

# FN 应力下超薄栅 N-MOSFET 失效的统计特征及寿命预测

穆甫臣 许铭真 谭长华 段小蓉

(北京大学微电子所, 北京 100871)

**摘要:** 通过对不同氧化层厚度的 N-MOSFET 在各种条件下加速寿命实验的研究, 发现栅电压漂移符合 Weibull 分布。Weibull 分布统计分析表明, 5.0、7.0 和 9.0 nm 器件在 27 和 105°C 下本征失效的形状因子相同, 即本征失效的失效机制在高低温度下相同。非本征失效的比例随温度升高而增大。在此基础上得出平均寿命( $t_{50}$ )与加速电场 $E$ 成指数关系, 进而提出了器件的寿命预测方法。此方法可预测超薄栅 N-MOSFET 在 FN 应力下的寿命。

**关键词:** 可靠性; 超薄栅 MOSFET; Weibull 分布

**EEACC:** 0170N; 2560R

中图分类号: TN 386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)12-1577-04

## 1 引言

超薄栅氧化层的老化和击穿特性已成为许多科研工作者的研究对象, 这方面的研究已持续了 30 多年, 而且随着器件尺寸大幅度减小,  $\text{SiO}_2$  的可靠性显得尤为重要。众所周知, 在恒压应力或恒流应力下持续足够长时间  $\text{SiO}_2$  将被击穿。这种与时间相关的介质击穿(简称 TDDB)早在二十几年前就成为了众多研究者的研究对象。许多报道都试图就介质击穿的物理机制给出明确的结论, 但击穿的确切机制仍然是一个颇有争议的课题, 争议的焦点是对用来预测使用电场下寿命的电场加速模型的选择。目前, 最为流行的两个模型是 " $E$ " 模型和 " $1/E$ " 模型。 $"E"$  模型认为击穿与化学键断裂相关<sup>[1]</sup>, 相应地有, 平均寿命(又称  $t_{50}$ )的自然对数  $\ln t_{50}$  与电场成线性关系; $"1/E"$  模型基于通过氧化层梯势垒的 FN 电子注入, 认为击穿是由于氧化层中空穴的注入或由碰撞电离产生和俘获而导致的局部电场增强<sup>[2,3]</sup>,  $\ln t_{50}$  与电场的倒数成正比。

很多人利用 TDDB 实验根据 " $E$ " 模型或 " $1/E$ " 模型预测了器件的寿命<sup>[4-6]</sup>, 用不同模型预测的结果差别非常大。随着氧化层不断减薄, 击穿特性已不再像厚氧那样明显<sup>[7-9]</sup>, 许多科研工作者已开始研究氧化层退化(TDDW)与 TDDB 的关系<sup>[7-13]</sup>。在实际应用中, 大部分情况是由于氧化层退化导致电参数的退化, 进而导致器件失效, 只有很小部分器件能工作到击穿。本文用 Weibull 分布对 N-MOSFET 在 27 和 105°C, 恒压应力下栅电压漂移( $\Delta V_{\text{gw}}$ )进行了统计分析, 得出平均寿命与加速电场  $E$  成指数关系, 并在此基础上提出了寿命预测方法。

## 2 Weibull 分布

众所周知, Weibull 分布广泛应用于微电子可靠性等领域。Weibull 分布可由下面两式来描述:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad t \geq 0 \quad (1)$$

$$f(t) = \left[ \frac{\beta}{\eta^{\beta}} \right] t^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad t \geq 0 \quad (2)$$

式中  $F(t)$  为累积失效率;  $f(t) = dF(t)/dt$  为分布

穆甫臣 男, 1970 年出生, 博士生, 现主要从事小尺寸 MOS 器件特性表征及建模、TDDB、HCE、电迁移及可靠性的统计研究。

许铭真 女, 1939 年出生, 教授, 主要从事小尺寸 MOS 器件特性及其表征、半导体材料可靠性物理和器件可靠性物理的研究。

谭长华 男, 1936 年出生, 教授, 主要从事小尺寸器件物理及可靠性物理的研究。

密度函数;  $\eta$  为尺寸因子, 其值为特征寿命(对应于  $F(t) = 63.2\%$ );  $\beta$  是形状因子, 形状因子与失效机制相关, 不同失效机制对应不同的形状因子。 $\eta$  和  $\beta$  为 Weibull 分布的两个特征参数。由(1)式可得,

$$\ln\{-\ln[1-F(t)]\} = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (3)$$

平均寿命( $t_{50}$ )和均方差如(4)和(5)式所示,

$$t_{50} = \eta \Gamma\left[\frac{1}{\beta} + 1\right] \quad (4)$$

$$D(t) = \eta^2 \left\{ \Gamma\left[\frac{2}{\beta} + 1\right] - \left[ \Gamma\left[\frac{1}{\beta} + 1\right] \right]^2 \right\} \quad (5)$$

式中  $\Gamma\left[\frac{1}{\beta} + 1\right]$  和  $\Gamma\left[\frac{2}{\beta} + 1\right]$  为 Gamma 函数。由此可见, 只要知道特征寿命  $\eta$  和形状因子  $\beta$ , 平均寿命和方差便可以通过(4)和(5)式计算得出。

若系统符合 Weibull 分布, 则  $\ln\{-\ln[1-F(t)]\}$  与  $\ln t$  成线性关系, 斜率为形状因子  $\beta$ 。 $\ln\{-\ln[1-F(t)]\}-\ln t$  图就是 Weibull 分布图, 如图 1 所示。

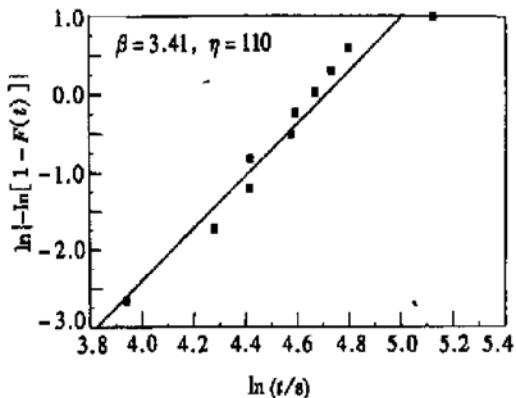


图 1 Weibull 分布图

FIG. 1 Weibull Plot

### 3 实验及结果讨论

实验采用 N-MOSFET, 氧化层厚度分别为 5.0、7.0 和 9.0 nm, 宽长比均为 15/15。在 27 和 105°C 下分别进行了恒压应力实验, 由于失效统计需要, 每个应力条件下至少做了 10 个器件的加速寿命实验。失效判据为 1.7 倍费米势( $\phi_b$ )下栅电压漂移( $\Delta V_{gw}$ ) 10 mV。

图 2 为 27°C 下 5.0、7.0 和 9.0 nm 器件的 Weibull 分布图。由此图不难看出, 各个厚度各个应力条件下的数据都可以很好地线性拟合, 这说明以栅电压漂移为失效判据, 器件失效符合 Weibull 分布, 并且各组数据的斜率, 即 Weibull 分布中的形状

因子  $\beta$  都相同。又 Weibull 分布的形状因子  $\beta$  体现了器件的失效机制, 不同失效机制对应不同的形状因子<sup>[14, 15]</sup>, 所以, 在 27°C 下, 5.0、7.0 和 9.0 nm 器件在选定的恒压应力下失效机制相同, 并且非本征失效(Extrinsic Failure, 简称 EF) 数量很少。

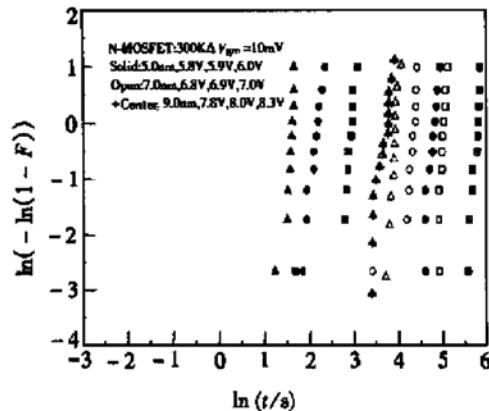


图 2 5.0、7.0 和 9.0 nm N-MOSFET 在 27°C 下的 Weibull 分布

FIG. 2 Weibull Plot of N-MOSFETs with 5.0, 7.0 and 9.0 nm Gate Oxides at 27°C

从 5.0 nm N-MOSFET 在 27 和 105°C 下的 Weibull 分布图(图 3)发现, 105°C 下 EF 的数量比 27°C 下明显增多, 本征失效(Intrinsic Failure, 简称 IF) 的形状因子在两个温度下相同。说明 EF 与温度

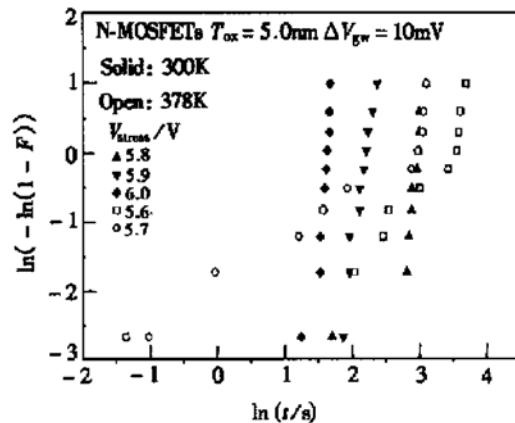


图 3 5.0 nm N-MOSFET 在 27 和 105°C 下的 Weibull 分布

FIG. 3 Weibull Plot of N-MOSFETs with 5.0 nm Gate Oxide at 27 and 105°C

有关, 温度升高 EF 比例增大; 在 27 和 105°C 下, IF 的失效机制相同, 这与 Suhue 等报道的 TDDDB 实验结果类似<sup>[15]</sup>。在更高温度下 IF 的失效机制可能也不会改变<sup>[15]</sup>。

图 4 所示为不同温度下平均寿命的对数与电场

的关系。不同厚度氧化层平均寿命的对数与加速电场成很好的线性关系, 斜率基本相同; 高温应力起到了一定的加速器件退化的作用。平均寿命与电场的关系可由下式近似描述,

$$t_{50} = A e^{(-BE_{ox})} \quad (6)$$

式中  $A$  是与氧化层电场、氧化层厚度、温度及器件工艺相关的常数; 参数  $B$  对应图 4 所示各组数据之斜率, 其值在 3.3—4.1 MV/cm 之间, 对温度不敏感, 随氧化层厚度增加略有增大(如图 5 所示), 这与文献[15]中报道的 TDDDB 实验结果类似。

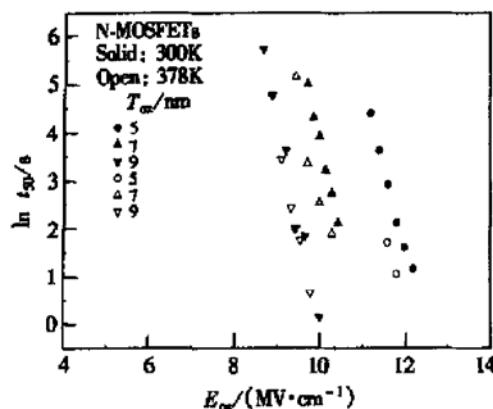


图 4  $\ln t_{50}$  与氧化层应力电场的关系

FIG. 4  $\ln t_{50}$  vs  $E_{ox}$  Plot

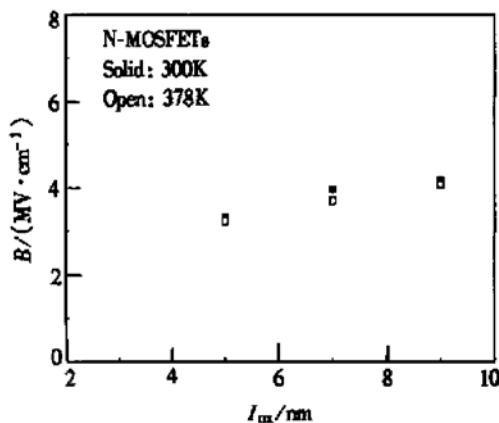


图 5  $B$  因子与氧化层厚度及温度的关系

FIG. 5 Relationship Between  $B$  and  $T_{ox}$  as a Function of Temperature

为外推器件在使用条件下的寿命, 我们假定 5.0、7.0 和 9.0 nm 氧化层的使用电场分别为 4.0、3.9 和 3.7 MV/cm, 由图 4 结合(6)式可以得到各个厚度在使用电场下的外推寿命。各个氧化层厚度在 27°C 下的外推寿命在  $10^8$  小时数量级, 在 105°C 下为

$10^7$  小时数量级, 温度起到了加速老化的作用。McPherson 等报道 9.0 nm 氧化层在 4.0 MV/cm 和 105°C 下, 失效时间  $TF(0.1\%)$  在  $10^7$  h 数量级<sup>[5]</sup>。考虑到苛刻的实验条件和低失效率, 他们预测的寿命比本文预测的要长。这主要是由于本文不是对 TD-DB 实验的预测, 栅电压漂移 10 mV 远未到达击穿前沿。

## 4 结论

通过对 N-MOSFET 在各种条件下的加速寿命实验的研究, 发现: 以栅电压漂移为失效判据, 器件失效符合 Weibull 分布。统计分析表明, 5.0、7.0 和 9.0 nm 器件在 27 和 105°C 下本征失效的形状因子相同, 这说明本征失效的失效机制在高低温度下相同; 非本征失效的比例随温度升高而增大; 平均寿命与加速电场成指数关系, 并在此基础上提出了一个寿命预测方法, 此方法可预测超薄栅 N-MOSFET 在 FN 应力下的寿命。

致谢 感谢 Motorola Digital DNA 实验室的大力支持。

## 参考文献

- [1] J. W. McPherson and D. A. Baglee, *J. Electrochem. Soc.*, 1985, **132**: 1903—1908.
- [2] I. C. Chen, S. E. Holland and C. Hu, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1985, **ED-32**: 413—422.
- [3] R. Moazzami, J. C. Lee and C. Hu, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1989, **ED-36**: 2462—2465.
- [4] A. Teramoto, H. Umeda, K. Azamawari, K. Kobayashi, K. Shiga, J. Komori, Y. Ohno and H. Miyoshi, *Study of Oxide Breakdown Under Very Low Electric Field*, IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings 1999.
- [5] J. McPherson, V. Reddy, K. Banerjee and H. Le, *Comparison of  $E$  and  $1/E$  TDDDB Models for SiO<sub>2</sub> Under Long-Term/Low-Field Test Conditions*, in *IEDM Tech. Dig.*, 1998, 171—174.
- [6] R. P. Vollertsen, *Microelectronics Reliability*, 1993, **33**: 1665—1677.
- [7] Y. Wu, Q. Xiang, D. Bang, G. Lucovsky and M. R. Lin, *IEEE Electron Device Lett.*, 1999, **20**: 262—264.
- [8] B. E. Weir, P. J. Silverman, D. Monroe, K. S. Krisch, M. A. Alam, G. B. Alers, T. W. Sorsch, G. L. Timp, F. Baumann, C. T. Liu, Y. Ma and D. Hwang, *Ultra-Thin Gate Di-*

- electronics: They Breakdown, But Do They Fail, in IEDM Tech. Dig., 1997, 73—76.
- [9] M. Depas, T. Nigam and M. M. Heyns, Solid-State Electronics, 1997, **41**: 725—728.
- [10] D. J. DiMaria, D. Arnold and E. Cartier, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 2329—2331.
- [11] D. J. Dumin, S. K. Mopuri, S. Vanchinathan, R. S. Scott, R. Subramoniam and T. G. Lewis, IEEE Trans. Electron Devices, 1995, **ED-42**: 760—772.
- [12] N. K. Patel and A. Toriumi, Appl. Phys. Lett., 1994, **64**: 1809—1811.
- [13] D. J. Dumin, J. R. Maddux, R. S. Scott and R. Subramoniam, IEEE Trans. Electron Devices, 1994, **ED-41**: 1570—1580.
- [14] R. -P. Vollertsen and W. W. Abadeer, Microelectronics Reliability, 1996, **36**: 1019—1031.
- [15] John S. Suehle and Prasad Chaparala, IEEE Trans. Electron Devices, 1997, **ED-44**: 801—808.

## Statistical Failure Characteristics of N-MOSFET's with Ultrathin Gate Oxides Under FN Stress and Lifetime Prediction

MU Fu-chen, XU Ming-zhen, TAN Chang-hua and DUAN Xiao-rong

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The gate voltage shift of N-MOSFET's with different oxide thicknesses aging at various stress conditions is investigated. The results show that the subthreshold gate voltage shift conforms to Weibull distribution. The shape factor due to intrinsic failure in the devices with 5.0, 7.0 and 9.0 nm gate oxides under 27 and 105°C is the same one, i. e., the mechanisms of the intrinsic failures are the same under low and high temperatures. The proportion of devices due to the extrinsic failures increases with temperature increasing. Based on the statistical results, an exponential relationship between the mean life time ( $t_{50}$ ) and the acceleration electric field is found. A method to predict the lifetime of N-MOSFET's with ultrathin gate oxides under FN stress is developed based on it.

**Key words:** reliability; ultrathin gate MOSFET; Weibull distribution

**EEACC:** 0170N; 2560R

**Article ID:** 0253-4177(2001)12-1577-04

MU Fu-chen male, was born in 1970, PhD. Degree. His areas of interests include small-scaled MOS devices and reliability, device modeling and characterization, time-dependent dielectric breakdown, hot-carrier effects, electromigration and reliability statistics.

XU Ming-zhen female, was born in 1939, professor. Her current interests include physics and characterization of small scale devices and reliability of semiconductor material and devices.

TAN Chang-hua male, was born in 1936, professor. His current interests include physics and reliability of small scale devices.

Received 17 January 2001, revised manuscript received 4 July 2001

© 2001 The Chinese Institute of Electronics