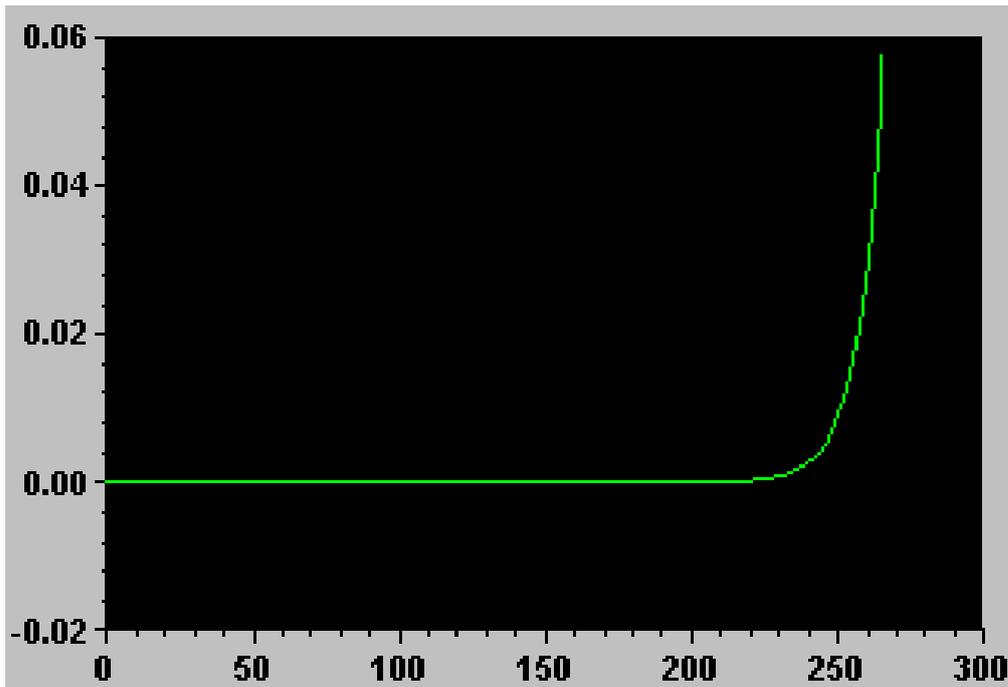
1. 普通电阻的伏安特性曲线
2. 测试实验提供的7种不同压敏电阻的伏安特性曲线
3. 由测试到的数据和特性曲线确定的压敏电压、非线性系数和漏电流。
4. 分析普通电阻和压敏电阻的伏安特性的差别，解释压敏电阻非线性伏安特性的微观原因。

四. 实验结果

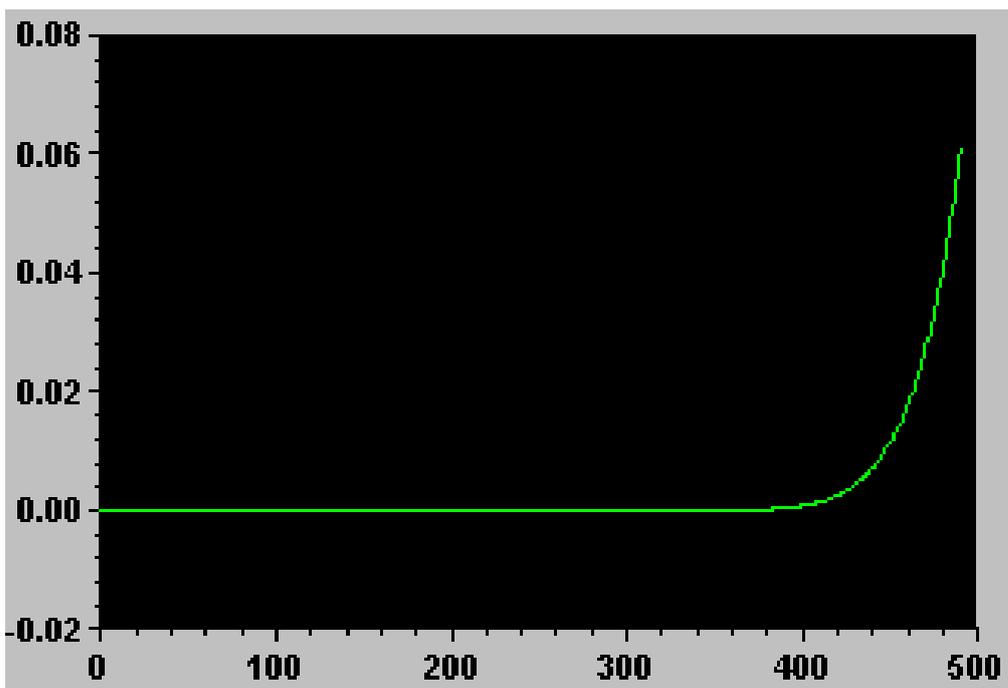
以下各图中的横坐标数值除以10才是实际电压横纵坐标的单位分别是V、A



对普通电阻伏安特性的测试结果表明其满足欧姆定理，通过其的电流与加载在其两端的电压成正比，是线性电阻。



深绿色压敏电阻的伏安特性曲线



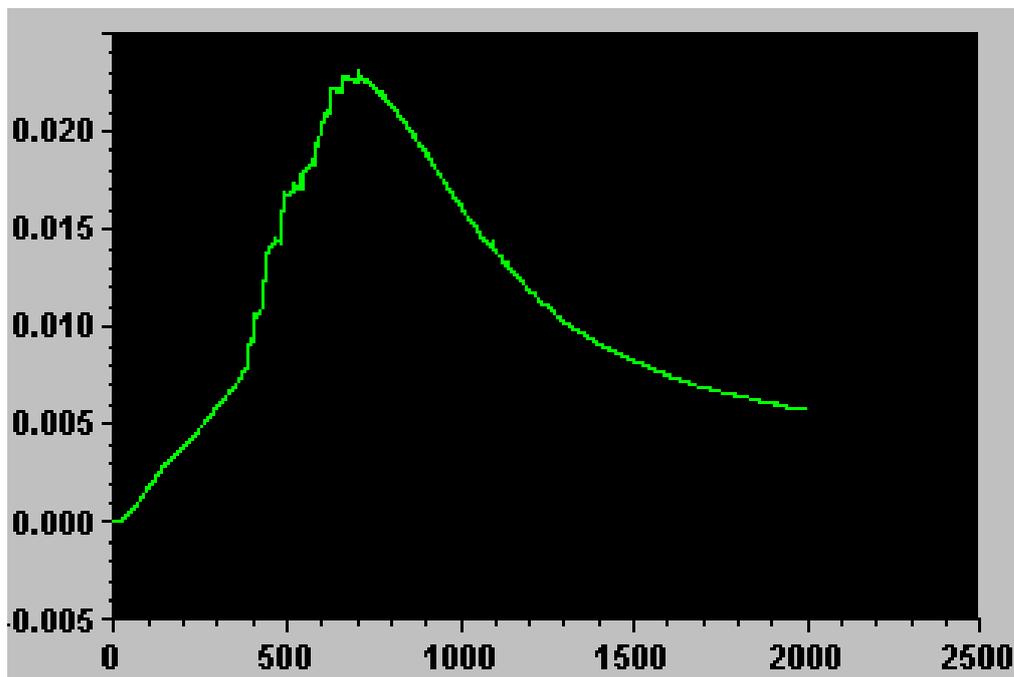
黄色压敏电阻的伏安特性曲线

另外对黑色、蓝色、青绿色压敏电阻测试伏安特性也得到了类似的曲线，对各种压敏电阻的测试结果表明其伏安特性不满足欧姆定理，通过其的电流与加载在其两端的电压成非线性关系。当电压在阈值电压一下时，只有很小的漏电流通过电阻，当刚刚超过阈值电压时，电流急剧增加。表现出对电压的敏感性。

该实验分别对 7 种不同的压敏电阻进行了伏安特性测试，但考虑到其曲线形状与

走向基本一致，只是电流突变所对应的电压值略有差别，又篇幅有限，所以此处只列出其中两种压敏电阻的伏安特性曲线。

实验中也对陶瓷材料进行了伏安特性测试，刚开始其电流随着电压的增加非线性增长，但随后随着电压的加大反而下降了。敏感半导体陶瓷是一大新型功能材料，它们以其独特的性能引起了人们的普遍重视，目前，人们正在对它进行大量的基础研究和应用开发研究。众所周知，几乎所有该类器件的敏感性都起因于多晶陶瓷的本征特性晶界现象，晶粒、晶界电阻是影响该类材料宏观性能的重要微观参数，而这些微观参量又是很难直接测量的。



陶瓷材料的伏安特性

五. 压敏电阻非欧姆导电现象的讨论

以 ZnO 压敏材料为例，对 ZnO 压敏陶瓷晶界的认识经历了一个不断深化的发展过程，非欧姆导电机理经历了两个发展阶段。第一阶段认为晶界是具有一定厚度的 $B_{12}O_3$ 晶粒间层，由此提出了两个代表性导电模型：空间电荷限制电流（SCLC）导电模型和 Nordeim-Fowler 隧道效应模型。由于它们与晶界压敏电阻几乎为常数的实验现象不符，后来逐渐为其他导电模型所取代。

David R. Clarke 用高分辨率的电子显微镜及晶格条纹图像对晶界进行了研究，结果表明富 Bi 晶粒间相主要位于三个或四个 ZnO 晶粒的交界处，大多数

ZnO 晶粒周围没有连续可分离的 $B_{i2}O_3$ 膜，少数有晶粒间相的晶界是特殊晶界，这使人们对晶界的认识前进了一大步。由此，导电模型的发展进入了第二阶段。

第二阶段有代表性的导电模型是：在双肖特基势垒模型基础上提出的二步传输模型、提出的空穴诱导击穿模型、提出的晶界主要由三部分组成的旁路模型。这些导电模型虽能解释大部分实验现象，如空穴诱导击穿模型能很好地解释高非线性特性、界面态和大量陷阱的影响作用；旁路模型能更好地解释小电流区的电性能、富 $B_{i2}O_3$ 晶界层对老化的影响作用，但是它们缺乏关于击穿区和回升区载流子来源和输运过程的认识，伏安特性的大电流区仅归于晶粒电阻的作用，从而限制了进一步降低残压比改进避雷器保护特性的思路。

目前已提出的多种模型用于解释压敏电阻的非线性压敏特性，其中最具有代表性的就是所谓的晶粒边界缺陷模型。该模型认为在氧化锌复合材料内部晶界层是一种本征的或接有 Zn 空位的 P 型半导体。它是相对绝缘的，是在从烧结温度冷却过程中形成的原子缺陷，正是这些晶界层提供的势垒而导致了压敏特性。从这一模型出发，可以认为当所加电压 V 小于阈值电压 V_b 时，压敏电阻内的导电机理主要是晶界处的热电子效应来完成的，因此，这些晶界处的热电子随时间逐渐扩散而趋于稳定，这可能就是引起在低电压情况起始电流大而渐趋一较小的极限值的原因。而当所加电压达到或大于阈值电压时，晶界相中带负电的陷阱将被雪崩过程产生的空穴中和而发生势垒层的击穿，这种雪崩效应(类似于半导体齐纳二极管)将是造成在阈值电压以上电流随时间而急剧增加，最终使材料变为导体而达到过压保护作用。这种在高低电压下完全相反的变化特征可能就是非线性压敏特性的具体表现。

六. 压敏电阻的应用

压敏电阻由于其电阻随电压非线性变化的特殊特性,即当它上面所加电压超过某一值时,便呈现低阻抗,而在某一值以下时则呈现很高的阻抗,成为一种性能良好的过电压保护器,在各种灯具线路中起到抑制脉冲电压、吸收浪涌电压、防雷击、过压保护、稳压、削波、限幅、减弧、吸收电能等实际作用。可用于电视机的电源及行输出电路中存在感性元件,如开关变压器、行输出变压器等,也可代替硒堆作为可控硅过压保护元件,总之,具有十分广阔的应用前景。

压敏电阻广泛地应用于各种电子电路中作保护器件。与其它过压保护器件相比，它具有耐浪涌电流大、非线性系数大、抑制过电压能力强、响应速度快、漏电流小、特性曲线对称、温度特性好、使用电压范围宽等突出特点，且体积小、可靠性强、价格低。

1. 用于彩电电源保护电路 压敏电阻用于彩电电源保护电路原理如图 3 所示。当由雷电或机内自感电势等引起过电压加至压敏电阻两端时，它立即导通将过压泄放掉，从而保护彩电免受损坏。

2. 用于家用电器的过压保护 家用电器过压保护电路如图 4 所示。压敏电阻接在市电经保险管后的回路中，其额定工作电压应适应家用电器的安全使用电压范围。电阻 R 与氖灯 LA 串联后与 FU 并联相接。当市电超过压敏电阻标称电压时，在毫微秒时间内，压敏电阻的阻值急剧下降，流过其电流急剧增加，使 FU 瞬间熔断，家用电器因断电而得到保护；同时 LA 点亮，发出 FU 已熔断的报警信号。

3. 用于感性负载的过压保护 在切断电感性负载电路时，在电感性负载，如电磁接触器、继电器和脱扣器励磁线圈的两端将出现高达额定电压数倍的过电压，这对线圈本身及电路元件的绝缘是十分有害的。若在线圈两端并联压敏电阻，在正常工作时其功耗较小，而切断电路时又能把过压限制在安全范围内。压敏电阻用于保护开关触点电路如图 5 所示。在感性负载电路中，将压敏电阻并联在开关触点两端，因抑制了过电压，所以能防止电火花或电弧放电，使开关触点免受烧蚀，从而增加其可靠性和延长使用寿命。

压敏电阻有很多发展方向，值得注意的是，陶瓷粉体制备技术的研究。粉体是构成陶瓷的起点，尤其是像氧化锌压敏电阻这样的高新技术陶瓷，对粉体的特征(如纯度、形态、粒度分布)比较敏感。因此，为了制备性能更优的材料，有必要通过对氧化锌粉末进行改性来改善氧化锌压敏陶瓷性能。粉体的制备方法分为干法和湿式化学合成法，国内在压敏陶瓷制粉技术方面除了引进 E1 本公司的喷雾造粒技术外，在湿式合成粉料技术方面的研究很少。但是干法工业不易保证成分准确均匀，而且机械球磨混合不可能获得粒度分布均匀的粉料，还带来研磨介质的污染问题，因此该法无法从根本上提高陶瓷材料的性能。湿式化学合成法是通过液相合成粉料，该法特别适用于制备多组分超细粉料。目前常用的有沉淀煅

烧法、水热法、胶体法及喷雾热分解法。

参考文献：

1. 《压敏电阻非欧姆特性的研究》 张连俊
2. 《压敏电阻在灯具电子线路中的应用》 王和平，张建康，周金清
3. 《低压 ZnO 压敏电阻材料研究及发展概况》 张丛春，周东祥，龚树萍