

栅氧化层经时击穿的非平衡统计理论分析方法

赵文静 丁梦光 杨晓丽 胡海云

Nonequilibrium statistical theoretical analysis method of TDDB of gate oxide

Zhao Wen-Jing Ding Meng-Guang Yang Xiao-Li Hu Hai-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 100502 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200108

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200108>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微动条件下材料磨损率的一种计算分析方法

A method of calculating and analyzing wear rate of materials under fretting condition

物理学报. 2018, 67(18): 180501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180596>

氧空位迁移造成的氧化物介质层时变击穿的蒙特卡罗模拟

Monte Carlo simulation of time-dependent dielectric breakdown of oxide caused by migration of oxygen vacancies

物理学报. 2017, 66(21): 217701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.217701>

聚丙烯/氧化铝纳米电介质的陷阱与直流击穿特性

Trap distribution and direct current breakdown characteristics in polypropylene/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanodielectrics

物理学报. 2017, 66(6): 067701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.067701>

基于范阿伦卫星观测数据的等离子体层嘶声全球分布的统计分析

A statistical analysis of the global distribution of plasmaspheric hiss based on Van Allen Probes wave observations

物理学报. 2017, 66(3): 039401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.039401>

射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

Influence of  $\gamma$ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2017, 66(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.076101>

# 栅氧化层经时击穿的非平衡统计理论分析方法

赵文静 丁梦光 杨晓丽 胡海云<sup>†</sup>

(北京理工大学物理学院, 北京 100081)

(2020年1月15日收到; 2020年2月26日收到修改稿)

栅氧化层的经时击穿作为影响互补型金属-氧化物-半导体集成电路可靠性的一个重要因素, 一直是国内外学者研究的重点. 为了对其进一步研究, 首先从栅氧化层在电应力下经时击穿的微观机理出发, 基于栅氧化层中电子陷阱密度累积达到临界值时发生击穿的原理和电子陷阱生成过程的随机性, 提出了栅氧化层经时击穿的非平衡统计理论分析方法, 然后分别给出了恒定电流应力和恒定电压应力下电子陷阱生成速率方程, 导出了电子陷阱密度的概率密度分布函数. 最后以具体器件为例进行分析, 得到了栅氧化层的最概然寿命随电流应力、电压应力及其厚度的变化规律, 并类比固体断裂现象中“疲劳极限”的概念定义“击穿极限”概念. 计算出了累积失效率随电流应力、电压应力和时间的变化规律, 引入特征值来描述累积失效率达到0.63所用的时间. 结果表明: 电子陷阱密度的概率密度分布函数满足对数正态分布, 且理论结果与实验结果相符.

**关键词:** 栅氧化层, 经时击穿, 非平衡统计理论, 累积失效率

**PACS:** 05.10.Gg, 73.40.Qv, 72.20.Jv, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200108

## 1 引言

金属-氧化物-半导体 (metal oxide semiconductor, MOS) 晶体管是微处理器、半导体存储器件等超大规模集成电路的核心器件, 随着大规模及超大规模集成电路的发展, MOS 晶体管的可靠性也成为人们研究的重点之一. MOS 晶体管中栅氧化层的完整性直接与集成电路的性能、可靠性以及成品率相关, 因此研究栅氧化层的可靠性非常有必要<sup>[1-3]</sup>.

经时击穿 (time-dependent dielectric breakdown, TDDB) 是指施加的场强低于发生本征击穿时的场强, 在持续作用一段时间后发生的击穿. 人们常通过 TDDB 来评估栅氧化层的本征可靠性, 测试栅氧化层的质量<sup>[4]</sup>. 由于二氧化硅具有禁带宽度较大、介电强度较高、绝缘性好等优点, 一直是 MOS 器件栅氧化层的主要材料. 本文以二氧化硅

为例, 研究了电应力下栅氧化层的 TDDB.

多年来, 人们为了了解栅氧化层的击穿机理, 建立了许多模型, 其中包括电子俘获击穿模型<sup>[5]</sup>、空穴击穿模型<sup>[6]</sup>、感生共振隧穿模型<sup>[7]</sup>、陷阱产生相关模型<sup>[8]</sup>等. 而针对击穿过程的随机性, 也有一些模型, 如马仲发等<sup>[9]</sup>提出的逾渗模型, 其认为栅氧化层中深能级缺陷产生与积累, 形成电导逾渗通路, 造成击穿. Lee 等<sup>[10]</sup>的统计模拟模型把栅氧化层中缺陷的存在看作其减薄, 并认为栅氧化物层的寿命与空穴通量达到某一特征值所需的时间有关. Suñé等<sup>[11]</sup>将 MOS 电容器分成若干个柱状“小元胞”, 并将其定义为“击穿前退化点的区域”, 用泊松分布描述一个元胞中电子陷阱出现的概率, 假设当其中产生一定数量的电子陷阱时, 该元胞发生击穿. 但到目前为止, 栅氧化层经时击穿的物理机理依然没有完全定论, 一般认为其与栅氧化层中产生的电子陷阱有关. 本文以动态平衡模型<sup>[12]</sup>为基础, 提出了栅氧化层经时击穿的非平衡统计理论分析

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [huhay@bit.edu.cn](mailto:huhay@bit.edu.cn)

方法, 为计算 MOS 器件中栅氧化层的累计失效率、定量的分析其退化程度提供了一个新方法.

## 2 栅氧化层经时击穿的微观机理

在电应力作用下, 栅氧化层的 TDDB 过程通常可分为两个阶段: 损伤建立阶段和突变失控阶段. 在损伤建立阶段, 因电子与二氧化硅晶格发生碰撞, 注入电子的部分动能被耗散, 被耗散的动能可能造成二氧化硅中 Si-O 键的断裂, 而产生电子陷阱. 当局部电子陷阱密度达到临界值  $N_{bd}$  时, 在电极之间产生欧姆通道, 进入突变失控阶段, 其中电或热的正反馈作用导致击穿. 二氧化硅单位体积中 Si-O 键的数量是一定的, 即可以产生的陷阱数量是一定的, 所以临界陷阱密度  $N_{bd}$  与测试所用应力条件无关, 与制作工艺、面积、厚度有关 [13-15]. 由于突变失控阶段经历时间较短, 所以一般将损伤建立阶段的时间就看作栅氧化层的寿命 [6,16]. 本文只研究损伤建立阶段.

随着 MOS 器件尺寸的缩小, 栅氧化层逐渐变薄, 而工作电压却不能随之减小, 所以此时的隧穿电流主要是 Flower-Nordheim 隧穿电流. 人们一般采用恒定电流应力和恒定电压应力方法 [17] 研究栅氧化层的 TDDB 特性.

设恒流应力下  $t$  时刻二氧化硅中产生的电子陷阱密度为  $N_j(t)$ , 恒压应力下  $t$  时刻二氧化硅中产生的电子陷阱密度为  $N_u(t)$ . 它们可分别表示为 [14]

$$N_j(t) = N_0 + \frac{2\varepsilon U_0}{el^2} \left[ \exp\left(\frac{t}{\tau_u}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

$$N_u(t) = N_0 + \frac{2\varepsilon E_0^2}{K_2 el} \left[ \frac{\ln(1+t/\tau_j)}{1+(E_0/K_2)\ln(1+t/\tau_j)} \right]. \quad (2)$$

其中  $N_0$  为初始陷阱密度,  $e$  为元电荷量,  $l$  为栅氧化层厚度,  $\varepsilon$  为栅氧化层的介电常量,  $U_0$  为恒流应力下的初始电压,  $\tau_u$  为电压的驰豫特征时间, 与新电子陷阱的产生有关,  $K_2$  为与电子的有效质量和势垒高度有关的常量,  $E_0$  为外加电场强度,  $\tau_j$  为测试中电流密度的驰豫特征时间, 且

$$\tau_j = \tau_u \cdot E_0 / K_2. \quad (3)$$

## 3 非平衡统计理论分析方法

由于材料结构本身等的不均匀性, 在电应力作

用下, 栅氧化层中产生电子陷阱的位置和速率具有随机性. 随着时间的增加, 在电应力作用下, 栅氧化层中产生的电子陷阱数不断增多, 对栅氧化层造成损伤. 当两个电子陷阱接触时, 就可合并成一个较大的电子陷阱. 如果产生的电子陷阱形成了连接两个电极的欧姆通道, 就会造成栅氧化层击穿, 此击穿过程是不可逆的. 由于电子陷阱的生成过程的随机性和不可逆性, 故电子陷阱的生成速率可用广义的 Langevin 方程来描述 [18,19]:

$$\dot{N}(t) = k(N) + \beta(N)f(t). \quad (4)$$

其中  $\dot{N}(t)$  为  $t$  时刻电子陷阱的生成速率;  $k(N)$  为电子陷阱的平均生成速率, 是电子陷阱生成速率的确定部分, 由平均结构和施加的电应力共同决定;  $\beta(N)$  为涨落放大函数,  $f(t)$  为涨落函数, 二者的乘积  $\beta(N)f(t)$  是电子陷阱生成速率的随机部分, 由不均匀性涨落决定.

假设电子陷阱的生成速率与达到的退化程度无关, 只与当时及稍早施加的电应力和栅氧化层的微观结构有关 [11], 故可将电子陷阱的生成过程看作一个马尔可夫过程, 涨落函数  $f(t)$  服从如下高斯分布:

$$\langle f(t) \rangle = 0,$$

$$\langle f(t)f(t') \rangle = D\delta(t-t'), D \ll 1. \quad (5)$$

其中  $D$  为涨落长大系数,  $\delta$  为 Dirac 函数.

根据随机理论 [20], 与 Langevin 方程 (4) 等价的 Fokker-Plank 方程, 即电子陷阱密度的概率密度分布函数  $P(N_0, N, t)$  随时间的演化方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P(N_0, N, t)}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial}{\partial N} \left\{ \left[ k(N) + \frac{D}{2}\beta(N)\frac{\partial\beta(N)}{\partial N} \right] P(N_0, N, t) \right\} \\ &+ \frac{D}{2} \frac{\partial^2}{\partial N^2} [\beta^2(N)P(N_0, N, t)]. \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $P(N_0, N, t) dN$  表示在电应力下, 栅氧化层中的电子陷阱密度由初始 ( $t=0$  s) 时的  $N_0$  在  $t$  时刻增长到  $N \sim N + dN$  之间的概率. 根据局部电应力涨落和结构背景涨落的特点,  $k(N)$ ,  $\beta(N)$  和  $D$  的关系为 [18]

$$k(N) = A\beta(N). \quad (7)$$

$$D \approx \eta^2 A^2 t_{bd}. \quad (8)$$

其中  $A$  为一个与电子陷阱密度  $N$  无关的常量,

$\eta$  为总的相对偏差,  $t_{bd}$  为栅氧化层的最概然寿命. 将 (7) 和 (8) 式代入 (6) 式, 采用路径积分法可得电子陷阱密度的概率密度分布函数  $P(N_0, N, t)$  为<sup>[18]</sup>

$$P(N_0, N, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dt} |\beta(N)|} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2Dt} \left[ \int_{N_0}^N \frac{dN}{\beta(N)} - At \right]^2 \right\}. \quad (9)$$

#### 4 恒流应力下的经时击穿研究

对 (1) 式求导可得, 恒流应力下栅氧化层中电子陷阱的平均生成速率  $k(N_j)$  为

$$k(N_j) = \dot{N}_j = \frac{1}{\tau_u} \left( N_j - N_0 + \frac{2\varepsilon U_0}{el^2} \right). \quad (10)$$

对比 (10) 与 (7) 式可得

$$A = \frac{1}{\tau_u}, \quad \beta(N_j) = N_j - N_0 + \frac{2\varepsilon U_0}{el^2}. \quad (11)$$

将 (11) 式代入 (9) 式可得, 电子陷阱密度的概率密度分布函数  $P(N_0, N_j, t)$  为

$$P(N_0, N_j, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dt} \left| N_j - N_0 + \frac{2\varepsilon U_0}{el^2} \right|} \times \exp \left[ -\frac{1}{2Dt} \left( \int_{N_0}^{N_j} \frac{dN_j}{N_j - N_0 + \frac{2\varepsilon U_0}{el^2}} - \frac{t}{\tau_u} \right)^2 \right], \quad (12)$$

从 (12) 式可以看出, 当指数项为 1 时, 电子陷阱概率密度函数值最大, 即此时为电子陷阱密度的最概然值. 所以恒流应力下栅氧化层中电子陷阱密度从初始值  $N_0$  累计到  $N_{bd}$  的最概然时间, 即最概然寿命为

$$t_{bdj} = \tau_u \int_{N_0}^{N_{bd}} \frac{dN_j}{N_j - N_0 + \frac{2\varepsilon U_0}{el^2}} = \tau_u \ln \left[ \left( N_{bd} - N_0 \right) \frac{el^2}{2\varepsilon U_0} + 1 \right]. \quad (13)$$

根据 (13) 式, 并结合他人<sup>[21,22]</sup> 实验中 MOS 器件两种样品的数据进行分析, 得到栅氧化层的最概然寿命  $t_{bdj}$  随其厚度  $l$  和初始电压  $U_0$  的变化规律如图 1 所示. 其中, 样品 1<sup>[21]</sup> 和样品 2<sup>[22]</sup> 的厚度分别为  $l_1 = 10 \text{ nm}$ ,  $l_2 = 11 \text{ nm}$ ; 初始电子陷阱密度为  $N_0 = 1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[23]</sup>; 临界电子陷阱密度分别为  $N_{bd1} = 4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_{bd2} = 6.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 初

始电压分别为  $U_{01} = 13 \text{ V}$ ,  $U_{02} = 12 \text{ V}$ .

从图 1 可以看出, 恒流应力下, 如果不考虑临界电子陷阱密度  $N_{bd}$  随栅氧化层厚度  $l$  的变化, 则栅氧化层的最概然寿命  $t_{bdj}$  随其厚度  $l$  的增大而增大, 随其初始电压  $U_0$  的增大而减小. 这可能是由于栅氧化层厚度  $l$  的减薄和初始电压  $U_0$  的增大会导致其上电场强度增大, 使其更容易被击穿, 造成其寿命  $t_{bdj}$  减小.

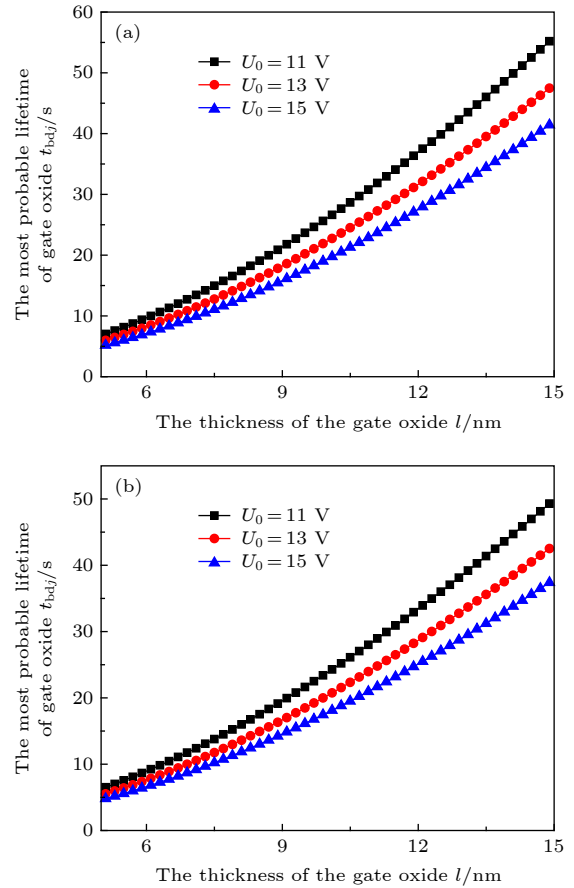


图 1 不同厚度栅氧化层的最概然寿命 (a) 样品 1<sup>[21]</sup>,  $J = 1 \text{ A/cm}^2$ ; (b) 样品 2<sup>[22]</sup>,  $J = 0.8 \text{ A/cm}^2$

Fig. 1. The most probable lifetime of gate oxide with different thickness: (a) Sample 1<sup>[21]</sup> at  $J = 1 \text{ A/cm}^2$ ; (b) sample 2<sup>[22]</sup> at  $J = 0.8 \text{ A/cm}^2$ .

当栅氧化层的材料、厚度、制作工艺、所处温度一定时, 电压的驰豫特征时间  $\tau_u$  和电流密度  $J$  的乘积为一个常量, 即<sup>[14]</sup>

$$\tau_u \cdot J = \text{常量}. \quad (14)$$

由 (13) 和 (14) 式可得栅氧化层的最概然寿命  $t_{bdj}$  与电流密度  $J$  的关系曲线, 并与实验结果进行对比, 如图 2 所示. 类比固体断裂现象中“疲劳极限”的概念定义“击穿极限”, 其表示当电流应力低于某

一值时, 很难发生 TDDB. 由图 2 可以看出, 样品 1 的“击穿极限”大约在  $0.05 \text{ A/cm}^2$ , 样品 2 的“击穿极限”大约在  $0.1 \text{ A/cm}^2$ , 在此电流应力下, MOS 器件基本可以安全使用; 理论结果与实验结果 [21,22] 趋势一致, 即栅氧化层的最概然寿命  $t_{bdj}$  随所加电流密度  $J$  的增大而减小. 但理论上推出二者是非线性关系, 与实验定量上有差别, 这或许是由于所能获得的实验数据较少, 或许是源于理论在微观机理上考虑的因素不够全面.

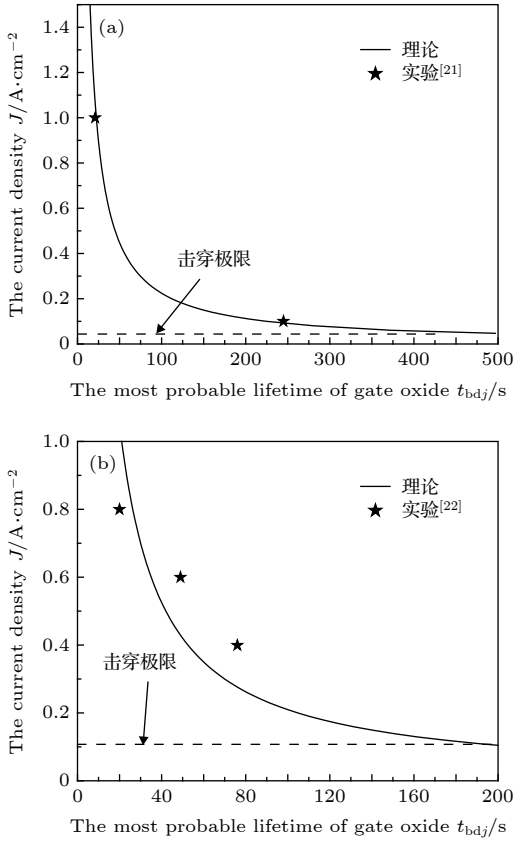


图 2 不同电流密度对应的栅氧化层的最概然寿命 (a) 样品 1; (b) 样品 2  
 Fig. 2. The most probable lifetime of gate oxide under different electric current density: (a) Sample 1; (b) sample 2.

根据 (12) 式可得, 在电流密度  $J$  不变 (即电压的弛豫特征时间  $\tau_u$  不变) 的情况下, 不同时刻电子陷阱密度的概率密度分布如图 3 所示. 显而易见, 电子陷阱密度的概率密度分布函数服从对数正态分布. 概率密度函数曲线的峰值代表某一时刻电子陷阱密度  $N_j(t)$  的最概然值. 样品 1 在电流密度  $J = 1 \text{ A/cm}^2$  (样品 2 在电流密度  $J = 0.8 \text{ A/cm}^2$ ) 的情况下, 不同时刻, 栅氧化层中电子陷阱密度  $N_j(t)$  的最概然值不同; 随着恒流应力作用时间的

增加, 概率密度函数曲线的峰值向右移, 说明电子陷阱密度  $N_j(t)$  随时间  $t$  的增加而增加; 峰高越来越小, 半峰宽越来越大, 说明随时间的增加电子陷阱数量增加, 电子陷阱密度的概率密度分布趋向于均匀化.

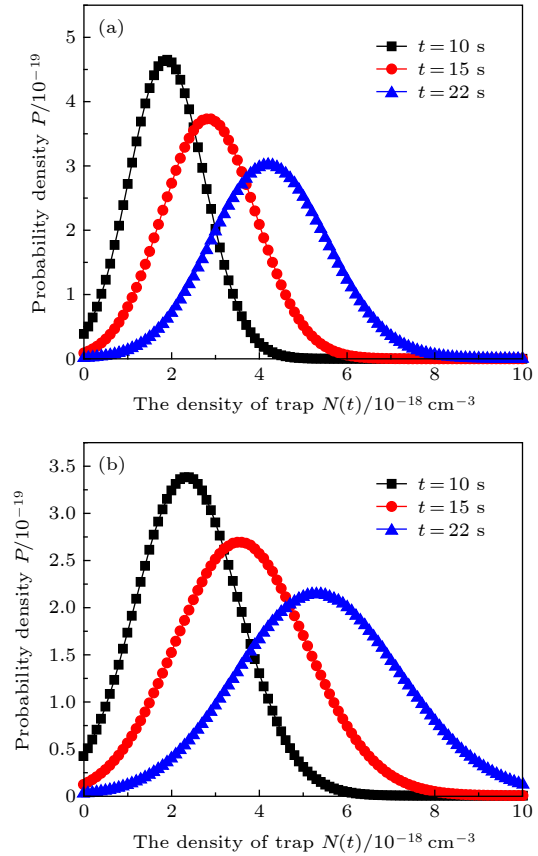


图 3 不同时刻的  $P-N$  图 (a) 样品 1,  $J = 1 \text{ A/cm}^2$ ; (b) 样品 2,  $J = 0.8 \text{ A/cm}^2$   
 Fig. 3. The probability density varies with electron trap density at different time: (a) Sample 1 at  $J = 1 \text{ A/cm}^2$ ; (b) sample 2 at  $J = 0.8 \text{ A/cm}^2$ .

在时间  $t$  不变的情况下, 不同电流密度  $J$  下电子陷阱密度的概率密度分布如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 在时间  $t = 20 \text{ s}$  时, 随着电流密度  $J$  的增大, 概率密度函数曲线的峰值向右移动, 说明电子陷阱密度  $N_j(t)$  随着电流密度  $J$  的增大而增加. 因为当电流密度增大时, 相应的就需要更大的栅极电压, 在栅氧化层厚度不变的情况下, 电压越大, 其中的电场强度越大. 注入的电子被加速到更大的速度, 因而获得了更大的能量. 使得电子与二氧化硅中的晶格碰撞时被散射的那部分能量也成比例增加. 因此产生的电子陷阱数也随之增加. 所以在同一时刻, 被施加电流应力大的二氧化硅中产生的

电子陷阱数量更多. 随着电流的增大, 概率密度函数曲线的峰高越来越小, 半峰宽越来越大. 说明随着电流的增大, 概率密度分布趋向于均匀化.

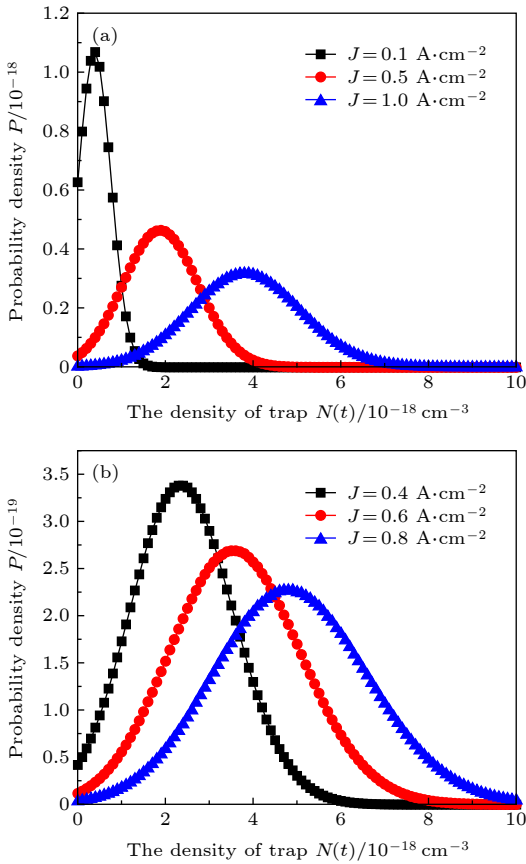


图 4 不同电流密度下的  $P-N$ 图 ( $t = 20$  s) (a) 样品 1; (b) 样品 2  
Fig. 4. The probability density varies with electron trap density under different electric current density ( $t = 20$  s): (a) Sample 1; (b) sample 2.

将某一电应力下, 概率密度分布函数  $P(N_0, N_j, t)$  从临界电子陷阱密度  $N_{bdj}$  积分到无穷大, 即可得到 MOS 器件的累积失效率  $F$  为

$$F = \int_{N_{bd}}^{\infty} P(N_0, N_j, t) dN_j. \quad (15)$$

结合 (15) 和 (12) 式, 并代入数据计算可得某一恒流应力下的累积失效率.

图 5 和图 6 分别是样品 1 和样品 2 在不同恒流应力下, 累积失效率  $F$  随时间  $t$  的变化曲线.

当累积失效率  $F$  达到 0.63 时, 大部分器件发生击穿失效, 且此时测试参数不受前期失效的影响, 与累计失效率为 1 时的测试参数接近 [17], 所以取累积失效率  $F$  达到 0.63 所用的时间  $\tau$  作为特征值, 即

$$\int_{N_{bd}}^{\infty} P(N_0, N_j, \tau) dN = 0.63. \quad (16)$$

$\tau$  可看做击穿过程的“时间尺度”,  $\tau$  越大则累积失

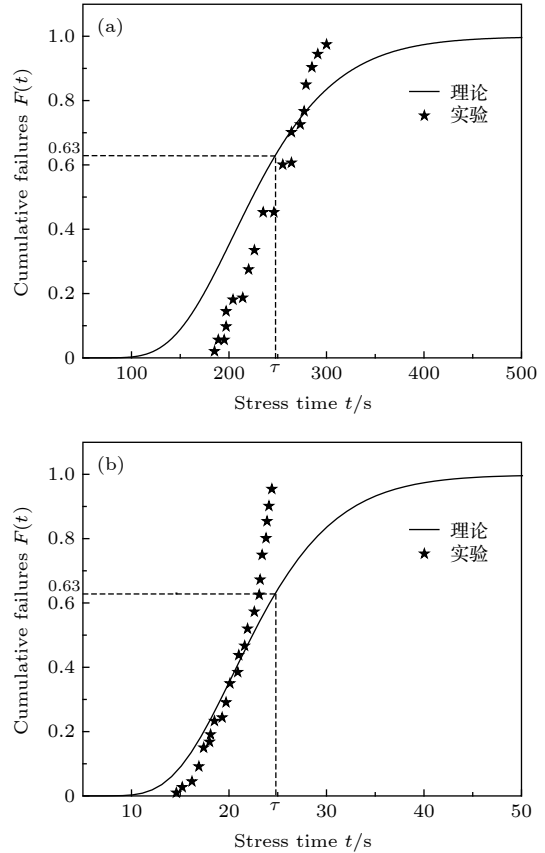


图 5 样品 1 中两种不同电流密度的累积失效率 (a)  $J = 0.1$  A/cm<sup>2</sup>; (b)  $J = 1$  A/cm<sup>2</sup>  
Fig. 5. Breakdown cumulative distributions for two different electric current densities in sample 1: (a)  $J = 0.1$  A/cm<sup>2</sup>; (b)  $J = 1$  A/cm<sup>2</sup>.

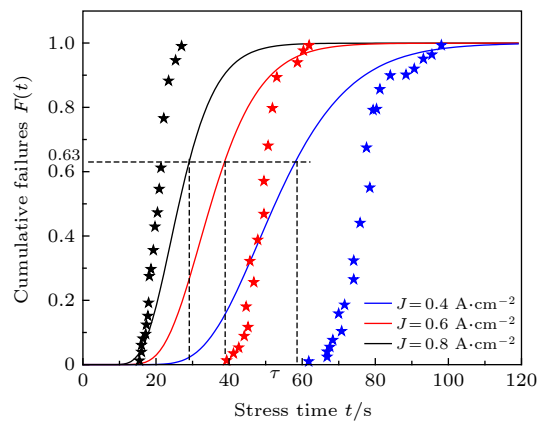


图 6 样品 2 中三种不同电流密度的累积失效率 (注: 实心五角星代表实验值, 线段代表理论值.)  
Fig. 6. Breakdown cumulative distributions for three electric current densities in sample 2. (Note: solid five-pointed star represents experimental value and line segment represents theoretical value.).

效率  $F$  达到 0.63 所需时间越长, 栅氧化层的寿命越长.

从图 5 和图 6 中可以看出, 当样品 1 在电流密度  $J$  为  $0.1 \text{ A/cm}^2$  和  $1.0 \text{ A/cm}^2$  时,  $\tau$  分别为  $249.8 \text{ s}$  和  $24.9 \text{ s}$ ; 样品 2 在电流密度  $J$  为  $0.4 \text{ A/cm}^2$ ,  $0.6 \text{ A/cm}^2$  和  $0.8 \text{ A/cm}^2$  时,  $\tau$  分别为  $58.7 \text{ s}$ ,  $39.4 \text{ s}$  和  $28.1 \text{ s}$ . 累积失效率  $F$  随时间  $t$  的增大逐渐增大,

在短时间内达到 1, 且电流密度  $J$  越大, 累积失效率  $F$  达到 1 所用的时间越短, 这个结果与实验结果 [21,22] 一致.

### 5 恒压应力下的经时击穿研究

同理可得, 在恒压应力下, 电子陷阱的平均生产速率  $k(N_u)$  为

$$k(N_u) = \dot{N}_u = \frac{2\varepsilon E_0}{el\tau_u} \left[ 1 - \frac{(N_u - N_0)le}{2\varepsilon E_0} \right]^2 \exp \left[ \frac{(N_u - N_0)leK_2}{(N_u - N_0)leE_0 - 2\varepsilon E_0^2} \right]. \quad (17)$$

对比 (17) 与 (7) 式可得

$$A = \frac{2\varepsilon E_0}{el\tau_u}, \quad \beta(N_u) = \left[ 1 - \frac{(N_u - N_0)le}{2\varepsilon E_0} \right]^2 \exp \left[ \frac{(N_u - N_0)leK_2}{(N_u - N_0)leE_0 - 2\varepsilon E_0^2} \right]. \quad (18)$$

电子陷阱密度的概率密度分布函数  $P(N_0, N_u, t)$  为

$$P(N_0, N_u, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dt}} \left[ \frac{2\varepsilon E_0}{2\varepsilon E_0 - (N_u - N_0)le} \right]^2 \exp \left[ \frac{(N_u - N_0)leK_2}{2\varepsilon E_0^2 - (N_u - N_0)leE_0} \right] \times \exp \left\{ -\frac{1}{2Dt} \left( \int_{N_0}^{N_u} \left[ \frac{2\varepsilon E_0}{2\varepsilon E_0 - (N_u - N_0)le} \right]^2 \exp \left[ \frac{(N_u - N_0)leK_2}{2\varepsilon E_0^2 - (N_u - N_0)leE_0} \right] dN_u - \frac{2\varepsilon E_0}{\tau_u le} \cdot t \right)^2 \right\}, \quad (19)$$

在恒压应力下, 栅氧化层中陷阱密度  $N_u(t)$  达到临界值  $N_{bd}$  的最概然时间, 即最概然寿命  $t_{bdu}$  为

$$t_{bdu} = \frac{el\tau_u}{2\varepsilon E_0} \int_{N_0}^{N_{bd}} \left[ \frac{2\varepsilon E_0}{2\varepsilon E_0 - (N_u - N_0)le} \right]^2 \exp \left[ \frac{(N_u - N_0)leK_2}{2\varepsilon E_0^2 - (N_u - N_0)leE_0} \right] dN_u = \frac{\tau_u E_0}{K_2} \left\{ \exp \left[ \frac{(N_{bd} - N_0)leK_2}{2\varepsilon E_0^2 - (N_{bd} - N_0)leE_0} \right] - 1 \right\}. \quad (20)$$

由 (20) 式可知, 不考虑临界电子陷阱密度  $N_{bd}$  随栅氧化层厚度  $l$  的变化, 最概然寿命  $t_{bdu}$  随样品厚度  $l$  的增大而增大, 随电场强度  $E_0$  的增大而减小.

根据样品 2 的数据进行分析, 不同厚度的栅氧化层的最概然寿命  $t_{bdu}$  如图 7 所示; 不同恒定电场  $E_0$  下, 栅氧化层的最概然寿命  $t_{bdu}$  如图 8 所示. 从

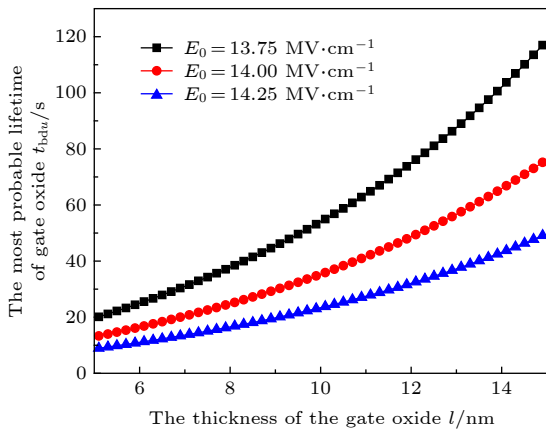


图 7 不同厚度的栅氧化层的最概然寿命

Fig. 7. The most probable lifetime of gate oxide with different thickness.

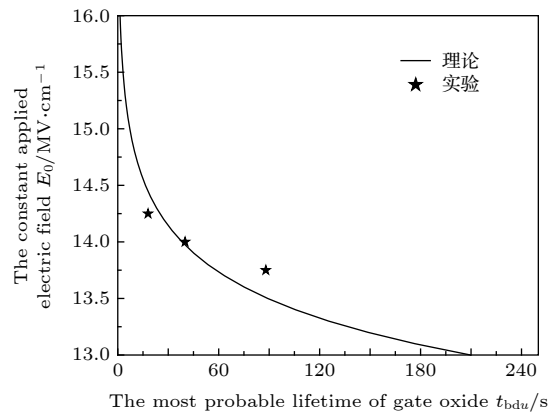


图 8 不同电场强度对应的栅氧化层的最概然寿命

Fig. 8. The most probable lifetime of gate oxide under different electric field.

图 8 中可以看出, 栅氧化层的寿命  $t_{\text{bdu}}$  随电场强度  $E_0$  的增大而减小, 其“击穿极限”大约为 5 MV/cm, 且与实验结果 [22] 趋势一致.

根据 (19) 式得到相同电场下, 不同时刻栅氧化层中电子陷阱密度的概率密度曲线如图 9 所示; 以及同一时刻, 不同电场下的概率密度曲线如图 10 所示. 由图 9 和图 10 可以看出, 随电场强度  $E_0$  和时间  $t$  的增大, 电子陷阱密度的概率密度的最概然值逐渐增大, 且电子陷阱密度的概率密度分布趋于均匀.

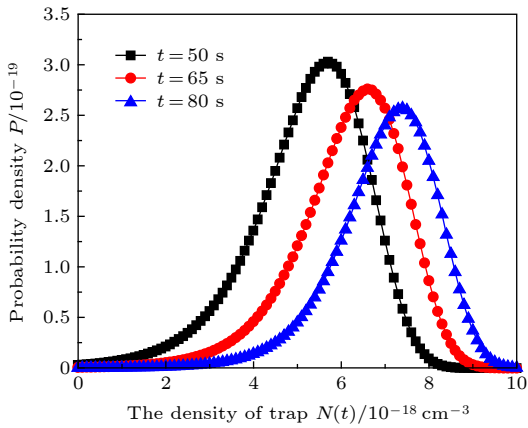


图 9  $E_0 = 13.75 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  时, 不同时刻的  $P$ - $N$  图  
Fig. 9. The probability density varies with electron trap density at different time under  $E_0 = 13.75 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

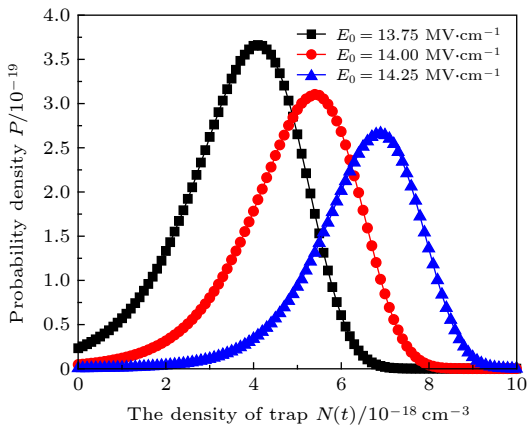


图 10  $t = 30 \text{ s}$  时, 不同电场强度下的  $P$ - $N$  图  
Fig. 10. The probability density varies with electron trap density at  $t = 30 \text{ s}$  under the different electric field.

根据 (15) 式可得某一恒定电场强度  $E_0$  下的累积失效率  $F$  随时间  $t$  变化的图像, 并与实验结果 [22] 进行了对比, 如图 11 所示. 当  $K_2 = 100 \text{ MV/cm}$  时, 理论结果与实验结果拟合较好, 但实验得到  $K_2$  的值一般在  $200 \text{ MV/cm}$  左右 [24]. 可以

看出, 当电场强度  $E_0$  为  $13.7 \text{ MV/cm}$ ,  $14.00 \text{ MV/cm}$  和  $14.25 \text{ MV/cm}$  时,  $\tau$  分别为  $71.8 \text{ s}$ ,  $46.8 \text{ s}$  和  $30.7 \text{ s}$ , 即随电场强度  $E_0$  增大栅氧化层的寿命变短; 随时间  $t$  和电场强度  $E_0$  的增大, 累积失效率  $F$  逐渐增大, 且理论结果与实验结果相符.

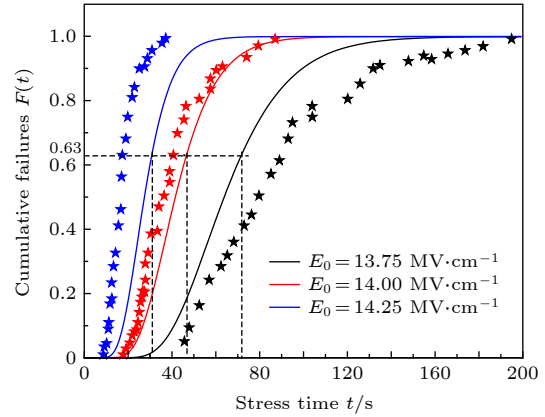


图 11 三种不同电压下的累积失效率  
Fig. 11. Breakdown cumulative distributions for three different electric field.

## 6 结 论

本文基于栅氧化层中电子陷阱生成过程的随机性, 在动态平衡模型的基础上提出了栅氧化层经时击穿的非平衡统计理论分析方法, 并以具体的 MOS 器件为例, 分别研究了在恒流应力、恒压应力情况下栅氧化层的寿命、电子陷阱密度的概率密度分布函数、累积失效率. 所得结论如下:

1) 分别对不同电应力下、不同厚度的栅氧化层进行了寿命预测; 得到在相同电流应力、电压应力下, 栅氧化层中电子陷阱密度的概率密度分布函数随时间的变化曲线; 同一时刻下, 栅氧化层中电子陷阱密度的概率密度分布函数随所加电流、电压的变化曲线, 以及累积失效率随时间、电流应力、电压应力的变化曲线.

2) 类比“疲劳极限”概念提出了“击穿极限”概念, 引入特征值作为击穿过程的时间尺度, 描述累积失效率达到 0.63 的时间.

3) 发现栅氧化层中电子陷阱密度的概率密度分布函数服从对数正态分布, 得到的累积失效率虽与 Weibull 分布所得的累积失效率形状相似, 但 Weibull 分布是基于简单的统计假设, 而非平衡理论方法是从微观机理出发严格导出的.

随着 MOS 器件的变小, 栅氧化层逐渐减薄,



其在电应力下 TDDB 的微观机理发生了变化, 动态平衡模型可能不再适用, 但我们依然可以使用非平衡统计理论方法来描述其退化程度、计算累计失效率、预测其寿命。

## 参考文献

- [1] Jane W T, Zhao Y, Zhang R Z 2010 *Semicond. Technol.* **35** 154 (in Chinese) [简维廷, 赵永, 张荣哲 2010 *半导体技术* **35** 154]
- [2] Stathis J H, Linder B P, Rodriguez R, Lombardo S 2003 *Microelectron. Reliab.* **43** 1353
- [3] Wang Y G, Xu M Z, Tan C H, Duan C H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3884 (in Chinese) [王彦刚, 许铭真, 谭长华, 段小蓉 2005 *物理学报* **54** 3884]
- [4] Hu H S, Zhang M, Lin L J 2000 *Acta Electron. Sin.* **28** 80 (in Chinese) [胡恒升, 张敏, 林立谨 2000 *电子学报* **28** 80]
- [5] Harari E 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 2478
- [6] Chen I C, Holland S E, Hu C M 1985 *IEEE Trans. Electron Devices* **32** 413
- [7] Ricco B, Azbel M Y, Brodsky M H 1983 *Phys. Rev. Lett.* **51** 1795
- [8] Apte P P, Saraswat K C 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 1595
- [9] Ma Z F, Zhuang Y Q, Du L, Bao J L, Li W H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2046 (in Chinese) [马仲发, 庄奕琪, 杜磊, 包军林, 李伟华 2003 *物理学报* **52** 2046]
- [10] Lee J C, Chen I C, Hu C M 1988 *IEEE Trans. Electron Devices* **35** 2268
- [11] Suñé J, Placencia I, Barnio N, Farrés E, Martin F, Aymerich X 1990 *Thin Solid Films* **185** 347
- [12] Nissan-Cohen Y, Shappir J, Frohman-Bentchkowsky D 1985 *J. Appl. Phys.* **58** 2252
- [13] Yao F Y, Hu H S, Zhang M 2001 *Acta Electron. Sin.* **29** 1522 (in Chinese) [姚峰英, 胡恒升, 张敏 2001 *电子学报* **29** 1522]
- [14] Suñé J, Placencia I, Barniol N, Farrés E, Aymerich X 1989 *Phys. Status Solidi A* **111** 675
- [15] Lin L J, Zhang M 2000 *Acta Elect. Sin.* **28** 59 (in Chinese) [林立谨, 张敏 2000 *电子学报* **28** 59]
- [16] Dumin D J, Maddux J R, Scott R S, Subramoniam R 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 1570
- [17] Zhou Q P 2018 MS. Thesis (Beijing: North China University of Technology) (in Chinese) 周钦佩 2018 硕士学位论文 (北京: 北方工业大学)
- [18] Xing X S 1991 *Mater. Sci. Prog* **5** 22 (in Chinese) [邢修三 1991 *材料科学进展* **5** 22]
- [19] Yang X L, Wang B R, Hu H Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 180501 (in Chinese) [杨晓丽, 王斌容, 胡海云 2018 *物理学报* **67** 180501]
- [20] Kottalam J, Lindenberg K, West B J 1986 *J. Stat. Phys.* **42** 979
- [21] Olivo P, Ricco B, Nguyen T N, Kuan T S, Jeng S J 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 2245
- [22] Chen C F, Wu C Y, Lee M K, Chen C N 1987 *IEEE Trans. Electron Devices* **34** 1540
- [23] Liu H X, Hao Y 2002 *Chin. J. Semicond.* **23** 952 (in Chinese) [刘红侠, 郝跃 2002 *半导体学报* **23** 952]
- [24] Piyas S 2017 *J. Semicond.* **38** 50

# Nonequilibrium statistical theoretical analysis method of TDDB of gate oxide

Zhao Wen-Jing   Ding Meng-Guang   Yang Xiao-Li   Hu Hai-Yun<sup>†</sup>

(*School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

( Received 15 January 2020; revised manuscript received 26 February 2020 )

## Abstract

As one of the important factors affecting the reliability of Complementary metal oxide semiconductor integrated circuits, the time-dependent dielectric breakdown of gate oxide has always been the focus of domestic and foreign scientists. The previous researches have shown that when the electrons pass through the silicon dioxide lattice and collide with it, part of their kinetic energy will be dissipated, then among of which can create some sort of defects that behave as electron traps. However, when the electron traps density reaches a critical value in the gate oxide, the destructive thermal effects open a low-resistance ohmic path between the electrodes, thus, triggering the breakdown conducting mechanism. In this paper, in order to employing a statistical theoretical analysis method, the behavior related with time-dependent dielectric breakdown of gate oxide was investigated in detail. The following useful results are obtained, (i) According to the microscopic mechanism of the time-dependent dielectric breakdown of gate oxide under electrical stresses associated with the randomness and irreversibility of the electron traps generation in gate oxide, a theoretical analysis method has been proposed, which is based on the equation of the electron traps generation rate combined with the Langevin equation in random theory and the Fokker-Planck equation in the non-equilibrium statistical theory. (ii) In light of the dynamic equilibrium model, the generation rate equations of electron traps under constant current stress and constant voltage stress as well as the probability density distribution functions of electron traps density were determined. By integrating these distribution function, the cumulative failure rate was further obtained. (iii) Taking the specific metal oxide semiconductor capacitors as examples, the relationship between the most probable lifetime of the gate oxide and the constant current stress, constant voltage stress, as well as its thickness have been revealed. And the concept of "breakdown limit" was defined by analogy with the concept of "fatigue limit" in the phenomenon of solid fracture. (iv) The dependence of the cumulative failure rate on the current stress, voltage stress, and time has been presented. A characteristic value of the time was introduced to indicate the time when the cumulative failure rate reaches 0.63. At this time, most devices have breakdown failure. Besides, the test parameters are not affected by previous failures, and they are close to that of the cumulative failure rate of 1. The results show that the probability density distribution function of electron traps density satisfies lognormal distribution, and the obtained distribution of failures fits well with the experimental statistical data.

**Keywords:** gate oxide, time-dependent dielectric breakdown, nonequilibrium statistical theory, cumulative failure

**PACS:** 05.10.Gg, 73.40.Qv, 72.20.Jv, 78.20.Bh

**DOI:** [10.7498/aps.69.20200108](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200108)

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [huly@bit.edu.cn](mailto:huly@bit.edu.cn)