

# MOS 器件热电子退化的电子辐射实验研究<sup>\*</sup>

陈 勇<sup>\*\*</sup> 于 奇 杨漠华

(电子科技大学微电子科学与工程系 成都 610054)

**【摘要】** 在分析热电子效应与辐射效应在 MOSFET 产生界面态关系的基础上,给出了采用普通电子直线加速器作辐射源来对 MOS 器件热电子退化效应进行研究的方法和采用该方法对 1 μm 工艺 N 沟 MOSFET 进行热电子退化效应的研究结果,并对热电子退化与偏置的关系进行了讨论,得到了确定热电子退化寿命的快速而简便的方法。

**关键词** MOS 场效应晶体管; 热电子效应; 辐射; 界面态; 器件物理  
中图分类号 TN406

众所周知, MOSFET 的热电子效应已成为 VLS/ ULSI 发展的一大障碍,而热电子退化效应的寿命研究一般是通过加电应力的加速寿命实验来实现的。通过对热电子效应与辐射效应的研究表明,由于辐射所引入的界面态与热电子效应引入的界面态在本质上是一样的。业已建立了通过辐射来确定 MOSFET 热电子退化寿命的方法<sup>[1]</sup>,且已证实抗辐射加固的 MOSFET 与未加固器件相比,具有更强的抗热电子退化能力<sup>[2]</sup>。然而此方法需要专门的半导体辐射测试仪器,而且在辐射过程中需加一定的栅极偏压,这给使用一般辐射源进行研究带来了较大的不便。本文通过对采用普通电子直线加速器辐射的 1 μm N 沟 MOSFET 在未加偏压下的实验,得到了产生的界面态与辐射剂量的关系,从而得到确定热电子退化寿命的快速而简便的方法。

## 1 基本原理

热电子效应及辐射效应对 MOSFET 的阈值电压,线性区跨号,漏电流都要产生影响,而 MOSFET 的热电子退化效应是由于界面态的产生所至,因而两者之间由界面态密度所联系。

在辐射过程, MOSFET 将产生栅氧化层陷阱电荷及界面态,虽然两者都将增加器件的载流子散射,降低表面迁移率,但界面态的影响是主要的,特别是 N 沟 MOSFET,栅氧化层陷阱电荷的影响可以忽略<sup>[3]</sup>。又根据界面态产生机理,则线区跨导的减小  $\Delta g_m$  与界面态密度的增加  $\Delta N_{it}$  及有效辐射剂量  $D_{eff}$  存在着以下关系

$$\frac{\Delta g_m}{g_m} = K \Delta N_{it} \propto s D_{eff}^m \quad (1)$$

式中  $m$  表示界面态产生速率,与栅压关系密切,在栅氧化层电场为 +2MV·cm<sup>-1</sup> 时  $m = 0.8$ <sup>[1]</sup>;  $s$  表明栅氧化工艺对界面态产生的敏感度,系数由亚阈值  $I-V$  特性得到  $K = 10^{-12}$  cm<sup>-2[2]</sup>。

由文献 [4] 得知辐射所产生界面态密度与辐射过程中所加栅压关系密切,故对于未加偏压下的

1997年1月24日收稿

\* 国家自然科学基金资助项目,基金号:68576004

\*\* 男 31岁 硕士 讲师

辐射,  $m$  需由实验确定。

对热电子效应, 同样有线性区电流退化与界面态密度的关系<sup>[5]</sup>

$$\Delta I_d / I_d \propto \Delta N_{it} \quad (2)$$

而热电子所产生的界面态主要集中于漏极附近, 故

$$\Delta I_d / I_d = K' \Delta N_{it} \frac{\delta}{L_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式中  $\delta$  是漏极高场区中产生界面态的长度;  $L_{\text{eff}}$  是有效沟道长度。由电荷泵实验得知对  $L_{\text{eff}}$  为  $1 \mu\text{m}$  的器件  $\delta$  近似为  $60 \text{ nm}$ , 比例系数  $K'$  为  $10^{-12} \text{ cm}^{-2}$ 。

根据电荷泵实验的分析, MOSFET 的失效是产生了密度为  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  的界面态。由式(1)可得辐射产生  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  的界面态对应于  $\Delta g_m / g_m = 0.5$ , 而由式(3)得热电子产生此密度的界面对应于  $\Delta I_d / I_d = 0.03$ 。因此以漏电流下降 3% 作为热电子退化寿命就可以把辐射导致的  $\Delta g_m / g_m = 0.5$  作为相同的标准。

热电子效应引起的界面态与线性区漏电流下降之间的关系是<sup>[4]</sup>

$$\Delta I_d / I_d \propto \Delta N_{it} = s [ (I_{\text{sub}} / W)^b t ]^n \quad (4)$$

其中  $t$  是所加电应力时间;  $s$  与式(1)一样表明栅氧化工艺对界面态产生的敏感度;  $W$  是沟道宽度;  $I_{\text{sub}}^b$  正比于具有足够能量以产生界面态的热电子密度,  $b$  为产生界面态所需能量与碰撞电离能的比值;  $I_{\text{sub}}^b$  表征能产生界面态的热电子流密度的时间积累;  $n$  为  $\Delta I_d / I_d$  与  $t$  的对数斜率。

由式(1)和式(4)可知, 要产生  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  的界面态, 即对应于辐射导致  $\Delta g_m / g_m = 0.5$  和热电子效应引起  $\Delta I_d / I_d = 0.03$ , 所需的辐射剂量  $D_{\text{eff}}$  和电应力时间  $\tau_{\text{HE}}$  分别为

$$D_{\text{eff}} \propto S^{-1/m}, \tau_{\text{HE}} \propto S^{-1/n} \left( \frac{I_{\text{sub}}}{W} \right)^{-3} \cdot m \quad (5)$$

采用文献[5]中对 MOSFET 的电应力实验结果, 则  $b=3$ 、 $n=0.55$ , 由此推出热电子退化寿命的表达式为

$$\tau_{\text{HE}} = C (I_{\text{sub}} / W)^{-3} D_{\text{eff}}^{m/0.55} \quad (6)$$

式中  $I_{\text{sub}}$  是衬底电流;  $W$  是沟道宽度;  $D_{\text{eff}}$  是使器件跨导下降 50% 的辐射剂量; 比例常数  $C=10^{-5}$ 。由此可见, MOSFET 的热电子退化寿命对单位沟道宽度上的衬底电流非常敏感, 降低单位沟道宽度上的衬底电流可减小热电子退化, 大大提高 MOSFET 的退化寿命。

## 2 实验及结果

实验样品是由华晶中央研究所提供的硅片测试样管, 采用常规 CMOS 工艺制作, 有效沟道长度  $L_{\text{eff}}$  为  $1 \mu\text{m}$ , 沟道宽度  $W$  为  $10 \mu\text{m}$ , 衬底掺杂浓度  $N_{\text{sub}}$  为  $2.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 栅氧化层厚  $D_{\text{ox}}$  为  $25 \text{ nm}$ 。电子辐射剂量分别为  $0.1, 0.5, 1.0, 1.5$  及  $2.0 \text{ Mrad}(\text{SiO}_2)$ 。

采用 HP4145B 测量了不同偏置下表征热电子效应的衬底电流及各辐射剂量的器件线性区和饱和区转移特性以及输出特性曲线, 并进而得到了表征辐射产生界面态的线性区最大跨导的下降  $\Delta g_m / g_m$ 。

图 1 为根据线性区转移特性得到的  $\Delta g_m / g_m$  与辐射剂量的关系。从图中求得  $\Delta g_m / g_m$  为  $0.5$  的辐射剂量为  $1.7 \times 10^6 \text{ rad}(\text{SiO}_2)$ 。而且由图可见  $\Delta g_m / g_m$  与辐射剂量两者成线性关系, 即式(1)中  $m$  近似为 1, 则可得在辐射过程中未加偏压的条件下, 热电子退化寿命与单位沟道宽度上的衬底电流和辐射剂量的关系为

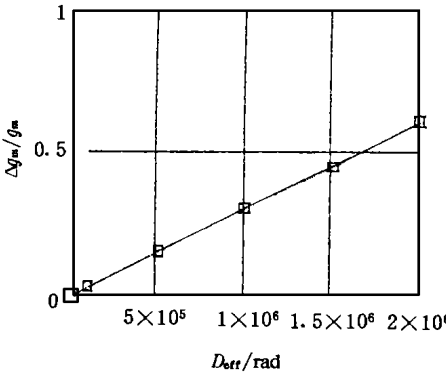


图 1 Δg<sub>m</sub>/g<sub>m</sub> 与辐射剂量的关系

$$\tau_{HE} = 10^{-5} (I_{sub}/W)^{-3} D_{eff}^{1.8} \quad (7)$$

图 2 为不同偏置下的衬底电流, 可见衬底电流在栅压  $V_g$  为 1.8 V 时达到峰值, 当漏电压为 4.0 V 时, 衬底电流较小, 热电子效应不明显, 但当漏电压等于 4.5 V 时, 衬底电流增大很快, 热电子效应显著。图 3 为根据式 (6) 得到的热电子退化寿命(年)与偏置的关系, 由图可见热电子退化寿命在  $V_g$  为 1.8 V 附近为极小, 即  $V_g=1.8$  V 是器件热电子退化的最坏工作状态。在相同的栅压下, 寿命  $\tau_{HE}$  随漏电压  $V_d$  增大而急剧下降, 当  $V_g=1.8$  V,  $V_d=4.5$  V 时器件热电子退化寿命约为 5.8 年。可以推测当  $V_d$  大于 4.5 V 时, 器件的工作寿命将更短, 热电子退化成为影响器件可靠性的首要

因素。要提高退化寿命, 应尽量避免器件工作于  $V_g=1.8$  V 的状态, 以及尽量降低漏电压  $V_d$ 。

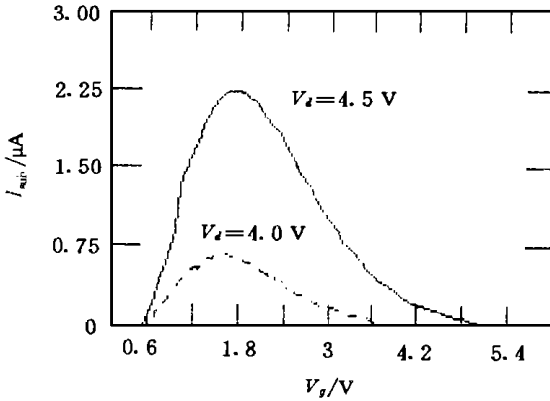


图 2 不同偏置下的衬底电流

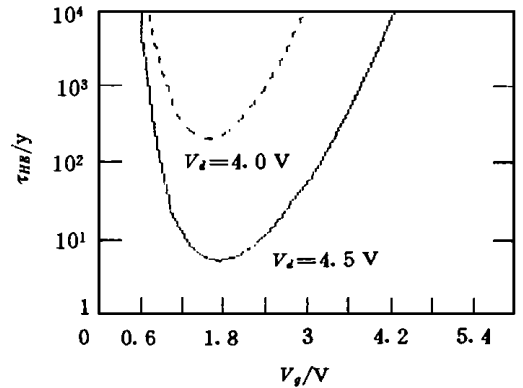


图 3 热电子退化寿命与偏置的关系

### 3 结论

通过对热电子效应和辐射效应对 MOSFET 参数影响分析的基础上, 给出了采用电子辐射对 MOS 器件热电子退化效应进行研究的方法, 报道了在采用普通电子直线加速器及未加栅压进行辐射时, N 沟 MOSFET 热电子退化寿命可表述为  $\tau_{HE} = 10^{-5} (I_{sub}/W)^{-3} D_{eff}^{1.8}$ , 器件的失效判据是  $\Delta I_d/I_d=0.03$ , 得到了确定热电子退化寿命的快速而简便的方法。

感谢华晶中央研究所、四川联合大学原子核研究所、电子工业部二十四所给予的大力支持和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Palkuti L J, Orman R D, Hu C et al. Correlation between channel hot-electron degradation and radiation-induced interface trapping in MOS devices. IEEE Trans Nuclear Science, 1989, 36(6): 2 140~2 146
- 2 McBrayer J D, Fleetwood D M, Pastorek et al. Correlation of hot-carrier and radiation effects in MOS transistors. IEEE Trans Nuclear Science, 1985, 32(6): 3 935~3 939
- 3 任迪远, 余学锋, 陆 妩等. MOSFET 电离辐射感生跨导退化的简单模型. 半导体学报, 1995, 16(7):

533 ~ 540

- 4 Chen Wenliang, Balasinski Artur, Ma T P et al. Lateral distribution of radiation-induced damage in MOS-FET s. IEEE Trans Nuclear Science. 1991, 38(6):1 1 24 ~ 1 129
- 5 Hu C, Tam S, Hsu F C et al. Hot-electron induced MOSFET degradation-model, monitor and improvement. IEEE Trans ED, 1985, 32(2):375 ~ 378

## Experimental Study of Hot-electron Degradation of MOS Device by Electron Radiation

Chen Yong    Yu Qi    Yang Muhua

(Dept. of Microelectronic Science & Technology, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** Based on the analysis of the hot-electron effect and radiation effect on the interface state production of MOSFET, a method of using general linear electron accelerator to study the hot-electron degradation of MOSFET is given. The results of using this method upon the hot-electron degradation of 1 μm nMOSFET are reproted and the relation between the hot-electron degradation and the applied voltates is discussed. A method to determine the MOSFET lifetime of hot-electron degradation quickly and easily is obtained.

**Key words** MOS field effect transistor; hot-electron effect; radiation; interface state; physics of devices

编辑 徐安玉

°科研成果介绍°

### 5 cm YAG 投影管

主研人员: 成建波 林祖伦 杨开愚 周 敏 黄国高 冉启钧 陈泽祥 李军建 饶海波 祁康成

1) 2.5 cm 外延屏 YAG 投影管, 工作电压为 25 kV、束流为 1 000 μA 时, 其中心分辨率大于 2 000 线; 在 2 000 μA 束电流时; 绿色管聚焦光栅亮度大于 13 600 Cd/m<sup>2</sup>, 散焦光栅亮度大于 26 000 Cd/m<sup>2</sup>, 红色管与蓝色管的亮度达到与绿色管匹配白色平衡要求。

2) 非外延屏 YAG 投影管, 在工作电压为 25kV、束流为 300 μA 时; 其中心分辨率大于 1 300 线; 在束电流为 500 μA 时; 绿色管聚焦光栅亮度为 47 000 Cd/m<sup>2</sup>, 散焦光栅亮度大于 95 000 Cd/m<sup>2</sup>, 红色管与蓝色管的亮度达到与绿色管匹配白色平衡要求。

3) YAG 投影管的研制: (1) 涉及电真空器件工艺与技术、晶体生长、光学与电子技术等方面的学科, 突破了超硬 YAG 基片无损层冷加工技术; (2) 设计、加工、研制出工作稳定、可靠的液相外延炉; (3) 突破了外延熔料配比技术、外延工艺技术、外延补料技术, 研制出发光效率与表面状况等技术性能居国际先进水平的外延 YAG 屏; (4) 突破了非外延屏 YAG 投影管的制造技术, 研制出高亮度、高分辨率 YAG 投影管。

4) 成功地用 YAG 投影管组装的新型投影电视机原理样机, 在 184 cm 投影屏幕上演示明亮的、清晰的、色彩鲜艳的高对比度图像, 证明了以 YAG 投影管为核心器件实现新型大屏幕电视投影这条技术途径是切实可行的。

该成果是我国电视技术发展史上一件具有划时代意义的大事, 用 YAG 投影管组装的投影电视机具有省能耗、体积小、成本低等优点, 有广阔的应用前景。

°科 卞°