



# ZnO 压敏电阻交流老化 TSC 特性

屠幼萍<sup>①\*</sup>, 王倩<sup>②</sup>, 何洁<sup>③</sup>, 李晓<sup>①</sup>, 丁立健<sup>①</sup>

① 北京市高电压与电磁兼容重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

② 西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048;

③ 中国电力科学研究院, 北京 100192

\* E-mail: typ@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-09; 接受日期: 2013-01-05

国家自然科学基金(批准号: 50577021, 50877025)和教育部博士点基金(批准号: 200800790004)资助项目

**摘要** 氧化锌压敏电阻片的交流老化特性及机理一直以来广泛受到人们的关注. 本文基于“十度倍半”法则开展了 ZnO 压敏电阻加速老化试验, 并对老化各阶段的试样进行了功率损耗和热刺激电流(TSC)测试. 测试结果显示, 随着老化时间的增加, ZnO 压敏电阻片的功率损耗增大、TSC 陷阱电荷量增加, 同时陷阱能级也有加深; 此外, 功率损耗增大与 TSC 陷阱电荷量增加有相同的趋势. 初步分析表明, 迁移的填隙锌离子影响了空间电荷的分布, 导致肖特基势垒的降低, 引起了陷阱能级的变化.

**关键词**

氧化锌压敏电阻  
热刺激电流(TSC)  
功率损耗  
填隙锌离子  
肖特基势垒

氧化锌(ZnO)压敏电阻由于具有优越的非线性伏安特性, 同时具有残压低、无续流、动作时延小、通流容量大等优点, 被广泛应用于电力系统的过电压防护中<sup>[1, 2]</sup>. 由 ZnO 压敏电阻组装成的金属氧化物避雷器(MOA)已成为电力系统中性能最好和发展最快的过电压保护装置. 金属氧化物避雷器通常不带串联间隙, 因此工作电压将长期作用在 ZnO 压敏电阻上, 使其长期有泄漏电流流过. 对于工频电压, 电流中包括一定分量的阻性电流. 虽然阻性电流幅值相对于容性电流要小, 但有可能随时间逐渐增加, 并导致功率损耗的增加, 即 ZnO 压敏电阻存在老化现象. 在运行中, ZnO 压敏电阻的老化将影响其工作的稳定性和可靠性, 并最终可能导致热破坏. 因此, 研究 ZnO 压敏电阻的交流老化具有十分重要的意义.

在 ZnO 压敏电阻交流老化机理方面提出了不少模型, 其中, 1980 年 Eda 等人<sup>[3-5]</sup>提出的离子迁移理论能够较好地解释一些实验现象(热刺激电流 TSC 结

果、局域场作用下离子迁移的库仑势计算结果等)而被许多学者所接受. 这种理论认为, 在外场作用下由于晶粒耗尽层中间隙锌离子(这种间隙锌离子是在烧结后的冷却过程中产生的)向界面迁移, 在电性方面中和了界面能, 导致肖特基势垒高度的降低, 使得电气性能劣化. 在离子迁移理论上, 1985 年 Gupta 等人<sup>[6, 7]</sup>提出了晶粒边界缺陷模型, 认为迁移离子是填隙锌离子  $Zn_i^+$  和  $Zn_i^{2+}$ , 这一模型被深能级瞬态谱 DLTS 测试结果和正电子湮灭谱 PAS 测试结果证实.

此外, 也有人提出对老化起决定作用的迁移离子可能是其他离子而非填隙锌离子, 例如 Chiang 等人<sup>[8]</sup>借助 STEM 研究晶界元素分布, 发现在直流电场作用下原子或离子的确发生运动, 观察到老化后的 ZnO 压敏陶瓷其晶界附近累积有 Bi 和 Co. 但是这些数据没有足够的分辨率来显示晶界附近原子分布的变化.

张树高等人<sup>[9]</sup>在离子迁移理论的基础上提出了

线性链模型. 该模型认为: 老化初期以离子迁移为主, 老化到一定程度后便形成线性链, 线性链增殖导致热击穿, 离子迁移过程是可逆的, 压敏链形成线性链的过程是不可逆的. 这个模型可以较好地解释 ZnO 压敏电阻在撤除外电场后性能不能完全恢复这一重要的实验现象.

李盛涛等人<sup>[10]</sup>提出了“电场下离子迁移—热扩散反迁移”模型. 同时, 他们认为随着老化时间的延长, ZnO 耗尽层中空间电荷总量减少使得晶界势垒的高度下降, 引起泄漏电流增加, 发生老化.

除此之外, 2002 年裴根林和何金良等人在 Sonder 等人的研究基础上分析了 ZnO 压敏电阻内部的微裂纹在老化中的作用<sup>[11, 12]</sup>. ZnO 压敏电阻内的微裂纹可能是氧原子和水分的扩散通道. 通道内水分子可能与氧原子发生化学反应形成良电阻通道, 使泄漏电流加大, 导致压敏电阻的劣化.

综上所述, 关于 ZnO 压敏电阻的交流老化, 普遍认为的是由离子迁移导致肖特基势垒畸变引起的, 还有的学者认为是电荷积累导致的, 然而, 过去的研究都没有直接研究老化及其过程中决定 ZnO 压敏电阻电气特性的空间电荷变化. 因此, 本文从空间电荷的角度, 采用热刺激电流测试方法, 研究老化过程中 ZnO 压敏电阻的空间电荷特性, 将能为进一步阐明老化机理提供重要的参考.

## 1 试验装置及测试方法

### 1.1 老化试验系统及试验方法

GB11032-2000/IEC60099-4 规定, 长期老化时应该将已计算校正的最大持续运行电压施加到 ZnO 压敏电阻试样上 1000 h, 期间控制压敏电阻的表面温度在  $115^{\circ}\text{C}\pm 4$ . 为缩短试验时间, 采用基于“十度倍半”法则的加速老化试验方法<sup>[13, 14]</sup>, 老化温度为  $135^{\circ}\text{C}$ , 等效的老化时间为 160 h (7 d). 为了研究老化过程中试样的空间电荷特性, 试验中还进行了不同时长的老化. 老化电压  $U$  由下式确定:

$$U = \frac{sU_{1\text{mA}}}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

式中  $U_{1\text{mA}}$  为压敏电阻通过 1 mA 直流电流时的电压值;  $s$  为荷电率, 取 0.85 (IEC 标准和国标推荐).

老化时间分别为 1~7 天, 共 7 组老化试样, 每组老化试样数 4 片. 试验所用试样为工业典型配方的氧

化锌压敏电阻片, 尺寸为  $\Phi 34 \times d 2.95$  mm,  $U_{1\text{mA}}$  在  $685 \pm 1$  V 范围内. 试样表面镀有铝电极, 电极直径为 32 mm. 试验前先对试样用无水乙醇进行表面清洗, 并在温度 373 K 下进行 10 h 的烘干处理, 以消除试样中水分、表面污秽和历史极化等对电流测试的影响.

加速老化试验系统采用西安交通大学电力电子专用设备研究所生产的阀片加速老化试验装置, 在老化过程中实时采集功率损耗.

### 1.2 热刺激电流(TSC)测试系统

半导体或绝缘体的禁带中都存在着可以捕捉电子的陷阱能级. 当有外加电场时, 电子从负极向导带注入, 这些电子就会被陷阱所捕捉. 当对捕捉的电子给与充分的能量时, 它就会从陷阱释放, 再次被激发到导带上. 导带上的电子将沿介质内的电场而迁移, 在外部电路形成电流, 这就是由陷阱电子(空穴)所引起的热刺激电流(TSC)<sup>[15]</sup>.

TSC 测试的过程: 被测试样在某一温度  $T_1$  下被外加电场极化一段时间后, 保持该电场, 迅速将试样冷却至温度  $T_2$  ( $T_2 < T_1$ ), 撤去极化电场, 使试样线性升温, 测量外电路的短路电流, 记录该电流随温度变化的曲线. 对于本次研究的 ZnO 压敏电阻片试样, TSC 的试验参数确定为: 极化电压 350 V、极化时间 15 min、极化温度 320 K、升温速率 2 K/min, 测试温度范围为 180 K~420 K.

由 TSC 特性曲线, 利用如下公式计算得到试样的 TSC 电荷量  $Q_{\text{TSC}}$  和陷阱能级  $E$ <sup>[15]</sup>:

$$Q_{\text{TSC}} = \int_{t_0}^{t_1} I(t) dt = \frac{60}{\beta} \int_{T_0}^{T_1} I(T) dT, \quad (2)$$

$$E = \frac{2.47T_m^2 k}{\Delta T}, \quad (3)$$

式中  $\beta$  为升温速率(单位为 K/min);  $T_m$  为峰值电流对应的温度,  $\Delta T$  为半峰值对应的温度差,  $k$  为波尔兹曼常数.

## 2 老化性能测试结果

### 2.1 老化功率损耗

试验中共老化了 28 片 ZnO 压敏电阻片试样, 相同老化时间下老化 4 片试样. 由于不同试样的老化初始功率损耗值不同, 因此采用功率损耗的最终值与初始值的比来判断老化后功率损耗的变化情况. 将所有

试样的功耗曲线计算得到的功率损耗增加倍数  $k$  绘制在同一张图中, 横坐标为老化天数, 纵坐标为功耗增加的倍数, 并补上未老化试样的点(0), 如图 1 所示。

从图 1 可知, 如果不考虑老化时间为 1, 2, 5, 6 d 时偏差较大的测试数据(偏差超出均值 10%的范围, 可能是由于试样的个体差异或老化时个别意外因素导致测试结果有所不同), 绝大多数试样的测试结果一致性较好。把图 1 中分布偏差超出均值 10%范围的 4 个数据舍去后, 则可得到如表 1 所示的不同老化时间下功率损耗增加倍数的平均值。

将表 1 中的数据进行拟合后发现, 功率损耗增加倍数  $k$  与老化时间  $t$  的关系可用下列线性回归表示:

$$\ln k = At^n + B, \quad (4)$$

式中  $A, B, n$  为常数, 针对本批试样,  $A=0.17294, B=0.28326, n=0.5$ , 此时对应的线性相关系数为 0.99956。图 2 是根据表 1 数据的拟合结果曲线。

更进一步的, 对于某个试样, 若其功率损耗初始值为  $P_0$ , 则可将(4)式改写为

$$P = P_0 \exp(At^n + B). \quad (5)$$

而功率损耗  $P$  与泄漏电流密度  $J$  的关系如下式表示

$$P = UI = UJS, \quad (6)$$

式中,  $U$  为试样施加的老化电压,  $I$  为泄漏电流,  $S$  为试样的表面积。由(5)和(6)式可得

$$J = \frac{P_0}{US} \exp(At^n + B). \quad (7)$$

对于特定试样, 其初始功率损耗是确定的, 若相应的试样截面积和施加的老化电压均相同, 则均可

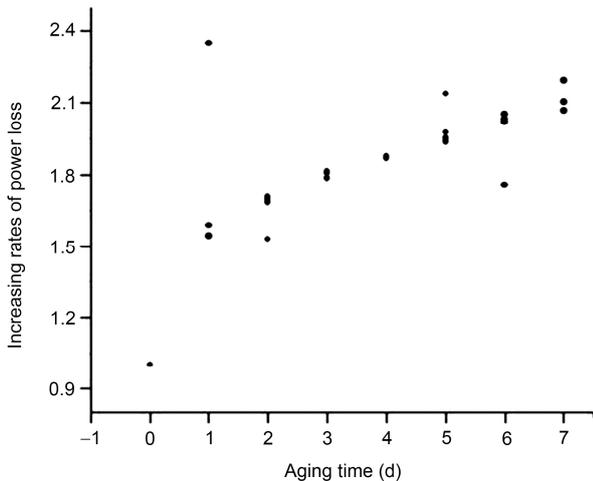


图 1 不同老化时间的功率损耗增长倍数

表 1 不同老化时间的功耗增长倍数均值

| Aging time (d)    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Mean value of $k$ | 1.58 | 1.69 | 1.80 | 1.87 | 1.95 | 2.03 | 2.10 |

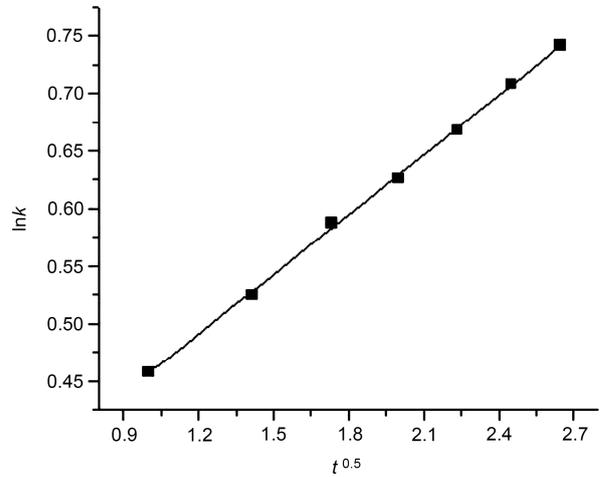


图 2  $\ln k$  与  $t^{0.5}$  的关系

视为常数。因此, 泄漏电流密度与老化时间的关系可以表示为

$$J = C \exp(At^n + B), \quad (8)$$

其中  $A, B, C$  为与试样有关的常数,  $n$  为 0.5。

## 2.2 TSC 特性

图 3 为未老化和老化不同时间的 ZnO 压敏电阻试样的 TSC 曲线谱。

从图 3 可以看出, 老化后的 ZnO 压敏电阻试样

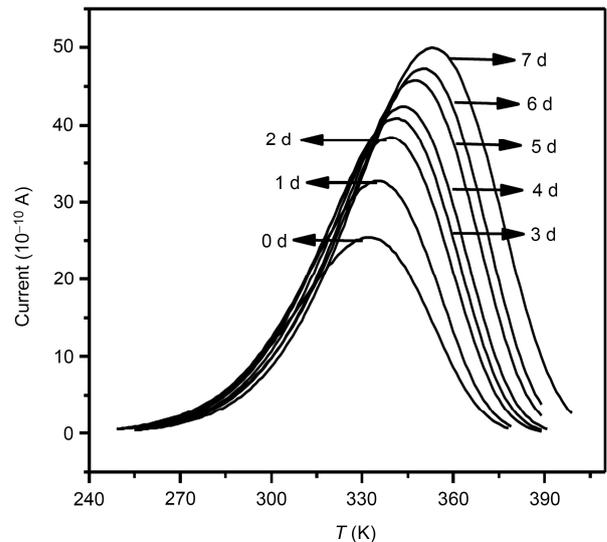


图 3 不同老化时间的 TSC 曲线谱

的 TSC 曲线峰值电流相比未老化的要大, 峰值电流对应的温度也略有提高增加. 随着老化时间的增加, 峰值电流增大越来越明显, 老化 7 d 试样的峰值电流增加了近一倍. 不同老化时间试样的 TSC 曲线的上升沿与未老化试样 TSC 曲线基本一致, 但是电流峰随着老化时间的增加而变宽.

根据公式(2)和(3)计算 TSC 陷阱电荷量和陷阱能级, 结果列于表 2.

从表 2 中可以看出, 随老化时间的增加陷阱能级略有增加, 老化不同天数试样的陷阱能级均在 0.5 eV 附近.

分析表 2 中陷阱电荷量  $Q_{TSC}$  与老化天数的关系发现,  $Q_{TSC}$  大小与老化时间  $t$  的 0.5 次方成正比, 可由下式

$$Q_{TSC} = Ct^{0.5}, \quad (9)$$

其中  $C$  为常数. 图 4 所示为  $Q_{TSC}$  与老化时间  $t^{0.5}$  的关系曲线.

从上述结果可知,  $Q_{TSC}$  随老化时间的变化是相对

表 2 不同老化时间试样的陷阱参数

| Aging time (d) | Peak current ( $10^{-10}$ A) | Peak temperature (K) | Trap level (eV) | Trapped charge ( $\mu$ C) |
|----------------|------------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|
| 0              | 25.4                         | 332                  | 0.465           | 4.28                      |
| 1              | 32.7                         | 335                  | 0.476           | 5.37                      |
| 2              | 38.4                         | 339                  | 0.487           | 6.31                      |
| 3              | 40.9                         | 341                  | 0.492           | 6.73                      |
| 4              | 42.4                         | 343                  | 0.497           | 6.99                      |
| 5              | 45.8                         | 347                  | 0.501           | 7.67                      |
| 6              | 47.3                         | 350                  | 0.507           | 7.90                      |
| 7              | 49.9                         | 353                  | 0.511           | 8.21                      |

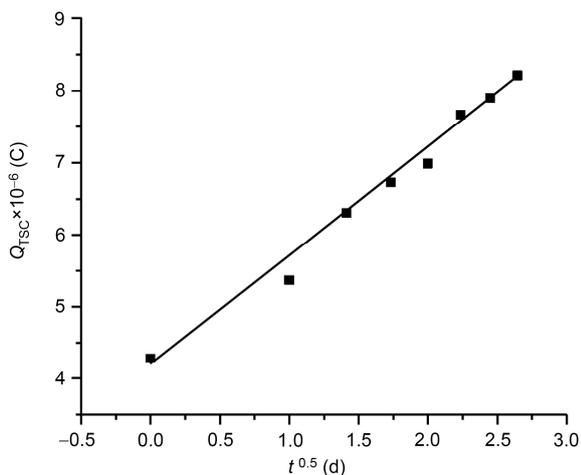


图 4  $Q_{TSC}$  与老化时间  $t^{0.5}$  的关系

缓慢和连续的. 因此, 它不可能是界面上电子俘获电荷和偶极子的极化电荷, 而是可动离子的迁移所形成. 对比(8)和(9)式发现两者十分相似, 这表明 ZnO 压敏电阻片泄漏电流的增加与离子迁移存在必然的关系.

ZnO 晶粒中可能迁移的离子有填隙锌  $Zn_i^+$  和  $Zn_i^{2+}$ 、氧空位  $V_o^+$  和  $V_o^{2+}$ , 在晶界上有锌空位  $V_{zn}^+$  和  $V_{zn}^{2+}$ . 较容易迁移的是  $Zn_i^+$ , 其迁移活化能约为 0.5 eV<sup>[16]</sup>, ZnO 晶体中因氧空位对电子的俘获和发射产生了 410 nm 波长光的吸收带, 该电子弛豫过程的活化能为 0.35 eV 左右<sup>[17]</sup>, 但是氧空穴的扩散系数特别小, 为  $1.12 \times 10^{-14} \sim 5.53 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ <sup>[18]</sup>, 而填隙锌离子的扩散系数较大, 室温下为  $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 在 398 K 时能达到  $8.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ <sup>[19]</sup>. 在试验温度范围内测到的 TSC 曲线陷阱能级均接近于 0.5 eV, 且随着 ZnO 电阻片老化时间的增加而增大, 这说明了老化所引起的活化能增加与填隙锌离子有关, 也即 ZnO 电阻片在老化时填隙锌离子是主要的迁移离子.

### 3 交流老化机理的探讨

Eda 认为<sup>[3]</sup>ZnO 压敏电阻交流老化主要是由于肖特基势垒耗尽层中的离子迁移引起的, 结合上述 TSC 测试结果可以得出, 在 ZnO 压敏电阻的交流老化过程中存在着填隙锌离子的迁移,  $Zn_i^+$  离子迁移的结果是肖特基势垒发生对称畸变, 具体作用情况解释如图 5 所示<sup>[3-5]</sup>.

1) 在交流正半波电压作用下, 假设右侧施加正偏压, 则左侧为正向肖特基势垒, 右侧为反向肖特基势垒, 如图 5(a)所示. 反向偏压侧肖特基势垒耗尽层中的填隙锌离子向晶界层迁移, 即离子往左侧方向迁移, 与右侧界面层的负电荷的锌空穴反应生成中

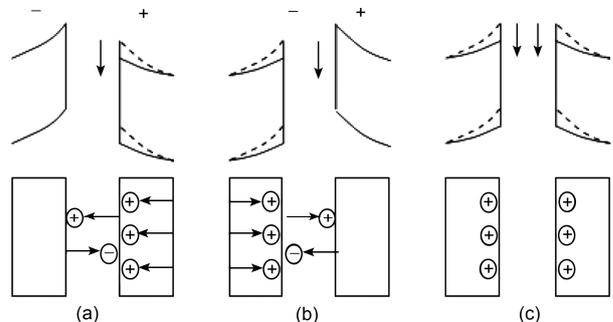


图 5 交流电压作用下的离子迁移

性离子, 反应如下:

$$V_{Zn}^- = V_{Zn}^x + e^-, \quad (10)$$

$$Zn_i^+ + e^- = Zn_i^x. \quad (11)$$

由(10)和(11)式得到

$$Zn_i^+ + V_{Zn}^- = Zn_i^x + V_{Zn}^x. \quad (12)$$

通过(12)式的反应, 耗尽层中有一个带正电荷的填隙锌离子  $Zn_i^+$  消失, 在界面上有一个带负电荷的锌空穴  $V_{Zn}^-$  消失, 而产生了中性缺陷  $Zn_i^x$  和  $V_{Zn}^x$ . 因此, 在连续电压作用下, 右侧反向肖特基势垒高度由于  $V_{Zn}^-$  的不断消耗而降低, 导致反向肖特基势垒发生较大的畸变.

同时, 正向肖特基势垒侧的耗尽层也发生离子迁移, 迁移离子主要是晶界层的 Bi 和 Co 等阳离子, 由于离子迁移很少(TSC 测试中未测试到), 其造成的正向肖特基势垒畸变较小.

2) 当所加电压的极性改变时, 如图 5(b)所示, 在交流电压的负半波作用下, 左侧耗尽层中的填隙锌离子向晶界层迁移, 与在左侧界面上的负电荷的锌空穴反应生成中性离子, 导致左侧反向肖特基势垒降低, 畸变较大. 同时, 右侧的正向肖特基势垒由于晶界层的 Bi 和 Co 等阳离子迁移发生畸变但是较小.

3) 交流电压作用下极性改变时, 由于交流情况下的电场密度是相同的, 晶界层中的离子迁移被抵消了. 然而在耗尽层中的离子迁移则不能忽略, 因为当为反向肖特基势垒时, 在其上施加一个较大电场, 而当为正向肖特基势垒时, 在其上只施加一个较小电场. 在电压不断改变极性时, 耗尽层的填隙锌离子一会儿往晶界层的方向迁移, 一会儿往反方向迁移, 但左右两边运动的距离不相等, 最终填隙锌离子迁移到达肖特基势垒的界面, 与锌空穴发生反应生成中性离子. 这种情况导致 ZnO 晶粒-晶界层-ZnO 晶粒的界面形成的两个肖特基势垒发生对称畸变, 两侧势垒高度均有所降低, 如图 5(c)所示.

肖特基势垒高度  $\phi_B$  的表达式为:

$$\phi_B = \frac{e^2 N_s^2}{2\epsilon_0 \epsilon_r N_d}, \quad (13)$$

式中,  $N_s$  为表面态密度,  $N_d$  为施主密度,  $e$  为电子电荷,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数,  $\epsilon_r$  为相对介电常数. (13)式表明, 势垒高度  $\phi_B$  的下降是由表面态密度  $N_s$  的下降或界面负电荷的减少而引起的, 也可能是由晶粒中施

主浓度  $N_d$  的增加或耗尽层中正电荷的增加而引起的. 而在 ZnO 压敏电阻的交流老化过程中, 离子迁移影响着表面态和施主密度的变化, 进而影响着肖特基势垒高度的变化. 一方面, 迁移离子使表面态密度  $N_s$  降低, 导致肖特基势垒高度降低; 另一方面, 迁移离子影响晶粒中施主密度  $N_d$ , 施主密度  $N_d$  增加, 导致肖特基势垒高度降低.

由于热刺激电流是由于离子运动引起的, 而老化过程中肖特基势垒的畸变也是由于离子迁移引起的, 故陷阱电荷量  $Q_{TSC}$  可以看成是老化时引起肖特基势垒畸变的离子电荷, 老化过程中迁移累积的电子量与  $Q_{TSC}$  成正比例. 迁移离子影响界面及耗尽层的空间电荷的分布, 导致肖特基势垒发生畸变. 由 TSC 测试结果可以发现, 随着老化时间的增加试样内部的空间电荷量会增大, 表明离子迁移加剧, 势垒高度降低更多, 更深能级陷阱捕捉到电子, 将它们完全释放所需的能量也就增大, 陷阱能级  $E$  相应增大.

泄漏电流与势垒高度的关系为<sup>[20]</sup>:

$$J = J_0 \exp \frac{-(\phi_B - \beta E^{1/2})}{KT}. \quad (14)$$

由(14)式可知, 当外施电压和温度一定时, 势垒高度的降低会导致试样中流过的泄漏电流增加, 阻性电流相应增加, 功率损耗和试样的阻性电流之间存在着线性关系, 功率损耗也会相应的增加. 随着老化时间的增加, 迁移累积的离子量增加, 导致肖特基势垒高度降低更多, 试样的阻性电流更大, 阻性电流的自加热作用明显增大, 由于压敏电阻的负温度系数, 更容易导致压敏电阻本身发热和散热的热平衡被破坏, 最终可能导致热破坏.

## 4 结论

1) 氧化锌压敏电阻片的功率损耗值随着老化时间的增加而增大, 其增大的倍数的对数值与老化时间的 0.5 次幂成正比.

2) 氧化锌压敏电阻片的 TSC 陷阱电荷量与老化时间的 0.5 次幂成正比增加, 与功率损耗有相同的变化趋势.

3) TSC 测试表明陷阱能级在 0.5 eV 附近, 反映了交流老化与填隙锌离子有关.

4) 陷阱电荷量  $Q_{TSC}$  可以看成是老化时引起肖特基势垒畸变的离子电荷, 随老化时间的增加试样内

部的空间电荷量增大, 离子迁移加剧, 表面态密度的减小和施主密度的增加导致肖特基势垒高度的降低, 势垒高度的降低进一步导致泄漏电流的增加, 最后导致功率损耗的增加。

## 参考文献

---

- 1 吴维韩, 何金良, 高玉明. 金属氧化物非线性电阻特性和应用. 北京: 清华大学出版社, 1998. 2-8
- 2 Matsuoka M. Nonohmic properties of zinc oxide ceramic. *J Appl Phys*, 1971, 10(6): 736-746
- 3 Eda K, Atsushi Iga A, Matsuoka M. Degradation mechanism of non-Ohmic zinc oxide ceramics. *J Appl Phys*, 1980, 51(5): 2678-2684
- 4 Eda K. Conduction mechanism of non-ohmic zinc oxide ceramics. *J Appl Phys*, 1978, 49(5): 2964-2972
- 5 Eda K. Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents. *J Appl Phys*, 1984, 56 (10): 2948-2956
- 6 Gupta T K, Carlson W G. A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor. *J Mater Sci*, 1985, 20(10): 3487-3500
- 7 Gupta T. Barrier voltage and its effect on stability of ZnO varistor. *J Appl Phys*, 1982, 53(11): 7401-7409
- 8 Chiang Y M, Kingery W D, Levinson L M. Compositional changes adjacent to grain boundaries during electrical degradation of a ZnO varistor. *J Appl Phys*, 1982, 53(3): 1765-1768
- 9 张树高, 季幼章. 氧化锌压敏电阻的老化机理. *功能材料*, 1993, 14(6): 529-532
- 10 李盛涛, 刘辅宜, 宋晓兰, 等. 关于氧化锌非欧姆陶瓷老化机理的新见解. *中国电机工程学报*, 1993, (S1): 41-45
- 11 Pei G L, He J L. Effects of interior micro-cracks on the aging of ZnO nonlinear varistors. *Insulators and Surge Arresters*, 2002, 185(1): 28-30, 32
- 12 裴根林, 何金良. ZnO 非线性电阻内部的微裂纹在老化中的作用. *电瓷避雷器*, 2002, 185(1): 28-30, 32
- 13 徐先芝, 招誉颐. 氧化锌避雷器加速老化试验评述. *电瓷避雷器*, 1993, (01): 38-39, 42
- 14 胡敏. 氧化锌阀片加速老化试验条件的研讨. *电瓷避雷器*, 1992, (05): 49-54
- 15 王立衡. 介质的热刺激电流理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1988. 109-164
- 16 Eda K. Zinc oxide varistors. *IEEE Electr Insul M*, 1989, 5(6): 28-30
- 17 成鹏飞, 李盛涛, 李建英. ZnO 压敏陶瓷介电损耗的温度谱研究. *物理学报*, 2009, 58(8): 5721-5724
- 18 张美蓉. ZnO 压敏陶瓷老化机理的研究. 西安: 西安交通大学, 1991
- 19 赵景茂, 谷丰, 赵旭辉, 等. 铝阳极氧化膜的半导体特性. *物理化学学报*, 2008, 24(1): 147-151
- 20 陈志清, 谢恒堃. 氧化锌压敏瓷极其在电力系统中的应用. 北京: 水利电力出版社, 1991