

# 分形晶化的 Au/a-Ge 双层膜 的非线性 V-I 特征<sup>\*</sup>

张庶元 陈志文 谭 舜 田明亮 张裕恒

(中国科学技术大学结构分析开放研究实验室 合肥 230026)

**摘要** 本文报道了 Au/a-Ge 双层膜的分形晶化现象, 并首次测量了 Au/a-Ge 双层膜分形晶化的 V-I 特性。实验结果表明: 分形晶化后的 Au/a-Ge 双层膜具有反常的非线性 V-I 特征, 应用隧道结网络(RTJN)模型对实验结果给予了合理的解释。

PACC: 0540, 7360D, 7390, 7340R

## 1 引言

目前, 关于金属/半导体薄膜的分形晶化行为, 已有不少的研究工作<sup>[1~7]</sup>, 但对于金属/半导体薄膜发生分形晶化后的电学特性的研究, 至今未见报道。分形晶化后的金属/半导体薄膜体系属非均匀系统。近年来, 非均匀系统中渗流特性的研究一直是一个活跃的领域。一些文章探讨了渗流阈值附近诸如电阻、临界电流等物理量的标度行为, 但有关渗流系统本身的非线性还较少涉及。Yagil 等<sup>[8]</sup>最近在半连续的金属膜中观察到电流的击穿效应, 王劲松<sup>[9]</sup>和叶高翔<sup>[10]</sup>等曾研究了无规分形衬底上银薄膜的 V-I 特性, 发现在具有无规分形的陶瓷衬底上溅射的金属 Ag 薄膜具有非线性的 V-I 特性。为解释这一现象, 他们提出了无规分布的隧道结网络模型(RTJN 模型)。本文考察了 Au/a-Ge 双层膜的分形晶化行为, 测量了薄膜分形晶化后的 V-I 特性, 发现 Au/a-Ge 双层膜在分形晶化后也具有非线性的 V-I 特性。我们的工作与叶高翔等人的研究有差别, 但借用 RTJN 模型, 仍可对这一实验结果进行满意的合理解释。

## 2 实验

Au/a-Ge 双层膜的制备是在真空镀膜仪中进行的, 真空度为  $2.67 \times 10^{-3}$  Pa。将纯 Au、

\* 国家自然科学基金资助项目

张庶元 男, 1945 年生, 副研, 中国电镜学会理事, 主要从事界面多层膜, 纳米材料的微结构及性质研究

陈志文 男, 1962 年生, 助研, 主要从事金属/半导体界面的分形形成及性质研究

1996 年 6 月 24 日收到初稿, 1996 年 9 月 10 日收到修改稿

Ge 经酒精、丙酮、去离子水、超声清洗后蒸镀在新鲜解理的 NaCl(100)面上, Au、Ge 薄膜的沉积方式为先蒸 Ge 后蒸 Au, 记为 Au/a-Ge, 膜厚由点蒸发源公式  $m = 4\pi r^2 h \rho$  和称得质量及调节蒸积距离给出, 这里  $r$  取 10cm, 膜厚比设计为 15/46nm. 制备好的双层膜送入真空退火炉(真空中度为  $2.67 \times 10^{-3}$ Pa)作热处理, 退火温度为 150℃、时间为 30 分钟. 退火完毕, 让其自然冷却后, 将样品浸入蒸馏水中, 待膜漂上后用电子显微镜铜网捞起, 制成的电镜样品送入日立 H-800 透射电镜(TEM)中进行观测, 加速电压为 200kV.

### 3 结果和讨论

图 1(见图版 I)显示了该试样在室温和 150℃、热处理后的 TEM 显微照片和电子衍射花样. 从图中可以看到, 室温下的 Au/a-Ge 膜均匀平滑, 电子衍射花样为 Au 的多晶环和 Ge 的非晶环, 说明 Au 和 Ge 分别以多晶和非晶的状态存在. 150℃、热处理后的样品, 电子衍射中的非晶 Ge 环消失, 代之以明锐的 Ge 多晶环, 表明 Ge 已发生晶化. 这时的 TEM 形貌像中, Au、Ge 膜已不再均匀平滑, 出现了许多白色的具有自相似性结构的类雪花状分形形态, 经选区电子衍射分析, 确认这些白区为 Ge 的多晶颗粒, 而周围的黑区主要为 Au 晶粒组成. Au/a-Ge 双层膜经热处理后发生分形晶化的物理机制, 可以用 a-Ge 的随机逐次触发成核模型(RSN 模型)予以阐释, 这已在先前的文章中作过讨论<sup>[2~4]</sup>.

对于获得的 TEM 分形图像, 采用 box counting 方法对分形维数进行了计算, 其分维值为 1.887, 图 2(见图版 I)给出了相应的计算曲线.

实验结果表明: Au/a-Ge 双层膜中分形结构的形成对薄膜的 V-I 特性有明显的影响. 图 3(见图版 I)是上述试样的 V-I 特征曲线. 由图可知, 当外加电压逐步增加时, 样品电阻  $R$  逐渐减小, 呈现出反常的非线性特性. 这种  $dR/dI < 0$  的特性显然有别于欧姆 V-I 特性, 不能用一般的焦耳热效应来解释. 可以肯定, 这种非线性 V-I 特性是与 Au/a-Ge 双层膜的分形晶化行为密切相关的. 当薄膜发生分形晶化后, Ge 晶粒组成的分形花样呈枝权状形态, 使 Au 原子不能组合成一个均匀连通的整体. 从电输运的角度来考虑, 这些枝权状形态的半导体 Ge 原子集团, 形成了许多大小不同的隧道结, 整个薄膜, 就是由连通的金属部分和一系列隧道结串、并联构成的. 在进行 V-I 和电阻测量时、如果第  $i$  个结上的电压  $V_i$  小于该结的势垒  $U_i$ , 则第  $i$  个结处于高阻态, 反之, 若  $V_i$  大于  $U_i$ , 第  $i$  个结将被击穿, 进入低阻态. 随着测量电压  $V$  的增加, 部分隧道结相继被击穿, 分形膜的总电阻  $R$  逐渐减小, 从而导致了薄膜反常的非线性 V-I 特征. 按照 RTJN 模型的数学描述<sup>[9]</sup>, 这些隧道结击穿电压的分布大致满足高斯分布. 假设这些结在击穿前后的电阻分别为常数  $r_1$  和  $r_2$ , 且总有  $r_1 > r_2$ , 在外电压不太高时, 薄膜的总电阻可以近似为:

$$R(V) = r_0 + r_1 N A \int_v^\infty e^{-(u-u_0)^2/2\sigma^2} du + r_2 N A \int_0^v e^{-(u-u_0)^2/2\sigma^2} du \quad (1)$$

式中  $r_0$  为所有金属网络电阻之和;  $A$  为归一化常数;  $u_0$  为最可几分布击穿电压;  $\sigma$  为积分变量  $u$  的均方根差. 为简单起见,(1)式可改写为

$$R(V) = R_0 - R_1 A \int_0^v e^{-(u-u_0)^2/2\sigma^2} du \quad (2)$$

式中  $R_0$  为外加电压为零时的薄膜电阻,  $R_0 - R_1$  近似等于所有隧道结被击穿后薄膜的电

阻。于是,分形膜的  $V$ - $I$  特性关系为:

$$I = V/R(V) \quad (3)$$

根据(1)、(2)式,随着测试电压  $V$  的增高, $R(V)$ 逐渐减小,这与上述的定性分析是一致的。

### 参 考 文 献

- [1] 吴自勤,张人佶,物理学进展,1994,14(4):435.
- [2] J. G. Hou and Z. Q. Wu, Phys. Rev. B, 1989, **40**:1008.
- [3] B. Q. Li, Zhang Shuyuan *et al.*, Phys. Rev. B, 1993, **47**:3638.
- [4] J. G. Hou and Z. Q. Wu, Phys. Rev. B, 1990, **42**(6): 3271.
- [5] 陈志文,张庶元,等,科学通报,1994,39(20):1860.
- [6] 张庶元,陈志文,等,科学通报,1995,40(10):880.
- [7] 张庶元,陈志文,等,物理学报,1996,45(1):94.
- [8] Y. Yagil *et al.*, Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:1423.
- [9] 王劲松,等,物理学报,1994,43(10):1688.
- [10] 叶高翔,许宇庆,等,科学通报,1993,38(18):1656.

## Nonlinear V-I Characteristic in Fractal Crystallization of Au/a-Ge Bilayer Film

Zhang Shuyuan, Chen Zhiwen, Tan Shun, Tian Minglinang and Zhang Yuheng

(Structure Research Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Received 24 June 1996, revised manuscript received 10 September 1996

**Abstract** The fractal crystallization phenomenon of the Au/a-Ge bilayer film has been investigated, and the  $V$ - $I$  characteristic of the film has been measured for the first time. The experimental evidence suggests that the Au/a-Ge film after fractal crystallization has anomalous nonlinear  $V$ - $I$  characteristic. The phenomenon is explained by the Random Tunneling Junction Network mode(RTJN mode).

**PACC:** 0540, 7360D, 7390, 7340R