第 50 卷 第 6 期 2001 年 6 月
1000-3290/2001/50(06)/1172-06

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.50,No.6,June,2001
©2001 Chin. Phys. Soc.

薄栅氧化层经时击穿的实验分析及物理模型研究

刘红侠 方建平 郝 跃

(西安电子科技大学微电子研究所,西安 710071)

(2000 年 11 月 24 日收到)

通过衬底热载流子注入技术,对薄 SiO_2 层击穿特性进行了研究.与通常的 F-N 应力实验相比较,热载流子导致的薄栅氧化层击穿显示了不同的击穿特性.通过计算注入到氧化层中的电子能量和硅衬底的电场的关系表明,热电子注入和 F-N 隧穿的不同可以用氧化层中电子的平均能量来解释.热空穴注入的实验结果表明薄栅氧化层的击穿不仅由注入的空穴数量决定.提出了全新的热载流子增强的薄栅氧化层经时击穿模型.

关键词:薄栅氧化层,经时击穿,衬底热载流子,击穿电荷,模型

PACC:7360H,0710

1 引 言

集成电路以高速化和高性能化为目标,实现着进一步的微细结构.随着微细结构在工业上的实现,降低成本和提高集成度成为可能.另一方面,随着 MOS 集成电路微细化的发展,栅氧化层向薄栅方向发展,而电源电压却不宜降低,这使栅氧化层工作在较高的电场强度下,从而使栅氧化层的抗电性能成为一个突出的问题.栅氧抗电性能不好将引起 MOS 器件电参数不稳定,进一步可引起栅氧的经时击穿 TDDB(time dependent dielectric breakdwon).栅氧击穿作为 MOS 电路的主要失效模式已成为目前国际上关注的热点.

虽然借助于 MOS 电容,对栅氧化层的 TDDB 击穿进行了深入、广泛地研究[1-5],对于 F-N(Fowler Nordheim)隧穿应力条件下的栅介质击穿给出了很好的解释.但是,在通常的栅氧击穿研究中,仅仅考虑载流子以 F-N 隧穿的方式进入 SiO_2 而在 MOS 器件的实际工作中,往往会在漏端附近的沟道区域或沟道耗尽层中形成高电场,载流子在该高场中被加速成为热载流子而注入到栅氧化层,会对器件的栅氧击穿产生严重影响.处于实际工作状态中的 MOSFET,由于其所受的应力条件不同于 F-N 隧穿时的应力条件,此时载流子向氧化层中的注入是以热载流子发射而跨越界面势垒为主的.因此在这种情况下,要准确预测 *IC* 中 MOS 器件的栅氧寿命,则必须考虑热载流子注入对氧化层击穿的影响.

本文利用衬底热载流子注入技术,分别对 NMOSFET 器件和 n 阱 PMOSET 进行了衬底热电子 SHE(substrate hot electrons)和衬底热空穴 SHH(substrate hot holes)的注入效应的研究.通过对于实验结果的分析和讨论,得出了 SHE 注入和 SHH 注入引起的介质击穿的物理本质,提出热载流子效应增强的 TDDB 模型.

2 衬底热电子增强的 TDDB 效应

2.1 实验条件

在本实验中应用的器件,采用无锡华晶公司提供 n 沟 MOSFET,器件的沟道长度为 1.2 μm,沟道宽度为 50 μm,栅氧化层的厚度为 10 nm,衬底采用取〈100〉方向的 p 型 Si 材料.图 1 表明了在进行 SHE 注入的实验时各极的电压偏置条件情况.为了能在衬底中的耗尽层内产生雪崩倍增的载流子,在器件的衬底上施加了一个大电压,从而形成了一个加在衬底耗尽层上的高场.雪崩倍增生成的电子在耗尽层中得到了加速,电子能在电场中获得足够大的能量,注入到氧化层中.

在实验中,以栅电流 I_g 为监测量,用 HP4156B 半导体参数分析仪进行编程控制来实现对 MOS 器件的测量,以下所有的数据结果都是用 HP4156B 及与之配套的探针台所测得的.

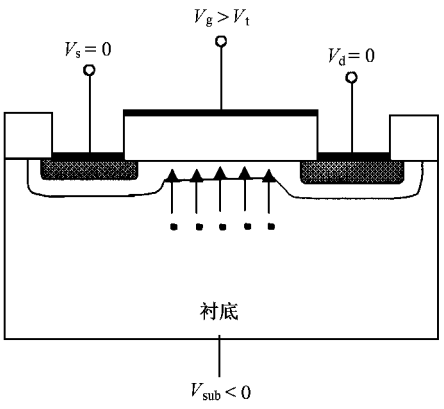

图 1　衬底热载流子效应($V_{sub} < 0$)

2.2　I_g-t 特性

图 2 表明在栅电压和衬底电压的大小一定时,栅电流与时间的关系.从图中可以发现,栅电流在开始阶段随着时间的增加开始有所减小,先减小的原因是注入到栅氧化层,电子被陷阱所俘获,成为陷阱电荷,从而穿过氧化层的形成栅氧化层电流的电子数量就会减小.t = 29558 s 后有一个突然的增加,达到 5.3×10^{-5} A 的量级,氧化层发生准击穿,称这种电流的突变为热电子引起的击穿 HEIB(hot-electron-induced-breakdown).在 HEIB 出现之前栅电流的减小是因为栅氧化层中电子陷阱的作用.t = 47842 s 后又有一个突然的增加,达到 4.7×10^{-4} A 的量级,氧化层再一次发生准击穿,t = 55832 s 后有一个突然的增加,达到 10^{-3} A 的量级,氧化层发生永久击穿.HEIB 击穿的情况与 F-N 隧穿效应有着明显的区别.1)在 SHE 注入诱发的击穿模型中,没有一次得到栅氧化层不可恢复的永久击穿,甚至所加的应力时间达到 10^6 s 时都没有发生.2)由 F-N 隧穿引起的准击穿只有在栅氧化层的厚度在 4 nm – 5 nm 的范围内才能得到,而进行实验的样品,其栅氧厚度达到了 10 nm.3) HEIB 以后,栅电流的范围达到 10^{-3} A 量级,F-N 隧穿注入引起的准击穿模型中,栅电流远达不到 10^{-3} A 便永久击穿.

2.3　击穿电荷的测量

图 3 表明了击穿电荷 Q_{BD} 与氧化层电场之间的关系.同时显示了 F-N 隧穿和 SHE 的情况.对于 F-N 隧穿注入的实验可知:随着栅氧化层的电场的减低,击穿电荷量迅速上升,从中可以推断出当氧化层中的电场在 4—5 V 时,其击穿电荷量为 10^5 C/cm^2 左右,这个推断值比在相同的氧化层偏置电压下,由 SHE 注入所测得的击穿电荷要大两个数量级,在 SHE 注入的情况下其击穿电荷为 10^2 – 10^4 C/cm^2 左右.这一实验结果表明:在 SHE 注入的情况下氧化层更容易发生击穿,即 SHE 增强了 TDDB.击穿电荷量也因此下降.图中还可以看到传统的 F-N 隧穿的击穿电荷量强烈的依赖氧化层的电压偏置情况,呈线性的关系.而 SHE 注入的情况下击穿电荷却与氧化层的电压关系不大,它的大小与衬底偏置电压有很大关系.

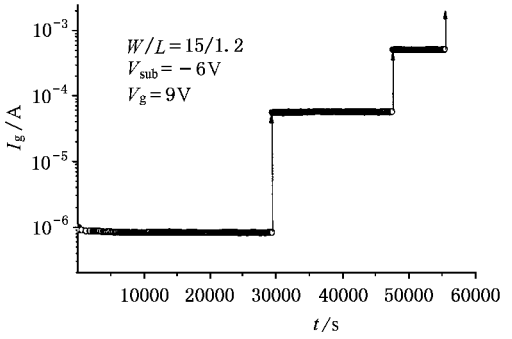

图 2　I_g-t 特性

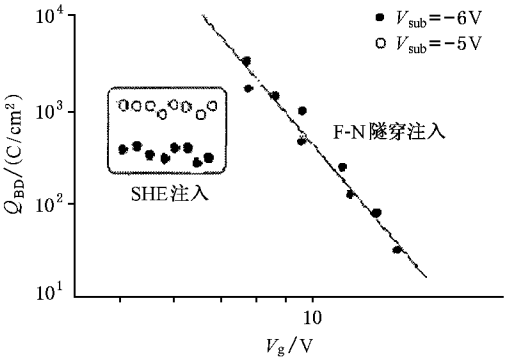

图 3　击穿电荷与氧化层偏置电压的关系

图 4 中以衬底电压的偏置为一个变量,作出了在 Si-SiO$_2$ 界面的衬底偏置电场与击穿电荷之间的关系图,而不像常规的那样以栅氧化层上的偏置电压作为击穿电荷的变量.这些实验数据中可以很容易发现其数据点的分布沿着一条与栅压无关的曲线变化.从而可以很容易得出在 SHE 注入的实验中,器件的击穿电荷量与加在衬底上的偏置条件相关,而不是取决与栅电场的大小,在此栅电场的作用很小.这里的 Si 衬底耗尽层上的偏置电压可以通过耗尽层近似得到.

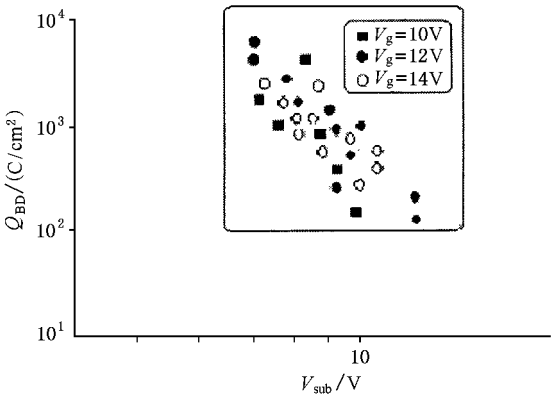

图 4 击穿电荷与衬底偏置电压的关系

在器件的退化的表征量中,阈电压的漂移量是一个非常重要的量.实验发现不管所加的衬底电压是多大,在介质击穿时所表现出的阈电压的漂移都是 0.047 V.该实验充分说明了热电子引入的准击穿是因为氧化层中的电荷陷阱密度达到了临界值,这个临界值与加在衬底上的偏置电压的大小无关.

对于 F-N 隧穿注入击穿,在 Si-SiO_2 界面的低能量电子在注入到栅氧化层中后,由于栅上的正偏压,当电子穿过氧化层时可以得到动能,这些高功能的电子可以与氧化层中的晶系发生作用,从而在氧化层中产生缺陷点,引起介质的击穿.然而,在 SHE 注入中氧化层电场在介质击穿电荷上起的作用很小,因为当电子从衬底上注入到介质氧化层中时并未得到能量而是耗散能量.这一点可以通过理论来证明:根据电子传输过程中的能量平衡方程,在氧化层中的平均能量的表达式为

$$E = q[E_{Ox}\lambda_{Ox}(1-\exp(-T_{Ox}/2\lambda_{Ox})) + E_{Si}\lambda_{Si}\exp(-T_{Ox}/2\lambda_{Ox})], \quad (1)$$

这里 λ_{Ox} 和 λ_{Si} 分别代表了热电子在氧化层和衬底中的能量松弛长度,可以通过量子定额定理实验估算出 λ_{Ox} 的大小约为 7 nm,通过平带条件下蒙特卡罗的模拟实验结果可以得出 λ_{Si} 的大小约为 40 nm,等式右边第一项代表热电子在氧化层中获得的动能,第二项代表热电子在氧化层中声频声子散射作用而损失的能量,从等式中可以容易的发现能量 E 的大小唯一的取决于 T_{Ox}/λ_{Ox} 的大小.如果 $T_{Ox} \gg 2\lambda_{Ox}$ 则有

$$E = qE_{Ox}\lambda_{Ox}. \quad (2)$$

在这种情况下,热电子在 Si 衬底电场中获得的动能,在其通过氧化层过程中全部都损耗掉了,此时 E_{Si} 的大小对于热载流子的作用很小.

如果 $T_{Ox} \ll 2\lambda_{Ox}$ 则大部分的热电子可以在不损耗其动能的情况下就能穿过氧化层而成为栅电流.此时等式就变成

$$E = qE_{Si}\lambda_{Si}. \quad (2)$$

这表明在超薄氧化层中,电子的能量主要取决于衬底电场的大小,而不是氧化层电场的大小.

为了表明(1)式中第一项与第二项的不同,通过计算两项的值可以发现,当 $E_{Ox} = 6$ MV/cm,$E_{Si} = 1.2$ MV/cm,而且栅氧化层厚度 $T_{Ox} = 4$ nm 的时候,第二项的数值比第一项的数值要大三倍,这从理论上说明了为什么击穿电荷 Q_{BD} 直接依赖于在 Si 衬底上的电压,而不是栅上的电压,这一点与由 F-N 隧穿的实验所得的结果完全不同.

图 5 是导致热电子引起的准击穿过程示意图.在 SHE 注入过程中,高能电子注入进氧化层和氧化层原子网格碰撞,打破 Si—O 键引起了缺陷,其中一些可成为电子陷阱.电子陷入陷阱,使陷阱带负电.不考虑陷阱电荷的退陷阱效应,随着应力时间的增加,电子陷入热电子引起的电子陷阱的数量随之增加.当陷入电子数达到某一阈值时,一个陷入电子形成的链扩展到氧化层的两端,所有链中的电子沿着链向阳极移动,形成一个由空穴陷阱组成的小电流导电路径,电子跳跃通过缺陷而形成小电流路径,这就相当于在栅电流通路上并联了一个小电阻,引起电流的突然增大,即引起氧化层第一次击穿.HEIB 第一次击穿后,栅电流跳转到 5.3×10^{-5} A 范围.电子继续注入氧化层产生和陷入氧化层陷阱.当陷入电子再次达到某一阈值时,再次形成陷入电子链而产生新的小电流导电路径,这相当于在栅上又并联一小电阻,使总电流突然增大,引起电流再次跳转.在 SHE 注入中,即使在 HEIB 后,在低电流和低氧化层电场作用下在电流路径中产生的焦耳热也不足以引起最终的破坏性的击穿,因此产生了图 2 的分段跳转击穿特性.

3 衬底热空穴增强的 TDDB 效应

3.1 实验条件

进行 SHH 注入的实验中,应用的器件是由 Motorola 公司提供的 n 阱 PMOS 场效应晶体管,器件的沟道长度为 1 μm,沟道宽度为 15 μm,栅氧化层厚度

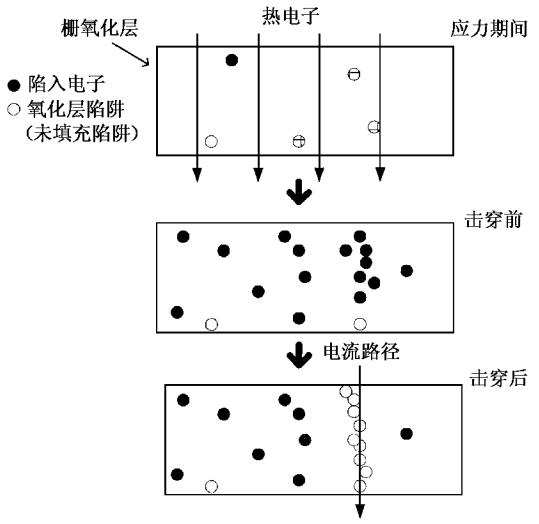

图 5　热电子陷阱中心形成一个从阳极到阴极的链时导致准击穿的示意图

为 5 nm.利用生长在 n 阱工艺上的 PMOSFET 器件进行 SHH 注入的实验,对于实验中器件的工作条件如图 6 所示,在 p 型衬底和 n 型的阱之间加上一个正向的偏置条件,有助于空穴从衬底注入到氧化层的界面.这个衬底的偏置电压使得在衬底的耗尽层中加了一个相当大的电场,让在此区域碰撞产生的空穴获得足够的能量克服氧化层界面垫垒,注入到氧化层中.衬底的偏置电压的大小决定注入到氧化层的空穴能量,而栅压的大小决定了栅氧化层电场的大小.

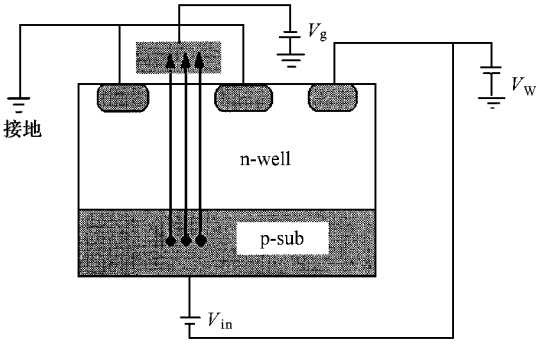

图 6　p 沟 MOSFET 偏置条件示意图

3.2　I_g-t 特性

图 7 标出了 SHH 注入的过程中时间对栅电流之间的关系图,从图中可以很容易发现,在一开始栅电流随着时间不断减小,随后就会慢慢的增加,然后突然一个猛变,标志着氧化层的击穿.电流在开始阶段的减小是由于正电荷在氧化层中积累的结果.这一结果将在阈值电压的漂移的实验中得到验证.随后漏电流慢慢增加,最后当在氧化层中积累的正电荷密度达到一个临界值时,栅上的漏电流迅速地跳变到毫安量级上,说明器件已发生击穿.

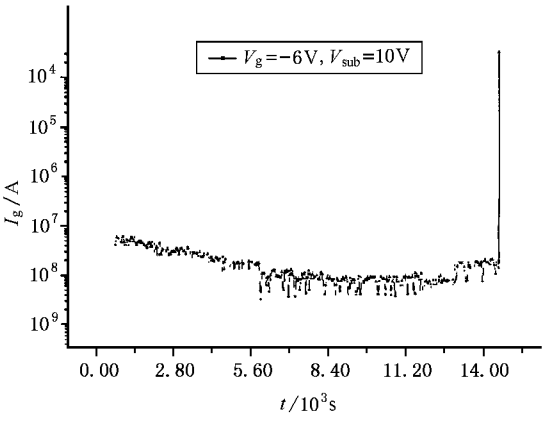

图 7　SHH 注入的 I_g-t 特性图

3.3　击穿电荷的测量

对 PMOSFET 进行了阈值电压漂移的测量,实验发现 PMOSFET 的阈值电压的漂移量为负值,这说明 SHH 注入过程中器件的氧化层陷落了带正电的电荷.

图 8 表明了不同的偏置条件下,对于 SHH 应力实验中其击穿空穴量的分布情况.在这一实验中,用 V_w 来控制注入空穴的能量,用 V_g 来控制氧化层的电场大小,其中 V_{in}的大小可以来控制注入空穴流的密度.从图中可以看出,随着 V_w 的增加,即注入空穴能量的增加,Q_p 减小,而且 V_{in}和 V_g 增加时都会导致 Q_p 的减小.从图中还可以发现 Q_p 的值达到了 2 C/cm^2—30 C/cm^2.比在通常的 F-N 隧穿应力实验

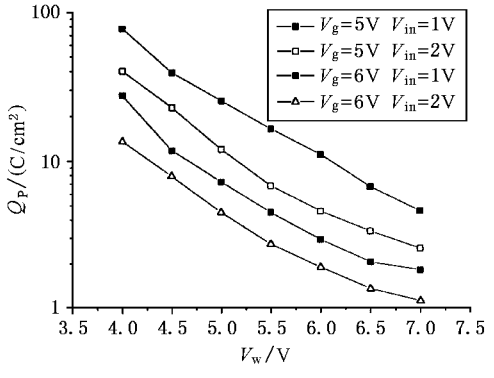

图 8　Q_p-V_w 的关系图

中得到的值 0.1 C/cm^2 大得多.从而可以推断 F-N 隧穿应力下的 TDDB 效应并不是简单的如通常参考文献中论述的那样,由栅氧化层中注入的空穴总量所决定,注入的空穴总量达到一定程度导致 TDDB 击穿.F-N 隧穿导致的 TDDB 效应还应该与热电子产生的缺陷过程有关.该实验否定了 Lee 和 Hu 提出的空穴导致的击穿模型[6].

依据上面的实验结果,在图 9 中给出了由空穴引起的介质击穿的示意图.在图 9(a)中可以看出在氧化层中的化学键断裂概率与注入的空穴流有很大关系,随着空穴流的增加断裂概率也明显加大了.如图 9(b)所示在氧化层晶格中的一个 Si 原子上的两个 Si—O 键同时断裂就会引起晶格的永久破坏,这种破坏不断积累就会使氧化层介质击穿.

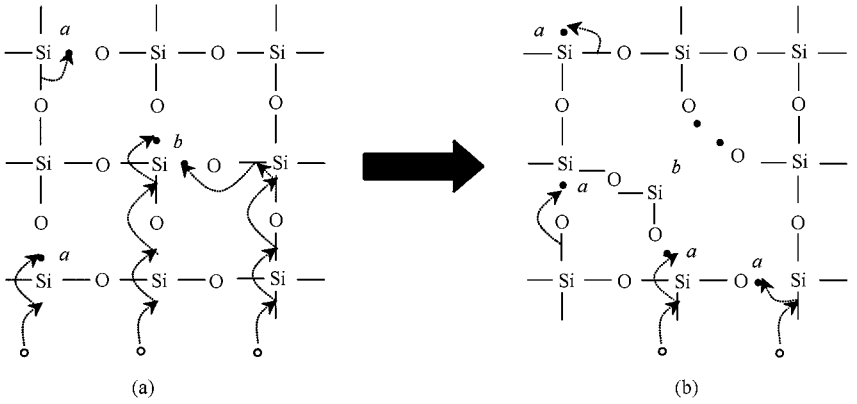

图 9 氧化层中晶格不可恢复的破坏引起介质击穿的示意图

4 结 论

研究了衬底热载流子增强的 TDDB 击穿模型,并与传统的 F-N 隧穿实验进行了有效地比较.在相同的氧化层偏置电压下,由 SHE 注入所测得的击穿电荷要比 F-N 隧穿的结果大两个数量级,衬底热电子注入的击穿电荷量与氧化层的电场的大小几乎无关,而在很大程度上取决于衬底电场的大小.由热电子引入的氧化层击穿与传统的 F-N 隧穿的理论根本不同点在于注入到氧化层中电子的平均能量.而 SHH 注入的击穿电荷比 F-N 隧穿的击穿电荷要高两倍之多.氧化层介质的击穿时间与注入到氧化层中的空穴流密度及注入时空穴的动能有关.并且由此提出了一个全新的热载流子增强的薄栅氧化层经时击穿模型.

[1] J.J. Tzou, C. C. Yao, R. Cheung, H. Chan, *IEEE Electorn Device Lett.*, **7**(1996), 446.
[2] N. Klein, *J. Appl. Phys.*, **63**(1988), 970.
[3] T. Hori. Gate dielectrics and MOS ULSIs. 1997.
[4] P. P. Apte, *IEEE Trans. ED*, **41**(9)(1994), 1595.
[5] D. J. Dumin, *IEEE Trans. ED.*, **41**(9)(1994), 1570.
[6] J. C. Lee, I. C. Chen, C. Hu, *IEEE Trans. ED.*, **35**(12)(1988), 2268.

EXPERIMENTAL ANALYSIS AND PHYSICAL MODEL INVESTIGATION OF TDDB OF THIN GATE OXIDE

LIU HONG-XIA FANG JIAN-PING HAO YUE
(*Institute of Microelectronics*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)
(Received 24 November 2000)

ABSTRACT

Breakdown character of thin SiO_2 is investigated by using substrate hot-carrier injection techniques. Hot-carrier induced thin gate oxide damaged shows different breakdown character compared with the case of conventional F-N tunneling experiments. Good correlation between the calculated electron energy in the oxide and the electric field in the silicon substrate suggests that the difference between hot-electron injection and the F-N tunneling can be explained in terms of the average electron energy in the oxide. Hot holes injection experiments reveal that the life of oxide breakdown is not simply determined by the total number of injected holes. New hot-carrier-induced TDDB (Time-dependent dielectric breakdown) models of thin gate oxide are reported in this paper.

Keywords: thin gate oxide, TDDB, substrate hot-carrier, charge to breakdown, model
PACC: 7360H, 0710