

静电放电对功率肖特基二极管 I - V 及低频噪声特性的影响*

刘玉栋[†] 杜磊 孙鹏 陈文豪

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2011 年 11 月 7 日收到; 2011 年 12 月 6 日收到修改稿)

本文基于人体放电模型分别对肖特基势垒二极管的阴极和阳极进行同一电压脉冲下的多次放电, 利用热电子发射理论、 $1/f$ 噪声的迁移率涨落模型和白噪声理论, 分别深入研究静电放电损伤对器件 I - V 和低频噪声的影响. 结果表明, 静电放电作用于肖特基二极管阴极时损伤更严重, 噪声参量变化率更大. 随着放电次数的增加, 正向特性无变化, 反向电流总体增大, 偶有减小; 而正向和反向 $1/f$ 噪声均增大. 鉴于噪声与应力条件下器件内部产生的缺陷与损伤有关, 且更敏感, 故可将低频噪声特性用作肖特基二极管的静电放电损伤灵敏表征工具.

关键词: 肖特基二极管, 低频噪声, 静电放电

PACS: 72.70.+m, 73.30.+y, 52.80.Mg

1 引言

近些年, 由于航天、军事领域的特殊要求, 半导体器件和集成电路向高速、高集成、低功耗方向发展, 导致器件抗过电压能力下降, 对电过应力 (Electrical Overstress, EOS) 和静电放电 (Electrostatic Discharge, ESD) 更加敏感. 其中, 肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode, SBD) 以其低功耗、大电流、高频率等优点, 被广泛应用于微波通信、高频整流、开关电源和保护电路中作为整流和续流元件. 该器件是高频快速开关电源的关键部件, 常用于小功率 DC/DC 转换器中的输出整流二极管^[1,2]和光伏电池板的旁路保护二极管.

SBD 的缺点在于反向击穿电压较低, 故在其正常工作中, 很容易因短路、ESD、开关反转、负载突降甚至雷击引发的 EOS 和空间系统充放电引发的静电放电而损坏. 其中, EOS/ESD 引起的各种器件失效比例高达 45%^[3], 曾经造成过国际数颗通讯卫星发生故障无法飞行^[4].

因此, 鉴于 SBD 在航天通信领域的重要应用及 ESD 对其损伤的严重性, 本文采用电学与低频噪声相结合的方法, 研究高压 ESD 脉冲下 SBD 的退化, 以便更好理解损伤过程, 并优选出可能的灵敏表征参量.

2 实验

2.1 实验条件

实验器件采用 MIC 公司生产的商用 1N5819 型 Si 材料肖特基势垒整流器.

静电放电采用苏州某公司生产的 ESD-606G 型静电发生器, 选用人体模型 (HBM) 模块产生 ESD 脉冲电压. 为了避免累积热效应的影响, 相邻两次放电时间间隔不低于 5 s.

实验在室温下分两步进行:

(1) 将所有器件进行编号, 利用半导体参数测试仪观察各器件 I - V 特性, 并通过低频噪声测试系统测量初始低频噪声.

(2) 分别对器件的阴极和阳极加 ESD 脉冲, 放

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB631002) 资助的课题.

[†] E-mail: liuyudong0918@sina.com

电电压恒为 3kV, 放电次数拟为 20 次. 每次 ESD 后, 分别测量 $I-V$ 特性和正/反向低频噪声.

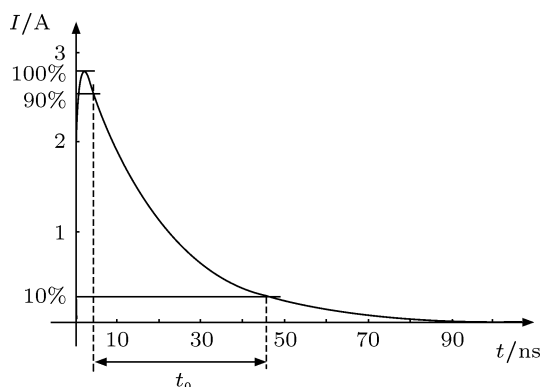


图1 HBM ESD 事件的电流波形

2.2 实验结果

2.2.1 $I-V$ 特性

对 SBD 的阳极和阴极分别加 ESD 脉冲, 得到其 $I-V$ 特性变化情况, 如图 2 和图 3.

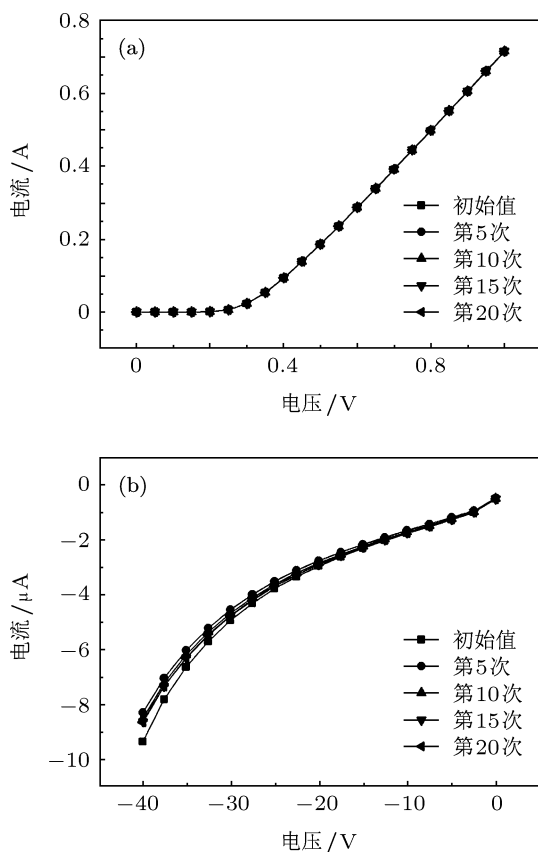


图2 阳极受 ESD 后 $I-V$ 特性变化 (a) 正向; (b) 反向

由图可知, 随着 ESD 次数的增加, 无论是给阳

极还是阴极加脉冲, SBD 的正向 $I-V$ 特性均无变化. 对于阳极加脉冲的器件, 其反向电流随放电次数的增加先减小后增大, 而阴极加脉冲的器件其反向电流随放电次数先增大后减小.

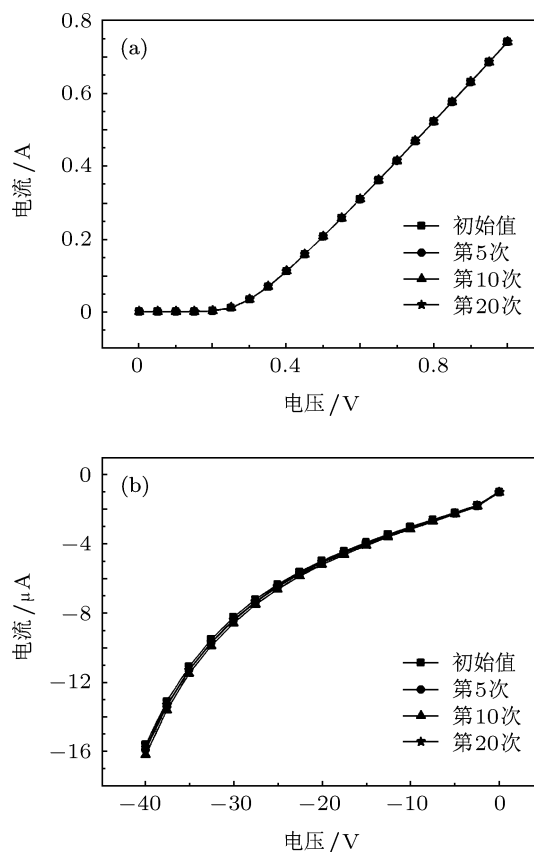


图3 阴极受 ESD 后 $I-V$ 特性变化 (a) 正向; (b) 反向

2.2.2 低频噪声特性

对 SBD 的阳极和阴极分别加 ESD 脉冲, 得到其低频噪声变化情况, 如图 4 和图 5.

由图可知, 无论是阳极加脉冲还是阴极加脉冲, SBD 的正向低频噪声均随放电次数的增大而增大; 而反向低频噪声在 1—10 Hz 内随放电次数增大而增大, 10—10 kHz 内随放电次数增大而减小, 且阴极加脉冲的器件表现更明显.

3 分析讨论

3.1 $I-V$ 特性

SBD 主要电流运输机理为多数载流子的热电子发射^[5-8], 其等效电路如图 6 所示. 其中 V_{FB} 是肖特基势垒上的压降, R_D 是轻掺杂扩散区电

阻; R_s 和 R_c 是衬底电阻和接触电阻.

正偏条件下, 通过肖特基势垒的电流为

$$I_F = AA^*T^2 \exp\left(\frac{q(V_{FB} - \phi_B)}{kT}\right), \quad (1)$$

其中 A 为有效截面积, $A^* \equiv \frac{4\pi mk^2q}{h^3}$ 为理查德森常数, ϕ_B 为势垒高度.

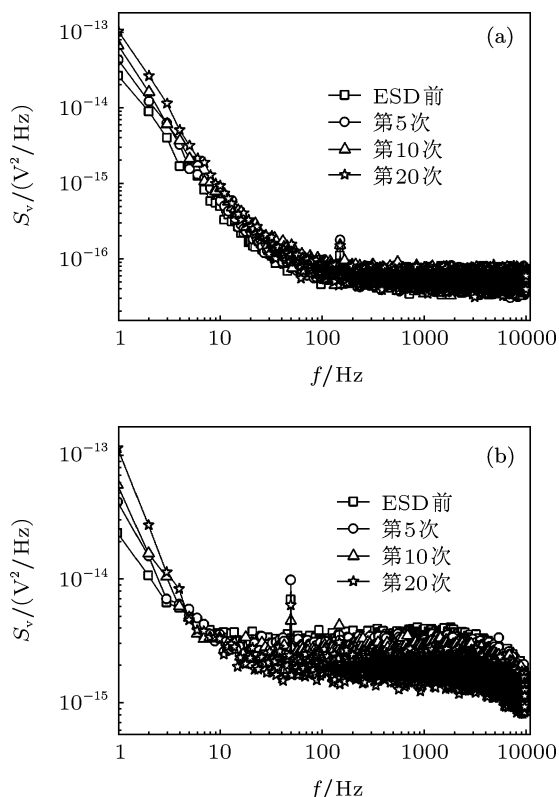


图4 阳极受ESD后低频噪声变化 (a) 正向噪声; (b) 反向噪声

加ESD脉冲后, 势垒高度降低导致 I_F 增大; 同时, 已知实验中用的肖特基势垒二极管为Si材料的, 其内部由阳极金属、二氧化硅电场消除材料、N-外延层、N型硅基片、N⁺阴极层及阴极金属等构成, 在N型基片和阳极金属之间形成肖特基势垒. N型半导体主要靠自由电子导电, 掺入的杂质越多, 自由电子的浓度就越高, 导电性能也就越强. 半导体物理学^[7]中在讨论n型半导体的费米能级时将温度划分为五个范围: 1) 温度很低时, 大部分施主杂质能级仍被电子所占据, 只有少量施主杂质发生电离, 即弱电离; 2) 中间电离区; 3) 强电离区, 大部分杂质都电离; 4) 过渡区, 导带中的电子由全部电离的杂质和本征激发共同提供; 5) 高温本征激发区, 温度继续升高, 使本征激发产生的本征载流子数远多于杂质电离产生的载流子数,

这种情况与未掺杂的本征半导体情形一样, 此时有效掺杂浓度降低. 而对于掺杂的硅半导体, 主要的散射机构是声学波散射和电离杂质散射:

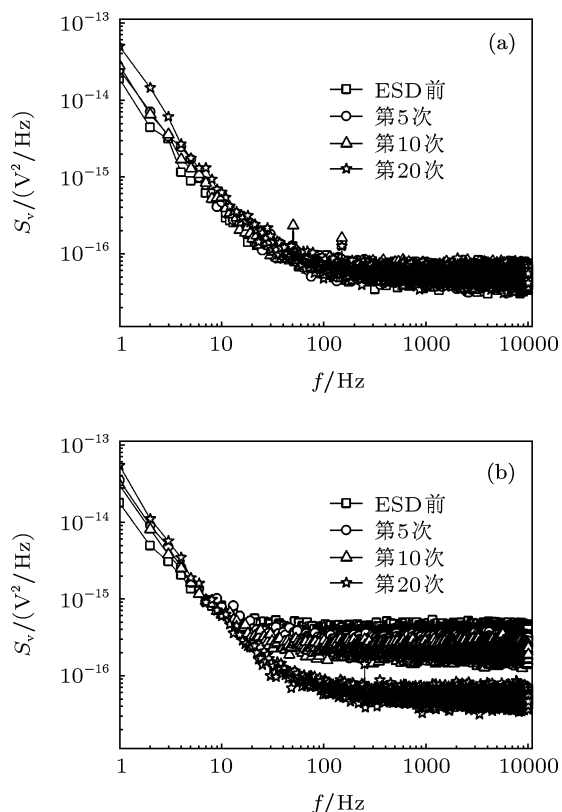


图5 阴极受ESD后低频噪声变化 (a) 正向噪声; (b) 反向噪声

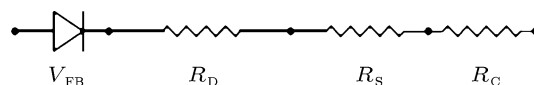


图6 肖特基二极管等效电路

声学波散射:

$$\mu_s = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2}}, \quad (2)$$

电离杂质散射:

$$\mu_i = \frac{q}{m^*} \frac{T^{3/2}}{BN_i}, \quad (3)$$

根据

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_i} + \dots, \quad (4)$$

得总的迁移率

$$\mu = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}}. \quad (5)$$

在杂质浓度较低的样品中, 电离杂质浓度 N_i 很小, $\frac{BN_i}{T^{3/2}}$ 可以略去, 晶格散射起主要作用, 所以当 ESD 使得结上耗尽区温度上升时, 迁移率随温度升高迅速减小, R_D 增大. 综合之前提到的肖特基势垒对 I_F 的影响使得正向压降受影响不大, 正向 I - V 特性无明显变化. 该现象与 Hadzi-Vukovic 等人 [9] 的实验现象相似.

SBD 的反向电流主要由热电子发射电流、反向隧道电流以及肖特基势垒空间电荷层中的产生复合电流组成 [10].

①根据热电子发射理论, 热电子发射电流

$$I_{MS} = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{qV_i}{kT}\right), \quad (6)$$

其中势垒高度的降低会使该电流增大.

②考虑势垒阻挡作用, 能量低于势垒顶的电子有一定几率穿透势垒, 其几率与电子能量及势垒厚度有关. 由隧道效应形成的反向电流 $I_{tn} = A \cdot qN_C v_{th} P_T$, 其中隧穿几率

$$P_T = \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2qm^*} \phi_{Bn}^{3/2}}{\hbar E}\right),$$

E 为电场强度. 势垒高度降低使得隧穿几率增大, 导致该部分反向电流增大.

③肖特基势垒空间电荷层中的产生复合电流为

$$I_{g-r} = A \cdot \frac{qn_i W}{2\tau_r}, \quad (7)$$

其中 n_i 为本征载流子浓度, W 为耗尽层区宽度, τ_r 为载流子寿命.

反向电流应为三者之和, 即 $I_r = I_{MS} + I_{tn} + I_{g-r}$, 求导得:

$$\begin{aligned} \Delta I_r &= \Delta I_{MS} + \Delta I_{tn} \\ &= -\frac{q}{kT} I_{MS} \Delta \phi_{Bn} - \frac{2\sqrt{2qm^*} \phi_{Bn}^{1/2}}{\hbar E} I_{tn} \Delta \phi_{Bn} \\ &\equiv -I_X \Delta \phi_{Bn}, \end{aligned} \quad (8)$$

当器件受到 ESD 作用时, 势垒高度降低 ($\Delta \phi_{Bn}$ 为负), 反向电流增大 (ΔI_r 为正).

实验中分别对器件的阳极和阴极加多次静电脉冲后反向电流偶尔出现减小, 并不完全与公式推导的结果符合, 该现象可能与器件本身结构有关 [11]. 结深较浅、结面积较小的器件, 本身结构中许多部分都易在 ESD 的作用下发生改变. 首先, 其表面态本身不稳定, 受到 ESD 作用易发生改变, 既

有可能导致器件可靠性降低, 也有可能导致势垒高度小范围变化随时间而自我恢复. 其次, 当 ESD 作为反偏电压加于肖特基结时, 在极薄的结上几乎承受了全部的电压, 且瞬时功率密度很大, 在结区类似电场局部集中的地方, 温度急剧上升而形成热点, 当温度达到硅的熔点 (1420 °C) 时, 就会导致肖特基结表面晶格某点过热熔融, 而由于再结晶时存在不确定性, 故也可能出现规则的结晶, 使得损伤自行恢复. 对于多次 ESD 的注入, 会使结表面晶格多次经历熔融结晶的重组过程, 可能出现本来分布不均匀的晶格分布均匀的现象, 同时还可能使晶格结构中的杂质离子由于场的激励作用到达不易影响结特性的部位, 从而起到退火作用.

3.2 低频噪声特性

电子器件噪声通常包括白噪声、 $1/f$ 噪声和 g - r 噪声, 后两者被称为低频噪声, 由器件内的缺陷和杂质引起. 总的噪声功率谱密度可写为

$$S(f) = A + B/f^\gamma + C/(1 + (f/f_0)^\alpha), \quad (9)$$

A 为白噪声的幅度, B 为 $1/f$ 噪声的幅度, γ 为频率指数因子, g - r 噪声的幅度为 C , 转折频率 f_0 和指数因子 α . 不同噪声分量及各分量的不同表征参量对应于器件的不同结构特征和缺陷.

对于 SBD, 低频噪声反映了其金-半接触界面陷阱分布和空间电荷区缺陷分布, 其 $1/f$ 噪声的模型主要有两种. 最早由 Hsu 提出的肖特基二极管 $1/f$ 噪声模型基于与空间电荷区陷阱有关的多级隧穿过程, 认为 $1/f$ 噪声是由空间电荷区的多级隧穿引起的载流子浓度的变化而引起的, 噪声幅值和陷阱密度成正比 [12]. 之后 Luo 等人提出了基于热电子发射理论的空间电荷区载流子迁移率涨落的模型 [13], 认为器件分为中性半导体区, 空间电荷区和金半界面三部分. 空间电荷区的电荷输运机理为漂移-扩散机理, 当电流通过金半界面时, 电流输运机理主要为热电子发射. 模型如下:

$$\begin{aligned} S_I(f) &= \frac{\alpha_H I_0}{16\pi f} \left(\frac{KT}{q(V_D - V)} \right)^{5/2} \\ &\times \left(\frac{q}{\mu m^*} \right)^2 \cdot \left(\frac{m^* \epsilon_s}{\pi N_D} \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, α_H 为胡格常数, μ 为迁移率.

根据静电放电过程 SBD 的正向和反向噪声变化规律, 分别提取对 SBD 阳极多次放电后, $1/f$ 噪

声幅值 B 随放电次数的变化规律. 图 7 显示的是在小电流 ($500 \mu\text{A}$) 偏置条件下, 正向 $1/f$ 噪声幅值 B 随 ESD 放电次数的增大而增大.

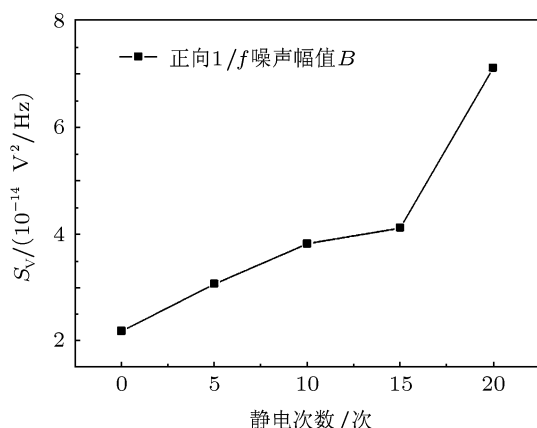


图 7 SBD 阳极受 ESD 作用下正向 $1/f$ 噪声幅值随放电次数的变化

该电流偏置条件下, $1/f$ 噪声的产生由空间电荷区载流子迁移率的涨落引起. 根据电流噪声与电压噪声的关系, SBD 的电压噪声功率谱密度 S_V 可写成 [14]:

$$S_V = \left(\frac{\partial V}{\partial I} \right)^2 \cdot S_I = R_s^2 \cdot S_I, \quad (11)$$

其中, 串联电阻 [15]

$$R_s = \frac{C}{N_D}, \quad (12)$$

C 是常数, 与掺杂浓度和电阻率之间的关系及二极管几何尺寸有关; N_D 是材料的掺杂浓度. 结合式 (6) 可得电压噪声功率谱密度为

$$S_V = \frac{\alpha_H I_0}{16\pi f} \left(\frac{C}{N_D} \right)^2 \left(\frac{kT}{q(V_D - V)} \right)^{5/2} \times \left(\frac{q}{\mu m^*} \right)^2 \cdot \left(\frac{m^* \varepsilon_s}{\pi N_D} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

ESD 作用下, 结上耗尽区温度上升, 导致掺杂浓度 N_D 和迁移率 μ 减小, S_V 增大.

多数关于 SBD 的研究测量的是不同范围正向偏置电流下低频噪声功率谱的变化, 本文鉴于 ESD 作用下 SBD 反向特性退化较正向明显, 测量其在反向偏置电压下, 噪声功率谱的变化情况. 图 8(a) 显示的是对 SBD 阳极多次放电后, 在 17 V 的反向电压偏置下, 反向 $1/f$ 噪声幅值 B 随 ESD 放电次数的增大而增大, 图 8(b) 为该条件下反向白噪声幅

值 A 随放电次数增大而减小.

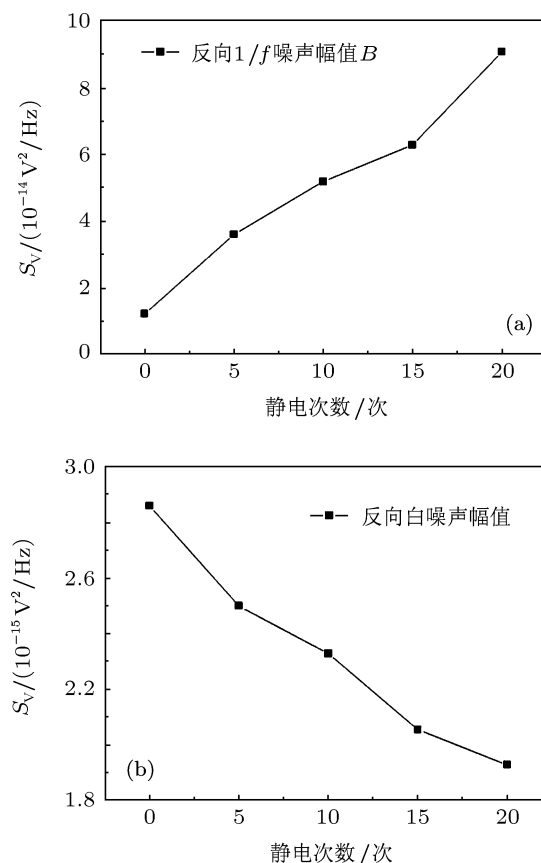


图 8 SBD 阳极受 ESD 作用下噪声参量随放电次数的变化 (a) 反向 $1/f$ 噪声幅值; (b) 反向白噪声幅值

SBD 反偏电流较小, 产生的 $1/f$ 噪声的产生也可用 Luo 提出的载流子迁移率涨落模型解释, 具体分析同正偏情况. 白噪声主要由热噪声和散粒噪声组成 [16]. 其中, 热噪声由体电阻和接触电阻产生, 故只与电阻和温度有关. 肖特基势垒结的单位接触电阻 [6] 为

$$R_c = \frac{\left(\frac{kT}{e} \right) \exp \left(\frac{+e\phi_{Bn}}{kT} \right)}{A^* T^2}, \quad (14)$$

$$S_V(f) = 4kT \frac{A \left(\frac{kT}{e} \right) \exp \left(\frac{+e\phi_{Bn}}{kT} \right)}{A^* T^2} = \frac{4Ak^2}{A^* e} \exp \left(\frac{+e\phi_{Bn}}{kT} \right), \quad (15)$$

而散粒噪声起源于载流子跨越势垒的随机性. 二极管电流散粒噪声为

$$S_I(f) = 2kTg_0 \left(\frac{I + 2I_0}{I + I_0} \right), \quad (16)$$

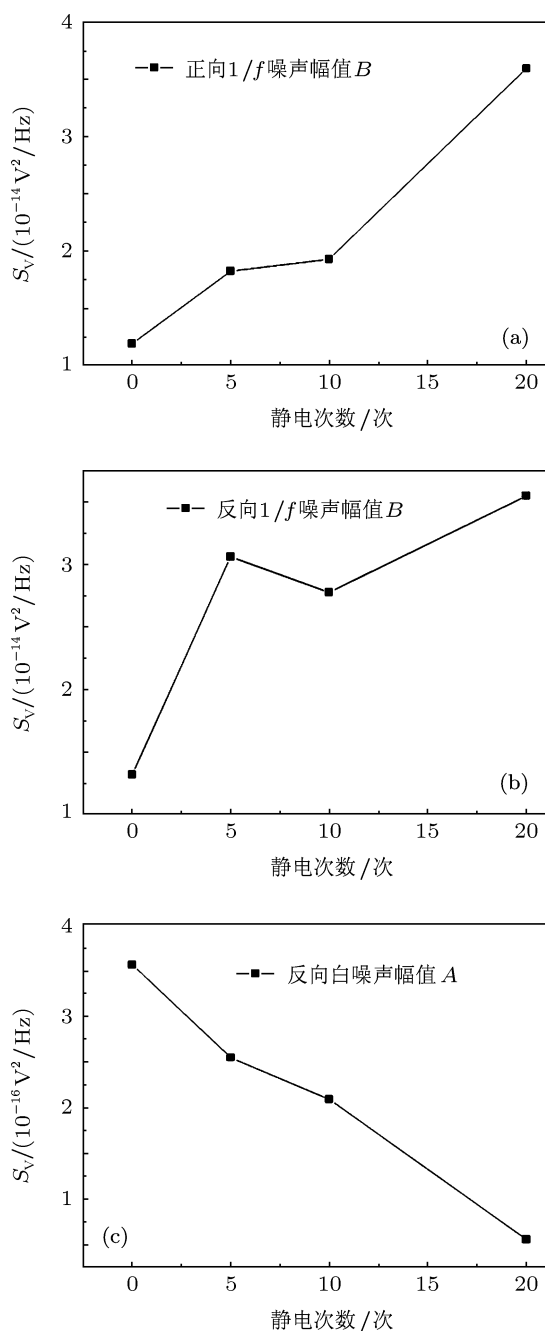


图9 SBD 阴极受 ESD 作用下各噪声参量随放电次数的变化 (a) 正向 $1/f$ 噪声幅值; (b) 反向 $1/f$ 噪声幅值; (c) 反向白噪声幅值

式中, g_0 为二极管的低频电导, 可表示为

$$g_0 = \frac{dI}{dV} = \frac{qI_0}{kT} \exp(qV/kT) = \frac{q(I + I_0)}{kT}, \quad (17)$$

实验中正偏时白噪声幅值数量级为 10^{-17} , 反偏时为 10^{-15} , 而由式 (16) 分析知, 二极管反偏时散粒噪声远小于正偏时散粒噪声, 故反偏时的白噪声可近似全看作热噪声的贡献. 而由式 (15) 知, T 在指数函数的分母位置, 它的急剧上升会导致指数函数值——热噪声的 $S_V(f)$ 迅速减小. 静电作用下, SBD 的接触电阻随结温的上升而减小, 从而热噪声减小, 最终导致白噪声幅值减小.

分别提取对 SBD 阴极多次放电后, $1/f$ 噪声幅值 B 和白噪声幅值 A 随放电次数的变化规律, 如图 9 所示.

由图 9 可知, 对 SBD 阴极多次放电后各噪声参量的总体变化规律与对阳极放电后的变化规律基本相同. 唯一不同的是对阴极放电后反向白噪声幅值变化率比对阳极放电的大, 具体利用

$$\frac{\square A}{A} = \frac{|A_{\text{ESD 后}} - A_{\text{ESD 前}}|}{A_{\text{ESD 前}}}$$

计算可知:

$$(\square A/A)_{\text{阳极 ESD}} = 32.6\%,$$

而 $(\square A/A)_{\text{阴极 ESD}} = 84.3\%$. 当 ESD 脉冲加于 SBD 阴极时, 由于在薄的结合面上几乎承受了全部的电压, 因此在结区的耗散变大, 而在结区非均匀的地方, 由于热逸散, 温度 T 较阳极而言急剧上升, 结合式 (15) 得白噪声最终大幅减小.

4 结 论

本文基于 ESD 实验及器件性能退化物理机理分析, 研究多次 ESD 对 SBD 特性的影响. 结果表明: 阳极与阴极分别加静电脉冲条件下, 后者对 SBD 的损伤更严重. 此外, SBD 的正向 I - V 特性无明显变化; 反向电流随放电次数的增加总体增大, 中间偶尔出现减小. 正、反向噪声参量变化明显, 且相同参量的变化规律一致. 其中正、反向 $1/f$ 噪声幅值和反向白噪声幅值变化明显. 因此, 可选取正反 $1/f$ 噪声幅值这两个低频噪声参数及反向白噪声幅值作为 SBD 的 ESD 损伤灵敏表征参量, 其测量对于准确快速测试和分析此类损伤具有重要意义.

- [1] Yang L X, Du L, Bao J L, Zhuang Y Q, Chen X D, Li Q W, Zhang Y, Zhao Z G, He L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5869 (in Chinese) [杨丽侠, 杜磊, 包军林, 庄奕琪, 陈晓东, 李群伟, 张莹, 赵志刚, 何亮 2008 物理学报 **57** 5869]
- [2] Chen X D 2009 *MS Thesis* (Xi'an: XiDian University) (in Chinese) [陈晓东 2009 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [3] Wang Y H, Yu Z G, Sun Z J 2007 *Reliability Design of Electronic Components* (Beijing: Science Press) pp1–280 (in Chinese) [王蕴辉, 于宗光, 孙再吉 2007 电子元器件可靠性设计 (北京: 科学出版社) 第 1—280 页]
- [4] Liu S H 2004 *Electrostatic Discharge and Damage Protection* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press) p2 (in Chinese) [刘尚合 2004 静电放电及危害防护 (北京: 北京邮电大学出版社) 第 2 页]
- [5] Liu J, Hao Y, Feng Q, Wang C, Zhang J C, Guo L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3483 (in Chinese) [刘杰, 郝跃, 冯倩, 王冲, 张进城, 郭亮良 2007 物理学报 **56** 3483]
- [6] Neamen D A (Translated by Zhao Y Q, Yao S Y, Xie X D et al.) 2005 *Semiconductor Physics Devices* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp239–241 (in Chinese) [Donald A. Neamen 著赵毅强, 姚素英, 解晓东等译 2005 半导体物理与器件 (北京: 电子工业出版社) 第 239—241 页]
- [7] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2008 *Semiconductor Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) pp186–188 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生 2008 半导体物理学 (北京: 国防工业出版社) 第 186—188 页]
- [8] Zhang L, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Ma Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2738 (in Chinese) [张林, 张义门, 张玉明, 韩超, 马永吉 2009 物理学报 **58** 2738]
- [9] Hadzi-Vukovic J M, Jevtic M M 2007 *Diamond Relat. Mate.* **16** 81
- [10] Chang Y C, Zhang Y M, Zhang Y M 2001 *Xidian Sin.* **28** 467 (in Chinese) [常远程, 张义门, 张玉明 2001 西安电子科技大学学报 **28** 467]
- [11] Yang J, Liu S H, Liu H B, Qi S F 2007 *Hebei Uni. Sin.* **27** 620 (in Chinese) [杨洁, 刘尚合, 刘红兵, 祁树锋 2007 河北大学学报 (自然科学版) **27** 620]
- [12] Hsu S T 1971 *IEEE Trans Electron Devices* **18** 882
- [13] Luo M Y, Bosman G, Van Der Ziel A, Hench L L 1988 *IEEE Trans Electron Devices* **35** 1351
- [14] Schiebel R A 1994 *IEEE Trans Electron Devices* **41** 768
- [15] Harris R D, Frasca A J 2006 *IEEE Trans Nuclear Science* **53** 1995
- [16] Zhuang Y Q, Sun Q 1993 *Noise and its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* (Beijing: National Defense Industry Press) pp24–47 (in Chinese) [庄奕琪, 孙青 1993 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术 (北京: 国防工业出版社) 第 24—47 页]

The effect of electrostatic discharge on the I - V and low frequency noise characterization of Schottky barrier diodes*

Liu Yu-Dong[†] Du Lei Sun Peng Chen Wen-Hao

(School of Technology Physics, Xi dian University, Xi'an 710071, China)

(Received 7 November 2011; revised manuscript received 6 December 2011)

Abstract

Based on the analysis of thermal electron emission, the model of the carrier mobility fluctuation and the white noise theory, the effect of electrostatic discharge (ESD) on the I - V and low frequency noise of Schottky barrier diode (SBD) is discussed in this paper. The different Human Body Model(HBM) ESD injected times with the same voltage peaks are applied to the cathode and anode separately. It is found that the diode subjected to the cathode stress shows greater degradation than subjected to the anode stress, and the magnitude of noise shows significant change. With the increase of ESD injected times, the forward characteristic has no change, while reverse current almost increases at each time. The magnitudes of forward and reverse $1/f$ noise increase all the time. In view of the relationship between defects and damage, and the noise sensibility, the low frequency noise can serve as a tool for researching the sensitivity to the electrostatic discharge damage of SBD.

Keywords: Schottky barrier diodes, low frequency noise, ESD

PACS: 72.70.+m, 73.30.+y, 52.80.Mg

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB631002).

[†] E-mail: liuyudong0918@sina.com