

# 功率 MOSFET 的负偏置温度不稳定性效应中的平衡现象\*

张月<sup>1)3)†</sup> 卓青青<sup>1)3)</sup> 刘红侠<sup>1)3)</sup> 马晓华<sup>2)3)</sup> 郝跃<sup>1)3)</sup>

1) (西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

3) (宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2013年3月25日收到; 2013年4月11日收到修改稿)

通过对功率金属氧化物半导体场效应晶体管在静态应力下的负偏置温度不稳定性实验研究, 发现器件参数的退化随时间的关系遵循反应扩散模型所描述的幂函数关系, 并且在不同栅压应力下, 实验结果中均可观察到平台阶段的出现. 基于反应扩散理论的模型进行了仿真研究, 通过仿真结果分析和验证了此平台阶段对应于反应平衡阶段, 并且解释了栅压应力导致平台阶段持续时间不同的原因.

**关键词:** 功率金属氧化物半导体场效应晶体管, 负偏置温度不稳定性, 反应扩散模型

**PACS:** 73.40.Qv, 85.30.De, 72.20.Jv

**DOI:** 10.7498/aps.62.167305

## 1 引言

随着集成电路的发展进入到深亚微米的技术节点, 金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 器件尺寸持续地按比例缩小, 使得负偏置温度不稳定性 (negative bias temperature instability, NBTI) 效应逐渐成为现代互补金属氧化物半导体技术所面临的最重要的可靠性问题之一<sup>[1-3]</sup>. NBTI 效应主要是指对 pMOSFET 施加负栅压和高温应力时, 由于在器件的衬底/栅氧化层的界面和栅氧化层中产生了界面陷阱和正陷阱电荷, 而导致器件参数发生退化, 从而影响到器件性能的现象. 多年来对于 NBTI 效应的研究主要是针对在各种不同金属氧化物半导体结构和应力条件下的机理分析、实验研究以及退化模型建立等方面. 由于 NBTI 效应将随着 MOSFET 器件栅氧化层厚度的缩小而加剧, 大量的研究工作更多都是关注纳米尺度 MOSFET 的 NBTI 效应<sup>[4-9]</sup>. 然而随着功率 MOSFET 的广泛应

用, 虽然功率 MOSFET 一般具有较厚的栅氧化层, 但是由于其较高的工作电流和电压, 满足 NBTI 效应的发生条件<sup>[10,11]</sup>, 因而功率 MOSFET 的 NBTI 效应具有重大的研究意义, 其 NBTI 退化的现象和理论分析需要给予更多的重视和关注.

反应扩散 (reaction-diffusion, R-D) 模型作为 NBTI 效应内在产生机制的经典理论, 自提出后便得到了广泛接受并不断地被加以完善和发展<sup>[1,12-14]</sup>. 虽然已有一些针对功率 MOSFET 的 NBTI 效应的实验研究, 结果表明其退化行为符合 R-D 模型对退化过程的描述, 但是由于功率 MOSFET 在结构和工艺上的不同, 导致其 NBTI 退化行为与纳米尺度 MOSFET 的实验相比, 二者虽然具有类似的退化趋势, 但仍旧存在较大差异<sup>[10,11,15]</sup>, 这便需要我们对功率 MOSFET 的 NBTI 研究的实验现象进行更详尽的分析, 提出更合理的解释, 也进一步要求我们对其相关理论做出更多的研究和完善. 本文主要对 P 型功率 MOSFET 在静态 NBTI

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CBA00606)、国家自然科学基金 (批准号: 61106106) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: K50511250008) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangy@mail.xidian.edu.cn

应力下的退化进行实验研究,得到了有别于纳米尺度 MOSFET 的 NBTI 实验现象,即在退化随时间的幂函数关系曲线中可观察到反应平衡阶段的出现,并根据 R-D 模型对退化过程进行了仿真研究,并应用仿真结果对实验观察到的反应平衡阶段进行了理论分析和解释.

## 2 仿真模型和实验设置

### 2.1 NBTI 实验设置

本文实验中采用的功率器件为 IRF74 系列的 P 型功率 MOSFET,实验初测得到其阈值电压 ( $V_{th}$ ) 在  $-0.35\text{—}0.4\text{ V}$  之间,器件工作的最大栅压额定值为  $-8\text{ V}$ .因而在加速应力实验中,对器件施加栅压 ( $V_g$ ) 应力  $V_g = -12\text{ V}$  和  $V_g = -14\text{ V}$ ,同时保持  $V_d = V_s = 0$ ,在  $150\text{ }^\circ\text{C}$  下进行 NBTI 实验.在实验中对器件参数的测量则是应用传统的中断应力方法,即在 NBTI 应力施加过程中在特定的测量点停止  $V_g$  应力并保持温度应力不变,进行  $I\text{-}V$  测试以得到器件的  $V_{th}$  在 NBTI 应力后的漂移.

### 2.2 R-D 理论和仿真模型

根据 R-D 理论,当对 pMOSFET 施加 NBTI 应力时,在界面处将发生应力触发的由空穴、界面和氧化层内与氢相连的缺陷(指 Si—H 键)参与的可逆电化学反应过程,以及随之发生的反应生成的氢物质的扩散过程,这个反应和扩散的过程将导致界面陷阱的产生,从而造成器件的 NBTI 退化<sup>[16,17]</sup>.图 1 是对反应及扩散过程在双对数坐标下随时间的关系的描述.在 NBTI 应力初期,界面陷阱的产生受到电化学反应的控制,遵循  $t^1$  的关系,即反应控制阶段;随着可逆反应导致的界面陷阱的钝化和生成达到平衡,反应进入到动态的平衡阶段,此时界面陷阱的生成遵循  $t^0$  关系;之后当反应产物氢物质积累到一定程度后,由于其扩散作用,导致电化学反应继续向着正向进行,此时界面陷阱生成的反应速率由扩散所决定,即扩散控制阶段.需要特别说明的是,在一般实验过程中,由于 (i) 和 (ii) 阶段相对后面的阶段发生很快,因而在一般纳米尺度 MOSFET 的 NBTI 实验中并不是经常观测到.

基于 R-D 过程,关于界面陷阱的产生可由以下公式所描述:

$$\frac{dN_{it}}{dt} = k_f(N_0 - N_{it})P - k_rN_HN_{it}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_{it}}{dt} = -D_H \frac{dN_H}{dx}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_H}{dt} = D_H \frac{d^2N_H}{dx^2}, \quad (3)$$

以上公式中,  $N_{it}$  为界面陷阱密度,  $N_0$  为 Si—H 键浓度,  $P$  为空穴浓度,  $N_H$  是氢物质 (H 原子) 的浓度,  $k_f$  表示正向反应速率,  $k_r$  表示反向反应速率,  $D_H$  是氢物质的扩散系数.

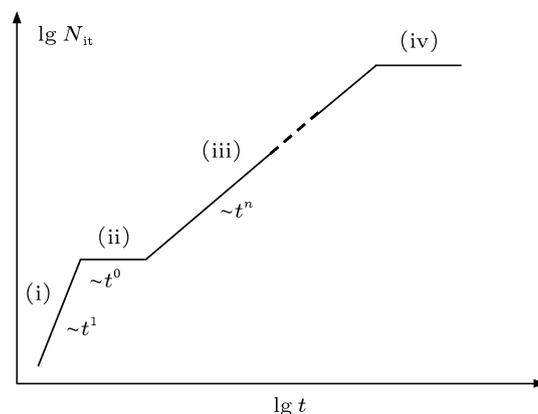


图 1 经典 R-D 模型的时间演变 (i) 反应控制; (ii) 动态平衡; (iii) 扩散控制; (iv) 饱和阶段

根据 R-D 理论及 (1)—(3) 式,可以得到 NBTI 导致的  $V_{th}$  的退化模型:

$$\Delta V_{th} = A_0 \cdot A \sqrt{C_{ox}(V_g - V_{th})} \times \exp\left(\frac{V_g - V_{th}}{B \cdot t_{ox}}\right) \cdot D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \cdot t^n, \quad (4)$$

式中  $A_0$  为常量,  $C_{ox}$  为栅氧化层电容,  $t_{ox}$  为栅氧化层厚度,  $A$  和  $B$  代表对电场相关项的拟合系数,  $D_0$  代表扩散系数,  $E_a$  为激活能,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $n$  为幂函数关系的指数.

因此在对 NBTI 效应的仿真中,将采用基于 R-D 理论的退化模型,即 (4) 式所示的模型公式,公式中各参数则根据实测数据代入进行最小二乘拟合得出,并且在针对实验现象的分析中将对一些系数进行调整以进行比较和说明.

## 3 结果和分析

### 3.1 NBTI 实验现象

如图 2 给出了在 NBTI 应力  $V_g = -14\text{ V}$  下器件的  $V_{th}$  随时间的变化,可以看到在双对数坐标下  $V_{th}$

的漂移遵循 R-D 模型所描述的幂函数的关系, 应力初期斜率较大的第一阶段和应力后期的斜率较大的第三阶段, 可以分别认为是 R-D 模型所描述的反应控制和扩散控制阶段, 这也与文献[10,11, 15] 的实验中得到的退化斜率  $n$  变化时的应力时间数量级相符合, 但是有别于这些研究以及一般情况下在纳米尺度器件上的实验现象, 本文实验得到的退化曲线呈现比较明显的三个阶段, 即在应力初期和后期的两个较大斜率阶段之间还存在着一个类似平台的阶段. 对这个平台阶段对应的线段进行幂函数拟合, 可以得到幂指数  $n$  值大约为 0.02516, 因此可以近似认为退化在这个平台阶段内的随时间几乎不增加, 即符合  $\Delta-t^0$  的关系.

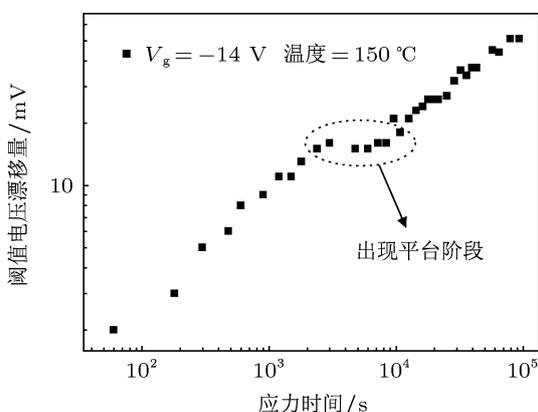


图2 NBTI 应力后  $V_{th}$  随时间的变化

为了验证图 2 观察到的平台现象在其他应力条件下和样品间的普遍性, 我们对其他相同器件样品 (记为 D1—D4) 分别施加两种不同  $V_g$  应力进行实验, 得到  $V_{th}$  随时间的关系. 如图 3 所示, 在分别施加  $V_g = -12$  V 和  $V_g = -14$  V 的 NBTI 应力后, D1—D4 的  $V_{th}$  退化仍旧出现平台现象. 另外注意到从图中显示 D3 和 D4 的平台阶段持续时间更长.

由于在双对数坐标下无法按长度对时间轴进行比较, 因而将两种不同  $V_g$  应力条件下的  $V_{th}$  漂移进行归一化处理, 具体做法是将  $V_g = -12$  V 应力下退化曲线的第三段即对应曲线斜率较大的阶段 (应力时间  $t > 10^4$  s) 内的某一点的退化量作为归一化的基准点 (这里选取  $t = 2.88 \times 10^4$  s 的退化量), 将  $V_g = -14$  V 应力下的数据除以同一时间点的两种  $V_g$  应力下的退化量比值, 这样就使得两种  $V_g$  应力下的第三段的退化趋于重合, 而应力初期的第一段斜率较大阶段和平台阶段则几乎平行 (这是由于 R-D 模型所描述的扩散控制阶段在不同  $V_g$

应力下具有相同的退化斜率, 因而对此阶段数据进行归一化处理, 理论上将得到重合的结果). 如图 4 所示, 经过归一化处理后两种  $V_g$  应力下平台阶段的起点均出现在应力时间数量级为  $10^3$  s 范围内, 对应  $V_g = -14$  V 时的平台阶段的起点在 2400 s,  $V_g = -12$  V 时则是 3000 s, 而平台阶段的终点则几乎重合, 因而  $V_g = -14$  V 时平台阶段的持续时间较  $V_g = -12$  V 时更长.

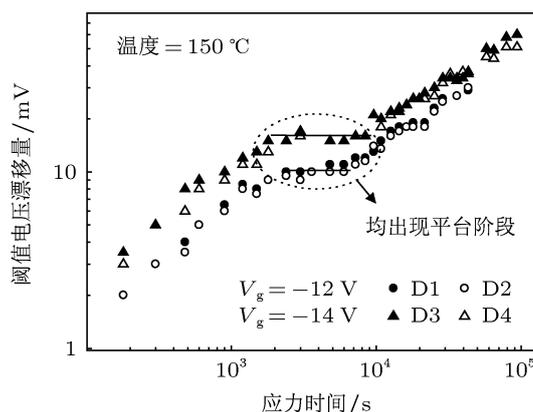


图3 不同样品在 NBTI 应力后  $V_{th}$  随时间的变化

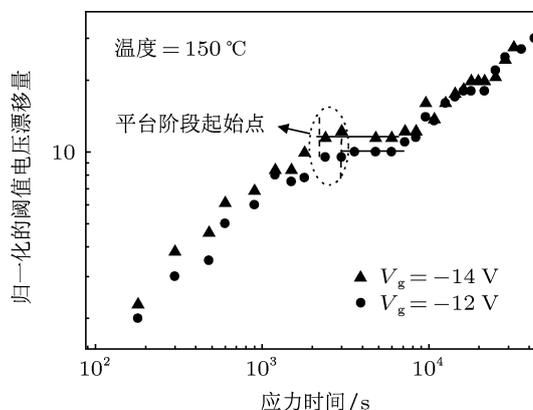


图4 不同 NBTI 应力下  $V_{th}$  随时间变化的归一化结果

针对以上图 2—4 所观察到的现象, 可以通过 R-D 理论进行解释说明. 在反应控制阶段, 界面态的产生主要由 Si—H 键断裂的电化学反应的速率所控制, 而正逆向反应速率  $k_f$  和  $k_r$  都受到反应物和生成物浓度大小和施加应力 (电场和温度) 的影响. 随着反应进行, 当生成物浓度升高, 生成的界面态同时导致电场情况发生改变,  $k_f$  和  $k_r$  则发生变化, 正向反应受到抑制而逆向反应增强, 净反应速率 (即  $k_f$  与  $k_r$  之差) 逐渐减小, 当  $k_f$  和  $k_r$  相当时反应也逐渐进入到动态平衡的状态, 此时对应的净反

应速率达到最小值(理论上认为当 $k_f = k_r$ 时反应完全进入动态平衡状态,此时净反应速率为0,表现为界面陷阱产生的斜率为0),因而净反应速率减小到0的演变过程将表现在退化随时间的关系上,即在双对数坐标下退化将呈现出平台阶段;同时,由于正向反应生成了游离态的氢物质(H或 $H_2$ ),当氢物质的浓度达到一定程度后,浓度梯度的存在使得氢物质将朝着远离界面的栅极方向做扩散运动,导致界面处可供逆向反应发生的物质减少,因而限制了逆反应的发生.随着氢物质的扩散,此前界面处的电化学反应的平衡状态被打破,正向反应逐渐大于逆向反应,此时净反应速率就由氢物质的扩散所决定,界面陷阱的产生进入到扩散控制阶段.

在以上对反应控制和扩散控制的描述中,由于在动态平衡出现之前已经有了一些数量的氢物质的扩散,因而实际情况下,正逆向反应不会完全达到 $k_f = k_r$ 的状态,即净反应速率不会等于0,而是出现一个极小值,可以看成此时达到准动态平衡状态,因而由于净反应速率的减小而使得界面陷阱的产生出现斜率接近0的平台阶段.此后在反应向扩散控制阶段的过渡过程中,净反应速率开始增大,此时平台阶段结束.根据R-D理论,这个平台阶段的产生与正逆反应和反应生成氢物质的扩散过程均有关,因而也就受到所施加的电场和温度应力、初始的界面陷阱密度等的影响.

针对图2—4中出现的三段式的退化趋势,分别对两段较大斜率阶段进行拟合,得到第一段的斜率大约为0.58—0.67,第三段大约为0.29—0.32,而平台阶段则在0.02附近.对于实际器件在NBTI应力下的退化,由于实测不可避免的误差以及产生氧化层陷阱电荷发生空穴俘获的影响,使得退化的第一阶段斜率不等于理论值1,而是小于1大于0.5的值,并且由于中断应力测量带来的因退化发生恢复而使得斜率增大的效应,第三段的斜率也比理论值0.25大.尽管如此,针对NBTI所导致的界面陷阱的产生,以上R-D过程的分析同样适用于功率MOSFET,因而实验得到的退化过程仍可以认为符合图1示意的R-D退化趋势,第一阶段和第三阶段分别对应R-D过程的反应控制和扩散控制阶段,在二者之间出现的平台阶段则可以被认为是准动态平衡阶段.

### 3.2 NBTI 仿真分析

为了进一步验证3.1中对平台阶段即是准平

衡阶段的观点,根据模型(4)式,通过公式系数的调整,对NBTI应力下界面陷阱产生的过程进行了仿真分析.对于仿真公式(4)中的温度相关项 $D_0$ 和 $E_a$ ,根据文献可以得到 $D_0$ 在 $1 \times 10^{-8}$ 至 $5 \times 10^{-8}$ 的范围内, $E_a$ 大约为0.45—0.6之间,而电场相关项的系数 $A, B$ ,由实验数据以及对文献数据的拟合可以确定 $A$ 在 $10^{-6}$ 至 $10^{-5}$ 数量级之间, $B$ 为0.37—0.6之间<sup>[7-11,15]</sup>.因而在仿真过程中取 $D_0 = 5 \times 10^{-8}$ , $E_a = 0.55$ , $A, B$ 采用四种不同取值组合,分别为 $(A_1, B_1) = (10^{-5}, 0.75)$ , $(A_1, B_2) = (10^{-5}, 0.5)$ , $(A_2, B_1) = (10^{-6}, 0.75)$ 和 $(A_2, B_2) = (10^{-6}, 0.5)$ ,同时保持公式中的其他系数不变,对NBTI导致的界面陷阱的产生进行仿真.

图5所示为界面陷阱的增量随时间变化的结果,可以看到对应电场项系数取值 $(A_2, B_2)$ 时,退化与一般在纳米尺度MOSFET实验中观察到的NBTI退化趋势相符,呈现明显的两段较大斜率的阶段,分别对应于R-D过程的反应控制和扩散控制阶段.然而随着系数发生改变,尤其是对应电场项系数取值 $(A_1, B_1)$ 时,可以看到在两段较大斜率的阶段之间有明显的平台出现,即在反应控制和扩散控制阶段之间存在着斜率几乎为0的阶段.此外对应电场项系数取值 $(A_1, B_2)$ 和 $(A_2, B_1)$ 时,可以观察到不太明显的平台现象,由此可以得到平台阶段与电场项系数相关的结论,这也就解释在一些实验中无法观测到平台现象的原因是由于器件不同的工艺和参数而导致它们具有不同的电场项系数.

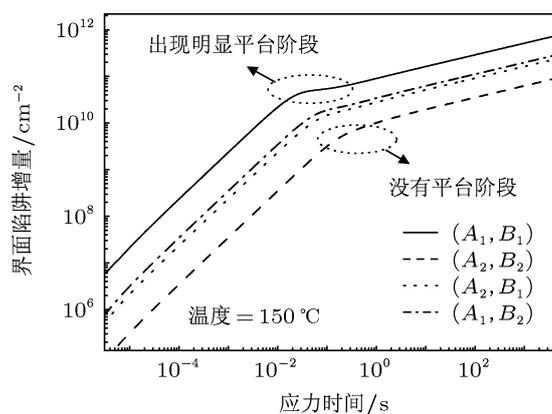


图5 改变电场项系数 $(A, B)$ 条件下界面陷阱的产生随时间的变化

采用与图5相同的电场项系数 $(A, B)$ 的四种取值组合,对退化的幂函数指数即退化斜率 $n$ 随时间的变化进行仿真,得到如图6所示的结果.可以看到当电场项系数取值 $(A_1, B_1)$ 时,随着应力时间的

增大,  $n$  值从 1 快速减小到接近 0 的某值, 对照图 5 发现此过程的时间与平台阶段相对应. 而后  $n$  又增加到 0.25, 即曲线出现一个类似低谷状的阶段. 根据 3.1 中对 R-D 过程的详细描述,  $n$  值快速减小的阶段对应于反应动态平衡阶段(准平衡阶段), 处于反应控制和扩散控制之间的过渡阶段; 而对于电场项系数 ( $A_2, B_2$ ),  $n$  值从 1 平滑单调地减小到 0.25, 说明没有动态平衡阶段出现; 另两种电场项系数取值 ( $A_1, B_2$ ) 和 ( $A_2, B_1$ ) 下, 同样也可以看到  $n$  值非单调变化, 但是此阶段时间较短, 并且  $n$  值的变化量较小, 与图 5 所示的情况相一致.

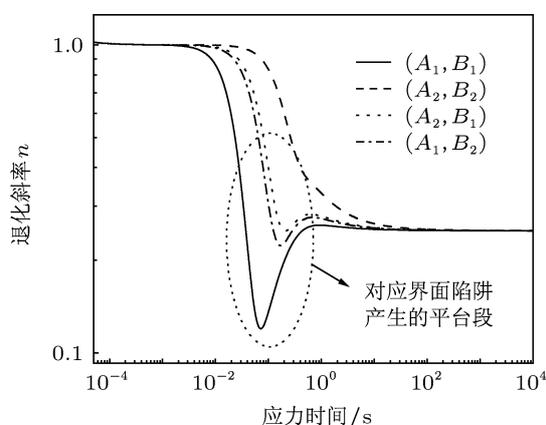


图 6 改变电场项系数情况下界面陷阱随时间产生的幂函数指数  $n$  的变化

### 3.3 平台现象的讨论

对于功率 MOSFET 器件的 NBTI 实验结果显示, 虽然器件参数的退化随时间的关系表现出和纳米尺度器件上类似的趋势(即退化随时间呈现明显的斜率不同的阶段), 但是与纳米尺度 MOSFET 器件相比, 其退化的时间轴存在着巨大差异, 在功率器件上得到的结果显示反应阶段和扩散阶段转换的时间对应数量级在  $10^3$  s 范围内. 如果将功率 MOSFET 的 NBTI 效应的应力时间的数量级进行等比例缩小, 即保持纵轴的退化量不变, 对横轴的时间轴进行调整, 则功率器件的退化可以变换为纳米尺度器件上的时间数量级.

结合 3.1 的实验现象和 3.2 的仿真结果, 将图 2 所示的施加  $V_g = -14$  V 的  $V_{th}$  漂移进行横轴的等比例缩小, 将应力时间调整到  $10^{-3}$ —1 s 的范围内, 得到如图 7 所示的曲线, 并且同仿真得到的界面陷阱增量随时间的变化曲线相比较, 可以明显看到调整时间轴后的功率 MOSFET 的 NBTI 退化和仿真结果趋势一致, 二者的准平衡阶段几乎出现在同一

时间段内, 说明实测的平台阶段即对应 R-D 理论中的反应动态平衡阶段. 此外注意到实测曲线的扩散控制阶段的斜率比仿真结果大, 这是由于仿真中采用的是 R-D 模型的理论值 0.25, 而实测中由于中断测量和氧化层陷阱电荷的产生等因素, 使得斜率大于理论值, 但由于模型公式中时间项的幂指数  $n$  不影响其他各变量相关项的系数提取, 因而不会直接影响仿真中平台阶段的出现.

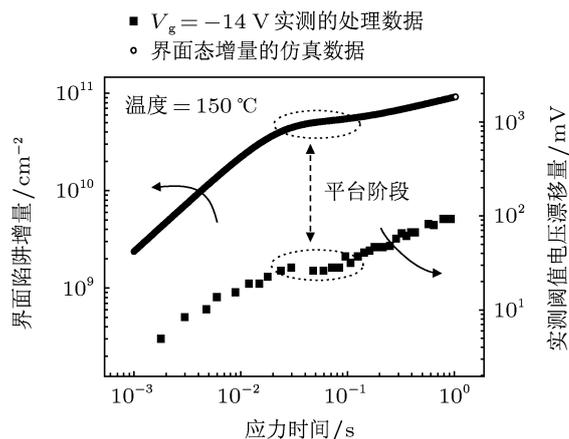


图 7 实测数据的时间轴等比例处理结果与界面陷阱产生的仿真结果对比

为解释图 3 和图 4 中不同  $V_g$  应力下平台持续时间的不同, 选取电场项系数 ( $A_1, B_1$ ), 改变  $V_g$  的大小, 对退化斜率  $n$  随时间的变化进行了仿真. 如图 8 所示, 随着  $V_g$  增大, 平台阶段所占的时间长度变大, 并且  $n$  的最小值也随之变得更小, 因而对应的平台现象更加明显, 持续时间更长. 对此现象基于 R-D 过程的解释是: 当施加较大电场即意味着界面陷阱产生的正向反应将更快地进行, 因而生成更多的界面陷阱和氢物质, 累积生成的界面陷阱减弱了局部电场, 并且反应生成物浓度的增大使得逆向反应增强, 因而使得更早发生反应向准平衡阶段趋近的情况, 这就解释了图 8 中较大  $V_g$  应力下曲线更靠左的快速下降阶段. 而后随着氢物质浓度累积到一定程度, 界面陷阱的产生从反应控制逐渐向扩散控制进行过渡, 由于此前较大  $V_g$  应力下导致更多的反应生成物, 逆向反应的增强更为明显, 因而净反应率在正逆反应的竞争中将更早地达到最小值, 并且随  $V_g$  应力不同而出现更小的最小值, 这就为图 8 中对应较大  $V_g$  应力下退化斜率  $n$  更早地出现最小值的情况提供了理论上的可能解释. 此外对照图 7, 发现平台阶段结束的时间和退化斜率  $n$  最小值的位置相关. 对图 8 中不同  $V_g$  应力下的快速下降阶段时间进行比较, 因时间轴为对数坐标显示, 因而对不

同  $V_g$  应力下曲线的下降起点和最小值点的时间的比值进行比较, 发现较大  $V_g$  应力下时间比值大, 表现为在退化随时间的关系中具有较长的平台阶段, 这也与实测中的情况相符合.

综合以上仿真分析, 可以认为 3.1 中观察到的平台现象对应 R-D 模型所描述的动态准平衡阶段, 并且仿真结果也解释了在不同  $V_g$  应力下所观察到的平台阶段持续时间不同的原因.

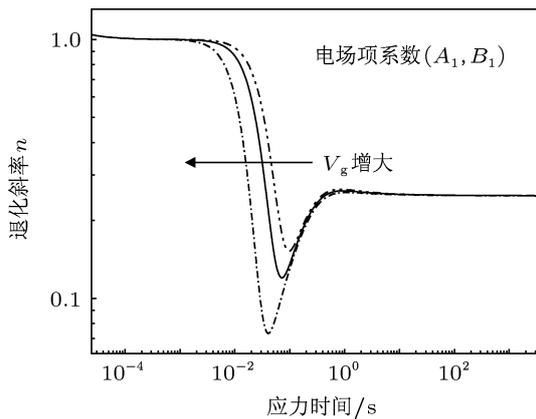


图 8 改变  $V_g$  应力下界面陷阱随时间产生的幂函数指数  $n$  的变化

## 4 结论

本文通过实验研究了功率 MOSFET 在不同  $V_g$  应力下的 NBTI 退化. 实验结果表明: 在双对数坐标下器件的  $V_{th}$  随着应力时间的变化遵循 R-D 模型所描述的幂函数关系, 并且与在纳米尺度器件下观察到的 NBTI 退化相比, 功率 MOSFET 的退化所对应的时间轴具有更大的时间数量级. 值得注意的是, 实验观察到在反应控制和扩散控制阶段之间, 存在着平台阶段, 且平台阶段的持续时间随  $V_g$  而不同. 根据 R-D 模型公式的仿真以及对实测数据的时间轴进行等比例缩小的处理结果, 得到了功率器件的 NBTI 退化与仿真趋势一致的结果, 说明实测中平台阶段对应反应动态平衡阶段(准平衡阶段), 并且仿真结果解释了实测中平台阶段持续时间与所施加  $V_g$  相关的原因. 这些结论说明了 R-D 理论模型在功率 MOSFET 的 NBTI 研究中的适用性, 因而对于研究功率器件的 NBTI 效应的机制和寿命预测方面都有着重要的指导意义.

- [1] Huard V, Denais M, Parthasarathy C 2006 *Microelectron. Reliab.* **46** 1
- [2] Schroder D K, Babcock J A 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1
- [3] Stathis J H, Zafar S 2006 *Microelectron. Reliab.* **46** 270
- [4] Cao Y R, Ma X H, Hao Y, Tian W C 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097306
- [5] Ma X H, Cao Y R, Hao Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 1173068
- [6] Li Z H, Liu H X, Hao Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 820 (in Chinese)
- [7] Huard V, Denais M, Perrier F, Revil N, Parthasarathy C, Bravaix A, Vincent E 2005 *Microelectron. Reliab.* **45** 83
- [8] Alam M A, Kufluoglu H, Varghese D, Mahapatra S 2007 *Microelectron. Reliab.* **47** 853
- [9] Grasser T, Kaczer B, Gos W, Reisinger H, Aichinger T, Hehenberger P, Wagner P, Schanovsky F, Franco J, Roussel P, Nelhiebel M 2010 *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting San Francisco, USA, December 6-8, 2010* p82
- [10] Stojadinović N, Danković D, Djorić-Veljković S, Davidović V, Manić I, Golubović S 2005 *Microelectron. Reliab.* **45** 1343
- [11] Danković D, Manić I, Djorić-Veljković S, Davidović V, Golubović S, Stojadinović N 2006 *Microelectron. Reliab.* **46** 1828
- [12] Bhardwaj S, Wang W, Vattikonda R, Cao Y, Vrudhula S 2008 *IET Circuit Dev. Syst.* **2** 361
- [13] Alam M A, Mahapatra S 2005 *Microelectron. Reliab.* **45** 71
- [14] Mahapatra S, Goel N, Desai S, Gupta S, Jose B, Mukhopadhyay S, Joshi K, Jain A, Islam A E, Alam M A 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 901
- [15] Danković D, Manić I, Djorić-Veljković S, Golubović S, Stojadinović N 2008 *Proceedings of the 26th International Conference on Microelectronics Niš, Serbia, May 11-14, 2008* p599
- [16] Ogawa S, Shiono N 1995 *Phys. Rev. B* **51** 4218
- [17] Kufluoglu H, Alam M A 2006 *IEEE Trans. Electron Dev.* **53** 1120

# Flat-roof of dynamic equilibrium phenomenon in static negative bias temperature instability effect on power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor\*

Zhang Yue<sup>1)3)†</sup> Zhuo Qing-Qing<sup>1)3)</sup> Liu Hong-Xia<sup>1)3)</sup>  
Ma Xiao-Hua<sup>2)3)</sup> Hao Yue<sup>1)3)</sup>

1) (School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

3) (Key Laboratory of Wide Bandgap Semiconductor Materials and Devices of Ministry of Education, Xi'an 710071, China)

(Received 25 March 2013; revised manuscript received 11 April 2013)

## Abstract

The effect of static negative bias temperature instability stress on p-channel power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) is investigated by experiment and simulation. The time evolution of the negative bias temperature instability degradation presents the trend which follows the reaction-diffusion (R-D) theory on the exaggerated time scale. A flat-roof section is observed under the varying stress condition, which can be considered as the dynamic equilibrium phase through the simulation verification based on the R-D model. The analysis of the simulated results also provides the explanation for the difference in the time duration of the dynamic equilibrium phase under the condition of varying stress voltage.

**Keywords:** power MOSFET, negative bias temperature instability, reaction-diffusion model

**PACS:** 73.40.Qv, 85.30.De, 72.20.Jv

**DOI:** 10.7498/aps.62.167305

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CBA00606), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61106106), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. K50511250008).

† Corresponding author. E-mail: zhangy@mail.xidian.edu.cn