

# 薄栅 SiO<sub>2</sub> 相关击穿电荷的研究

许铭真 谭长华 王阳元

北京大学微电子学研究所, 北京 100871

(1992 年 3 月 3 日收到; 1992 年 4 月 22 日收到修改稿)

在恒流应力条件下, 用时间相关介质击穿(TDDB)特性, 研究了 Ar-O<sub>2</sub> 热生长 SiO<sub>2</sub> 的时间相关击穿的电荷性质. 研究表明: (1) 相关击穿电荷(Q<sub>BD</sub>)不是常数, 而是与氧化层电场强度(E<sub>OX</sub>)有关; (2) 阳极相关击穿电场(E<sub>BD</sub>)近似为常数; (3) 电场加速因子(β)不是常数, 它亦不是与 E<sub>OX</sub><sup>2</sup>成正比, 而是呈更为复杂的电场依赖关系.

PACC: 7340Q

## 1. 引言

薄栅 SiO<sub>2</sub> 的稳定性与可靠性问题是超大规模集成电路性能研究中的关键问题之一. 因此, 薄栅 SiO<sub>2</sub> 材料寿命的预测分析成为评价薄栅 SiO<sub>2</sub> 质量的一项重要内容. 众多的实验结果说明, 薄栅 SiO<sub>2</sub> 的不可逆击穿与外电场施加的时间相关, 电场越高, 击穿时间越短. 人们称这种现象为时变介质击穿(Time Dependent Dielectric Breakdown, TDDB), 常用相关击穿电荷(charge to Breakdown)Q<sub>BD</sub>来描述, 而且  $Q_{BD} = \int_0^{t_{BD}} J_{FN}(t) dt$ . 其中, t<sub>BD</sub>称为相关击穿时间(Time to Breakdown)或称为材料寿命. 在恒流应力条件下, Q<sub>BD</sub>与 t<sub>BD</sub>之间有简单的函数关系, 即  $Q_{BD} = J_{FN} \cdot t_{BD}^{[1]}$ . J<sub>FN</sub>是恒定注入 SiO<sub>2</sub> 的 Fowler-Nordheim(F-N)隧道电流密度. 在有限的电流密度变化范围内, Q<sub>BD</sub>随 J<sub>FN</sub>的相对变化量远比 t<sub>BD</sub>小得多(即  $\frac{dQ_{BD}}{Q_{BD}} \ll \frac{dt_{BD}}{t_{BD}}$ ). 相对而言, Q<sub>BD</sub>可以近似地看作是常数. 因此, 至今为止, 人们仍常用 Q<sub>BD</sub>的大小作为薄栅 SiO<sub>2</sub> 质量的判据<sup>[2-4]</sup>. 然而, 在较大的电流密度变化范围内, Q<sub>BD</sub>与 J<sub>FN</sub>有关<sup>[2,5,6]</sup>, 因此须要深入研究 Q<sub>BD</sub>与 J<sub>FN</sub>之间的关系, 并引入新的判据来推测低场应用条件下的薄栅 SiO<sub>2</sub> 使用寿命.

为了预测实际应用于低场下的薄栅 SiO<sub>2</sub> 材料寿命, 人们已较广泛地研究了击穿时间 t<sub>BD</sub>与电场 E<sub>OX</sub>之间的关系, 并引入了电场加速因子(electric field acceleration factor)β, 以便于对薄栅绝缘材料的使用寿命进行比较、评估. 传统的 β 因子定义为相关击穿时间的对数变化量与氧化层电场变化量之比值. 因此, β 因子的一个小的偏差, 将导致 SiO<sub>2</sub> 寿命的显著误差. 大量的实验结果表明, β 因子与氧化层电场 E<sub>OX</sub>有关, β 与 E<sub>OX</sub>之间的依赖关系, 对于寿命预测来说是很重要的. C. Hu 等人<sup>[7,8]</sup>, 在带间碰撞电离模型的基础上, 得到了 β 因子与 E<sub>OX</sub>之间的关系式, 并在一定程度上解释了不同测试电场范围内所得到的 β 因子有较大涨落的原因. 然而, 根据 Baraff 电离击穿定则<sup>[9]</sup>, 在 SiO<sub>2</sub> 中产生带间碰撞电离所需的电离能约为 13.5eV, 若使电子达到如此高的能量, 相应的电场强度约为 30MV/

cm. 而实际的击穿电场却远远小于此值. 已有文献报道<sup>[10,11]</sup>, 在 SiO<sub>2</sub> 厚度小于 500 Å 时, 产生带间碰撞电离是困难的. 因此, 用带间碰撞电离模型来解释  $\beta$  因子的电场依赖关系, 使人难以信服. 本文用新生陷阱的单分子产生-俘获模型研究  $Q_{BD}$ ,  $\beta$  的电场依赖关系, 得到了新的关系式.

## 2. 基本关系式

### 1. $Q_{BD}$ 与 $E_{OX}$ 之间的关系

以阳极电场相关击穿模型<sup>[12]</sup>为基础, 用阳极相关击穿电场来描述恒流应力条件下的薄栅 SiO<sub>2</sub> 击穿现象, 表征量为阳极击穿电场强度  $E_{BD}$ .

$$E_{BD} = E_{OX} + \Delta E_a, \quad (1)$$

其中,  $E_{OX}$  为 SiO<sub>2</sub> 的初始电场, 它由恒定电流  $J_{FN}$  的大小来决定<sup>[13]</sup>;  $\Delta E_a$  为击穿时 SiO<sub>2</sub> 的临界阳极电场增量, 而且

$$\Delta E_a = KQ_{BD} \quad (2)$$

$K$  是常数, 仅与工艺相关.

由(1)和(2)式, 得到

$$Q_{BD} = \frac{E_{BD}}{K} - \frac{E_{OX}}{K}, \quad (3)$$

其中,  $E_{BD}$  近似为常数<sup>[12]</sup>.

所以,  $Q_{BD}$  与  $E_{OX}$  之间将有线性关系.

### 2. 电场加速因子 $\beta$ 与 $E_{OX}$ 之间的关系

$\beta$  定义为:

$$\beta = -\frac{d \log t_{BD}}{dE_{OX}} = -\frac{1}{2.3} \frac{d \ln t_{BD}}{dE_{OX}} \quad (4)$$

C. Hu<sup>[7,8]</sup> 曾用碰撞电离模型得到了  $\beta \propto E_{OX}^2$  的解析关系式. 我们在阳极电场相关击穿模型的基础上, 在恒定电流应力条件下, 得到:

$$t_{BD} = (E_{BD} - E_{OX}) / (K \cdot J_{FN}), \quad (5)$$

其中,

$$J_{FN} = A E_{OX}^2 e^{-B/E_{OX}} \quad (6)$$

和

$$\beta = \frac{1}{2.3 E_{OX}} \left[ 2 + \frac{B}{E_{OX}} - \frac{1}{\frac{E_{BD}}{E_{OX}} - 1} \right] \quad (7)$$

通常,

$$B/E_{OX} + 2 \gg \frac{1}{E_{BD}/E_{OX} - 1}$$

(7) 式可近似表示为

$$\beta = \frac{1}{2.3 E_{OX}} \left( \frac{B}{E_{OX}} + 2 \right), \quad (8)$$

在低场下, 若  $B/E_{OX} \gg 2$ , 则有

$$\beta \approx \frac{B}{2.3 E_{OX}^2} \quad (9)$$

(9) 式与 C. Hu 的关系式类同. 因此,  $\beta \propto E_{OX}^2$  的关系仅为低场情况下的一个特例.

### 3. 实验与结果

#### (1) 样品

N 型硅单晶片, <100> 晶向, 电阻率为  $4\Omega\text{cm}$ , Ar-O<sub>2</sub> 热生长 SiO<sub>2</sub>, 厚度为  $212\text{\AA}$ , N<sup>+</sup>-poly-Si 栅 MOS 电容器, 栅面积为  $6.0 \times 10^{-4}\text{cm}^2$ .

#### (2) 实验与结果

用 HP4145B 半导体参数测试仪, 测量恒流应力条件下的 F-N 电压随时间的漂移特性曲线, 直到发生电击穿. 图 1 给出恒定电流  $J_{\text{FN}}$  为  $10^{-2}\text{A/cm}^2$ — $10^1\text{A/cm}^2$  范围内的相关击穿电荷  $Q_{\text{BD}}$ , 相关阳极击穿电场  $E_{\text{BD}}$  与  $E_{\text{OX}}$  之间的关系. 实验结果表明: 当  $E_{\text{OX}} < 14.7\text{MV/cm}$ ,  $Q_{\text{BD}}$  与  $E_{\text{OX}}$  之间有好的线性关系, 得到  $K=0.103\text{MV}\cdot\text{cm/C}$ ; 相关阳极击穿电场  $E_{\text{BD}} \approx 17.3\text{MV/cm}$ . 图 2 给出电场加速因子  $\beta$  与  $E_{\text{OX}}$  的关系曲线. 其中, —•— 标记的是 C. Hu<sup>[7,8]</sup> 的碰撞电离模型得到的解析关系曲线; ——— 标记的是阳极电场相关击穿模型得到的解析关系曲线; 图中的实验数据取自参考文献[7]或[8]. 图 2 说明, 在低场区, 两种模型给出的  $\beta \sim E_{\text{OX}}$  关系趋于一致的规律.

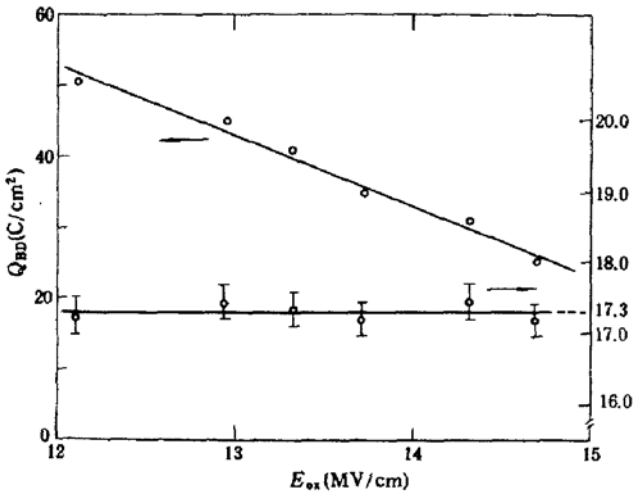


图 1  $Q_{\text{BD}}, E_{\text{BD}}$  与  $E_{\text{OX}}$  之间的关系

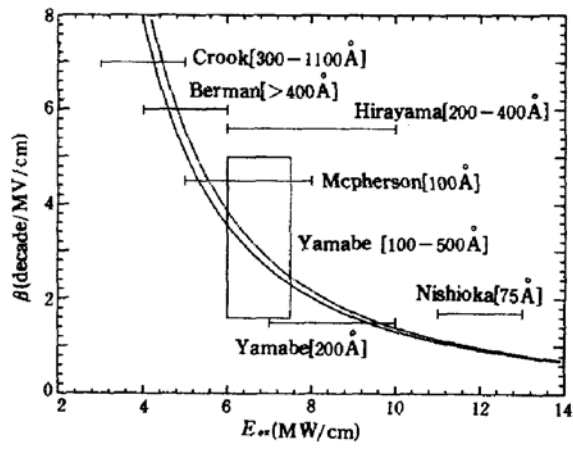


图 2 电场加速因子  $\beta$  与  $E_{\text{OX}}$  之间的关系曲线

### 4. 讨论与结论

恒流应力条件下的薄栅 SiO<sub>2</sub> 的寿命试验, 从数据处理上来讲是方便的, 但是, 在考虑了  $Q_{\text{BD}}$  与电流  $J_{\text{FN}}$  (或电场  $E_{\text{OX}}$ ) 的依赖关系以后, 寿命预测关系式应作相应的修正. 图 3 给出电荷相关击穿模型、阳极电场相关击穿模型计算的  $t_{\text{BD}}$  与  $J_{\text{FN}}$  之间的关系曲线. 其中, —•— 为电荷相关击穿模型, ——— 为阳极电场相关击穿模型, \* 为实测数据. 实验结果说明, 后一种模型更合理些. 另外, 用阳极电场相关击穿模型亦可以解释电场加速因子  $\beta$  与电场  $E_{\text{OX}}$  之间的关系, 无须引入碰撞电离模型<sup>[7,8]</sup>. 分析结果

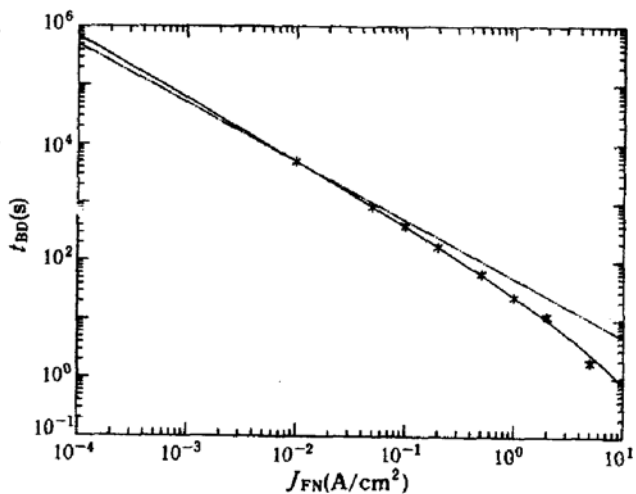


图 3  $t_{\text{BD}}$  vs  $J_{\text{FN}}$  的计算曲线及与实验的比较

表明,  $\beta$  既不是常数, 亦不是与  $E_{OX}^2$  成正比, 而呈更为复杂的电场依赖关系, 只有在电场较低时, 才有  $\beta \propto E_{OX}^2$  的关系. 而且这种关系仅是 SiO<sub>2</sub> 中陷阱俘获电荷的一种表现, 与带间碰撞电子-空穴对的产生过程没有必然的关系.

本文在阳极电场相关击穿模型的基础上, 研究了相关击穿电荷  $Q_{BD}$  与  $J_{FN}$  (或  $E_{OX}$ ) 之间的关系, 讨论了薄 SiO<sub>2</sub> 的寿命预测问题, 得到了与寿命预测相关的电场加速因子  $\beta$  新的关系式. 可以预计, 上述问题也将在恒压应力试验中表现出来, 仅数学表达式不同而已.

### 参 考 文 献

- [1] C. Hu, Tech. Digest IEDM, 368(1985).
- [2] D. R. Wolter, J. J. Van & D. Schoot, *Philps J. Res.*, **4**, 115(1985).
- [3] Z. H. Liu, P. T. Lai and Y. C. Cheng, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-38**, 344(1991).
- [4] P. Olivo, T. N. Nguyen and B. Ricco', *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-38**, 527(1991).
- [5] C. Hu, Tech. Digest IEDM, 660(1986).
- [6] Z. H. Liu, P. K. KO, C. Hu, C. G. Sodini, B. J. Gross, T. P. Ma and Y. C. Cheng, Extended Abstracts of the 1991 International Conference on Solid State Devices and Materials, 26-28, 1991.
- [7] I. C. Chen and C. Hu, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-8**, 140(1987).
- [8] C. Lee, IH-Chin and C. Hu, *IEEE Trans Electron Device*, **ED-32**, 2268(1988).
- [9] G. A. Baraff, *Phys. Rev.*, **128**, 2507(1962).
- [10] Z. A. Weinberg, M. V. Fischetti and Y. Nissan Cohen, *J. Appl. Phys.*, **59**, 824(1986).
- [11] W. L. Warren and P. M. Lenahan, *J. Appl. Phys.*, **62** 4305(1987).
- [12] 许铭真, 谭长华, 王阳元, 半导体学报, **13**(5), 293(1992).
- [13] M. Lenzlinger and E. H. Snow, *J. Appl. Phys.*, **40**, 271(1969).

## Study on Charge to Breakdown of Thin Gate SiO<sub>2</sub>

Xu Mingzhen Tan Changhua Wang Yangyuan

*Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871*

(Received 3 March 1992; revised manuscript received 22 April 1992)

### Abstract

Charge to breakdown of Ar-O<sub>2</sub> thermal grown SiO<sub>2</sub> was investigated by time dependent dielectric breakdown (TDDB) characteristics under constant current stresses. The results show (1) charge to breakdown,  $Q_{BD}$ , cannot be constant but is dependent on the oxide electric field,  $E_{OX}$ . (2) anode field to breakdown,  $E_{BD}$ , is approximately a constant. (3) electric field acceleration factor,  $\beta$ , is neither a constant nor proportional to  $1/E_{OX}^2$ . It's a more complex dependence on the electric field.

PACC: 7340Q