

无规分形衬底上银薄膜的 $I-V$ 特性

王劲松 叶高翔¹⁾ 许宇庆 张其瑞

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

(1993年10月15日收到)

在无规分形结构的 α 氧化铝陶瓷断面上,用射频溅射法镀制了银薄膜,其 $I-V$ 特性在空气中呈非线性行为,而在原位真空测量中表现为开关形式的电压击穿效应.基于衬底的结构特性,作者对上述现象作了合理的解释.

PACC: 7360D;7390;7340R

1 引言

自然界中的界面,如岩石断面,有着凹凸不平的表面和不规则的边界,但在一定尺度上,往往存在着自相象性(self-affinity)或自相似性(self-similarity),称为无规分形的非整数维度结构^[1].关于晶体及非晶衬底上的薄膜的工作不胜枚举,但无规分形结构衬底上的薄膜的工作尚不多见.这种无规分形衬底上的薄膜属于非均匀系统.对于非均匀系统或混合系统来说,渗流特性研究一直是一个活跃的领域.实验中的研究对象包括金属-绝缘体粉末混合物^[2]、超导-电介质混和物^[3]、半连续金属膜^[4]和人工制备的格点渗流金属膜系统等等^[5].目前研究较多的是渗流阈值附近诸如电阻、临界电流和 $1/f$ 噪声谱功率密度等物理量的标度行为,而渗流系统本身的非线性响应还较少涉及.Yagil等最近在半连续金属膜中观察到电流引起的击穿效应^[6].我们在文献[6]中报道了分形衬底上淀积的银薄膜的结构、形貌及空气中的非线性 $I-V$ 特性,本文进一步给出这种薄膜在原位真空测量中的最新结果并作了统一解释.

2 实验

有关样品的制备、结构和表面形貌分析细节见文献[6]. α 氧化铝陶瓷的新鲜断面表现为一定尺度的自相象结构,其分形维数 $D \approx 2.20$ ^[6].采用射频磁控溅射的办法在 α - Al_2O_3 的断面上淀积薄薄一层银膜.由于衬底表面的起伏不平,无法直接测量膜厚,我们以同时淀积在平整载玻片上银膜的厚度 d 来表征这种分形衬底上银膜的厚度.实验中测得 d 值在 $150\text{ \AA}$ 至 $500\text{ \AA}$ 之间银薄膜区域的大小,实际上是薄膜的二维正投影,约 $1-2\text{ mm} \times 2-4\text{ mm}$.样品的X射线衍射分析表明薄膜结晶性很差,这说明银膜可能是由微

1) 现在地址: 杭州大学物理系, 杭州 310028.

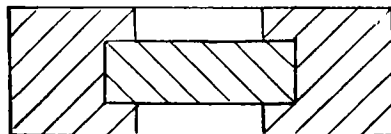


图1 原位测量时衬底、薄膜和电极整体表面构型的示意图 □为衬底空白部分；▨为厚银膜，作电极；▩为待测的薄银膜

晶构成。这种特殊衬底的无规分形表面使淀积在上面的银薄膜构成一种新的非均匀系统。

样品的电极一般由压钨的方法做成。原位测量中，先在 $2 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 下镀衬底两端的厚银膜(厚度约 $3000\text{—}5000 \text{ \AA}$)，迅速接好引线，再抽至极限真空，在电极间镀制薄银膜，这一短暂暴露大气过程不致于导致厚银膜的表面氧化，其整体构型见图1。样品的 $I\text{--}V$ 特性曲线由两引线法测量，这对样品电阻大于千欧姆而接触电阻远小于 1Ω 的情况已足够精确。 $I\text{--}V$ 特性测量由稳压源供电。测量电阻随环境气压而变化时，分别用稳流源和稳压源供电，其结果相同。

3 结果与讨论

样品A的银薄膜表征厚度 $d = 3.5 \times 10^2 \text{ \AA}$ ，在空气中测量得到明显的非线性 $I\text{--}V$ 特性，如图2表示。样品A的电阻随电压升高而逐渐减小，这个结果与文献[6]一致。然后将样品A置于真空室中，加上 $100\mu\text{A}$ 的恒流，一边抽气一边测量其电阻随真空室压强的变化，结果见图3。在 $P = 6\text{Pa}$ 时，样品电阻从 $1.32\text{k}\Omega$ 一下子跳到 $24\text{k}\Omega$ ，这说明薄膜表面的退吸附使得样品恢复到真空中的高阻状态。在真空室抽到极限真空度 $P = 2 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 后，再次测量 $I\text{--}V$ 特性，见图4。我们看到存在一个“门电压” V_0 ，或称为“开关”电压。当外加电压 $V < V_0$ ，薄膜几乎是绝缘的， $R \approx 10^8 \Omega$ 。而一旦 $V \geq V_0$ ，则“门”被打开，样品中的电流急剧上升三个数量级，电阻也降到 $R \approx 10^5 \Omega$ 。进一步增加

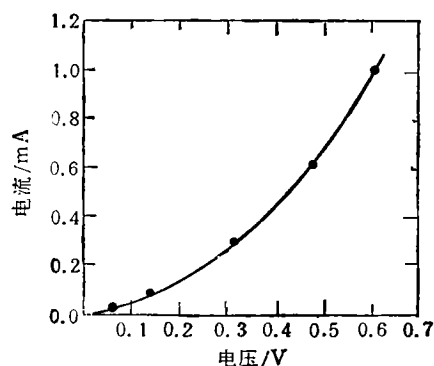


图2 样品A在空气中测得的 $I\text{--}V$ 关系

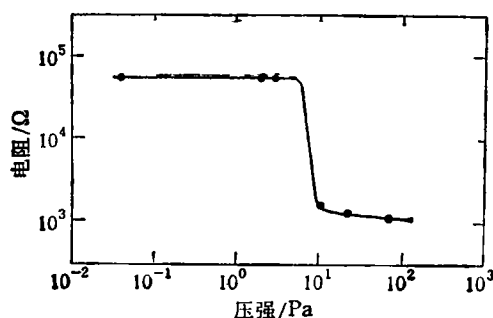


图3 样品A电阻随真空室压强的变化
测量条件为室温， $100\mu\text{A}$ 恒流

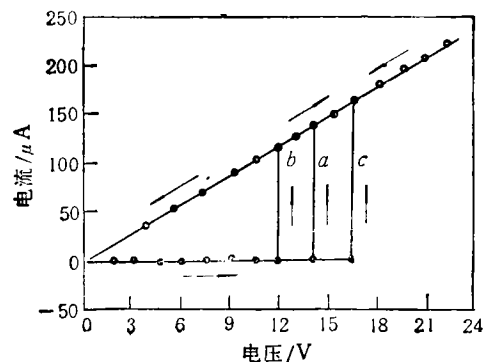


图4 样品A在真空度 $P = 2 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 的 $I-V$ 特性曲线,箭头为电压变化的方向。
图中 a, b 及 c 表示不同的测量。

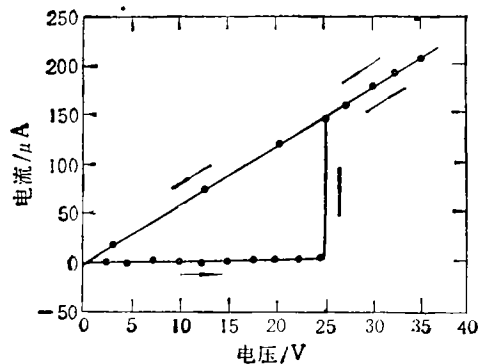


图5 样品B原位测量的 $I-V$ 特性曲线

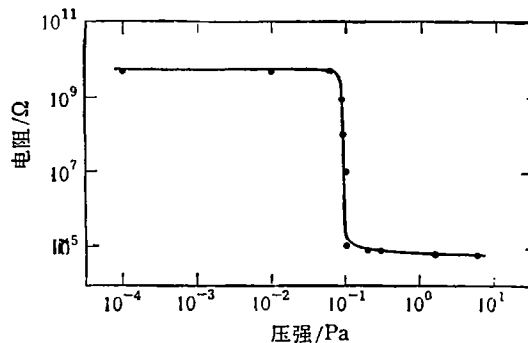


图6 样品B电阻在真空室放气过程中随压强的变化

电压则表现为线性 $I-V$ 行为,降低电压时线性可恢复到零点。尽管 $I-V$ 曲线是不可逆的,但再次从零电压开始加压测量,仍可观察到开关现象,定性的结果能够很好地重复。在多次循环测量中,开关电压 V_0 与测量过程有关。图4中的 a 为第一次测量的电流突然上升曲线。连续测量中,其开关电压 V_0 降低(图4中的 b);而在 $V \gg V_0$ 维持数分钟后,开关电压 V_0 升高(图4中的 c)。数个样品都有类似的击穿现象。

为弄清这种开关式的电压击穿效应,我们镀制了更薄的样品 $B(d = 1.5 \times 10^2 \text{\AA})$,并进行了原位测量,即预先镀好电极,镀膜后抽去溅射气体 Ar 气,达到极限真空后测量。图5为 $I-V$ 特性曲线的结果。从图5中得到样品B的击穿电压高达25V,击穿前后的电阻分别为 $10^9 \Omega$ 和 $10^5 \Omega$,与样品A相类似。在对真空室缓慢放气的同时,测量样品B电阻随压强的变化如图6,在 $P = 0.1 \text{Pa}$ 时电阻急剧下降,这再一次说明银薄膜表面的强烈吸附大大降低了样品的电阻。

作者在文献[6]中曾提出了无规分布的隧道结网络模型(RTJN),并假设各结的势垒为高斯分布。这里我们将进一步发展RTJN模型。考虑到衬底表面粗糙不平的结构,淀积上的银薄膜是由一定大小的树枝状或岛状的团簇构成。在相邻而不连结的银团簇之间就会形成金属-绝缘体-金属结,每个结有一个势垒 u_i ,这些结的复杂串并联将构成无

规网络。如果第 i 个结上的电压 v_i 小于其势垒 u_i , 第 i 个结将处于高阻态; 当 $v_i \geq u_i$, 结 i 将被击穿, 进入低阻态。为简单起见, 假设这些结是串联联结, 结与结之间的差异仅是势垒高度的不同, 势垒高度的分布函数为 $f(v)$ 。对这样的系统, 其总电阻近似为

$$R(V) = R_0 - R_1 C \int_0^V f(v) dv \quad (1)$$

(1) 式中 R_0 为外加电压为零时的电阻, 由实验推得, 即 $V = 0$ 时的微分电阻 $(dV/dI)_{V=0}$; $R_0 - R_1$ 为所有结均被击穿后薄膜的电阻, 即 $V \rightarrow \infty$ 时的电阻, 无法直接测得; $C = 1 / \int_0^\infty f(v) dv$, 为常数; 文献[6]中假设势垒高度分布呈高斯型, $f(v) = \exp(-(v - v_0)^2 / 2\sigma^2)$ 。将 R_1, v_0 和 σ 作为参数, 用(1)式拟合的结果能很好地符合图 2 空气中测得的非线性 $I-V$ 曲线。这说明串联的粗略近似基本上反映了薄膜中结的电场响应, 实际复杂串并联结构的平均响应中并联效应并不明显。

针对真空中的结果, 上述 RTJN 模型应作如下改进。由于在真空中, 银的团簇构成的各个结的介质材料是相同的, 因而各结应对应于同一个击穿电场 E_0 。分形薄膜的结构使得每个结的长度 l_i 是随机分布的, 但每个结上的电压 $v_i \propto l_i$, 故各结内的电场强度 $E_i = v_i / l_i$ 是差不多的。当外加电压逐渐增加, E_i 达到 E_0 时, 各个结差不多同时击穿, 流过样品的电流就突然增加。总的击穿电压 V_0 正比于 E_0 , 因而(1)式应写成

$$R(V) = R_0 - R_1 \int_0^V \delta(v - V_0) dv \quad (2)$$

(2) 式给出 $V < V_0$ 时 $R = R_0$; $V \geq V_0$ 时, $R = R_0 - R_1$ 。在图 4 中不同的开关电压 V_0 也能理解, 介质的弛豫使得再一次击穿较为容易, 因而连续测量中击穿电压 V_0 下降 (图 4 中的特性曲线 b); 而当样品维持在 $V > V_0$ 的击穿状态较长时间后, 由于自加热将破坏一些较弱的结, 使得下一次击穿时开关电压 V_0 升高。当样品置于空气中时, 其表面吸附首先降低各结的电阻。其次因各结的长度不同, 吸附将使各结产生无规分布的击穿电场 E_i , 因而其击穿电压 (即势垒高度) 将呈无规分布, 空气中的非线性行为即来源于各个结随外加电压的逐渐击穿。作者最近做了铂膜的实验, 发现没有吸附和脱附引起的电阻变化, 大气中电阻为恒值, $I-V$ 曲线为线性行为, 这显然是由于铂的化学惰性所致, 这也是银薄膜在大气中有强烈吸附现象的佐证。

4 总 结

分形衬底上的银薄膜构成一种新的非均匀系统。这种系统的 $I-V$ 特性在真空中表现为开关效应, 而在空气中表现为非线性效应。这些现象可以用无规分布的隧道结网络模型加以很好地解释。

感谢焦正宽教授、张宣嘉副教授、沙健博士和谭明秋博士的有益讨论。

- [1] R. F. Voss, The Science of Fractal Images, ed. H.-O. Peitgen and D. Saupe, Springer-Verlag, (1988) p. 21.
- [2] J. J. Hauser, Phys. Rev., B7 (1973), 4099.

- [3] G. Deutscher and M. L. Rappaport, *J. Phys. Lett.*, **40**(1979), L219; Y. Kantor, *J. Phys. A*, **19** (1986), L479.
- [4] Y. Yagil, G. Deutscher and D. J. Bergmann, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992), 1423.
- [5] Y. Song, S. Lee, and J. R. Gaines, *Phys. Rev.*, **B46**(1992), 14.
- [6] 叶高翔、许宇庆、王劲松、沙健、陈南松、张其瑞, *科学通报*, **38**(1993), 1656.

THE I - V CHARACTERISTICS OF SILVER THIN FILM ON THE RANDOM FRACTAL SUBSTRATE

WANG JING-SONG YE GAO-XIANG XU YU-QING ZHANG QI-RUI
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)
(Received 15 October 1993)

ABSTRACT

The silver thin films were deposited on the substrates of the α -alumina ceramic which possess a random fractal structure. The I - V characteristics of such films exhibit nonlinear behavior in air and a switching type voltage breakdown effect by *in situ* measurement in vacuum. Based on the structure geometry of the substrate, we explain these phenomena with the developed Random Tunnelling Junction Network model.

PACC: 7360D; 7390; 7340R