

雪崩热电子注入对快速热氮化的 SiO_xN_y 膜陷阱的影响

陈蒲生 杨光有

(华南理工大学物理系, 广州 510641)

1990年8月18日收到, 1990年11月14日修改定稿

本文研究了雪崩热电子注入对快速热氮化的 SiO_xN_y 膜体内电子陷阱和界面陷阱的影响。结果表明: 快速热氮化的 SiO_xN_y 膜存在着不同类型的陷阱, 其陷阱密度悬殊很大。雪崩热电子注入过程中在 $\text{Si}/\text{SiO}_x\text{N}_y$ 界面上产生两类性质不同的快界面态陷阱。同时还给出这两种陷阱在禁带中的能级位置, 界面态密度随雪崩注入的变化关系。文中并对实验结果进行讨论与分析。

一、引言

随着 VLSI 向微型化、高性能的方向发展, 在短沟道 MIS 结构的表面器件和集成电路中, 普遍存在着热载流子注入现象, 该物理现象使器件参数退化, 导致器件性能不稳定。然而, 雪崩热电子注入对 MIS 结构介质膜陷阱的影响报道甚少。Lai^[1] 和 Chih-Tangsa^[2] 等人研究了 SiO_2 膜的热电子注入现象, 指出: 从 Si 衬底到 SiO_2 膜的雪崩热电子注入过程中, 除了介质膜内存在电子陷阱以外, 还会在 Si/SiO_2 界面上产生快、慢界面陷阱, 引起平带电压的漂移 ΔV_{FB} 。Maurizio Severi^[3] 等人进一步研究了常规工艺下 SiO_xN_y 膜的雪崩热电子注入现象, 指出: 雪崩注入同样使 V_{FB} 发生漂移, ΔV_{FB} 随注入时间变化关系呈现出的“迴转行为”是由于 $\text{Si}/\text{SiO}_x\text{N}_y$ 界面上伴随有额外正的界面陷阱电荷。以上说明: 对于热氮化的 SiO_xN_y 膜, 雪崩热电子注入仍然引起额外电荷。然而, 对快速热氮化的 SiO_xN_y 膜的雪崩热电子注入实验, 则很少有报道。本文就雪崩热电子注入对快速热氮化的 SiO_xN_y 膜体内电子陷阱和界面陷阱的影响进行了较深入的实验研究, 给出了实验结果, 并对结果作了讨论分析。

二、陷阱电荷测试原理

研究 MIS 结构介质膜内的带电状态常采用高频 C-V 测试技术。介质膜的电荷一般由膜内陷阱电荷和界面陷阱电荷两部分组成。热电子注入到介质膜内会被体电子陷阱和界面陷阱俘获而引起 C-V 特性曲线的变化。图 1 是介质膜陷阱带电状态测试原理示意图。当雪崩注入时, 膜内电子陷阱俘获注入的电子而带负电, 引起 C-V 曲线由“1”朝正偏压方向沿电压轴平行漂移到“2”; 如果膜内出现负电荷的同时还伴随有小量正电荷, 则两

种电荷总的贡献会使“2”退回到“3”;在这同时,若再考虑雪崩注入电子而引起界面陷阱电荷(不同于体内陷阱电荷,其带电状态随表面势或偏压而改变)的影响,则 $C-V$ 曲线就不是“3”,而是围绕“3”的禁带中央(界面态不发生变化的点)曲扭到“4”。曲扭的阴影面积就是界面陷阱电荷的贡献^[4]。

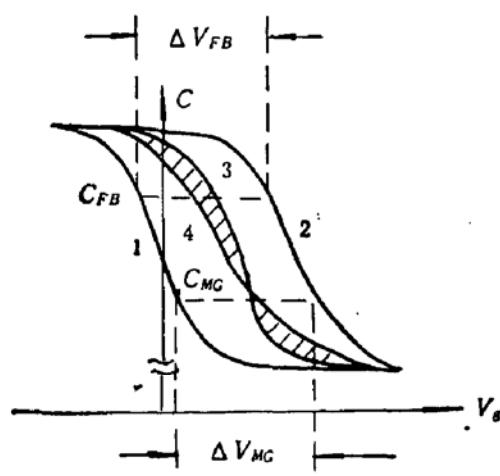


图 1 陷阱带电状态测试原理示意图

由此可见,雪崩热电子注入(相当于充电)以后,分析 $C-V$ 曲线的变化,测出禁带中央电压的漂移 ΔV_{MG} 、平带电压漂移 ΔV_{FB} 和禁带中央界面态密度的变化 ΔD_{itm} ,就可以反映出膜内体电子陷阱和界面陷阱的特性。具体来讲, ΔV_{FB} 反映的是包括界面陷阱电荷在内的整个介质膜系统的总电荷,两者的关系是

$$O_s = CC_{os}\Delta V_{FB}$$

式中: C_{os} 是单位面积的介质膜电容; O_s 是单位

面积里介质膜所含有的电荷量; C 是比例系数,它取决于陷阱的分布状态(对于均匀分布的陷阱^[3], $C = 2$)。若假设单一电子陷阱模型、当陷阱全部被电子填充时, O_s 才是整个介质膜系统电子陷阱所对应的电荷。而 ΔV_{MG} 反映的是介质膜体内净电荷量、不包含位于界面处的界面陷阱电荷(实际应用中,有时若忽略界面陷阱电荷贡献,则会以 ΔV_{FB} 代替 ΔV_{MG})。还应指出的是, D_{itm} 反映的是禁带中央界面陷阱密度而不是界面陷阱的带电状态。

三、实 验

样品是在掺硼 CZ 生长 P 型〈100〉晶向、电阻率为 $5 \sim 10 \Omega \text{cm}$ 的抛光 Si 晶片上制成 MIS 电容。Si 片经过标准清洗,在高纯氧气中干氧氧化(氧化温度为 970°C , 氧化时间控制在使生长的膜厚约为 370 \AA 的范围)。接着在另一高温炉中通高纯氮气快速热氮化,氮化温度为 1150°C 氮化时间为 30 秒、60 秒、120 秒。继后在 1150°C 的高纯 N_2 气氛中退火 25 分钟。接着是制作栅电极,电极以外的硅表面进行过 P 型杂质的离子注入。最后制成了栅极面积为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 的 MIS 结构。

采用 Nicollian^[4] 等人提出的实验方法进行雪崩热电子注入。图 2 即是我们的雪崩热电子注入实验装置图^[5]。通过谐振方式实现的大幅度正弦信号 V_i 加在 MIS 电容两端。瞬间交变的正电场使 Si 衬底雪崩产生出电子-空穴对,其中电子越过界面电子势垒注入到介质膜内流向栅极,形成一平均注入电流

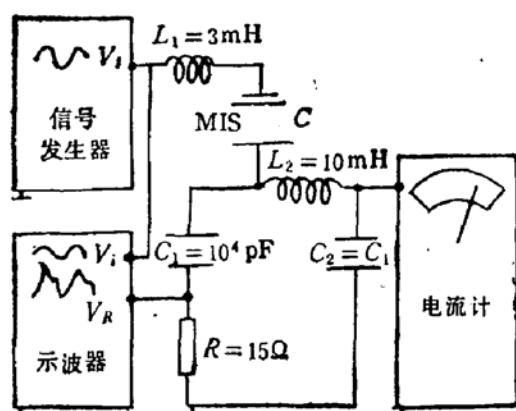


图 2 雪崩热电子注入实验装置图

I_{de} 。未注入到介质膜内的电子在信号的负半周期内又回到衬底。从而实现了热电子的注入(由于界面空穴势垒高过电子势垒,故在信号的负半周空穴不能注入到膜内)。

实验过程中,对不同注入剂量状况下的高频 $C-V$ 和准静态 $C-V$ 特性进行测量(采用常规的测试装置^[6])。再结合微型计算机数据处理及绘图,分别得出 ΔV_{FB} 、 ΔV_{GM} 及 D_{it} 与注入电荷剂量(注入时间)的关系,进而讨论雪崩注入对快速热氮化的 SiO_xN_y 膜陷阱的影响。

四、结果与讨论

图3、图4分别给出不同雪崩注入剂量(时间)某种快速热氮化样品的高频 $C-V$ 曲线漂移和准静态 $C-V$ 特性的变化情形(其它类型的快速热氮化样品,在实验中也都观察类同的特性),从图中看出, $C-V$ 特性曲线漂移经过了三个阶段:从“1”到“3”为整个介质膜系统的负电荷堆积阶段;从“3”到“4”为负电荷堆积减少阶段;最后,从“4”到“6”为负电荷继续堆积阶段。下面从高频与准静态 $C-V$ 特性曲线获得禁带中央电压漂移 ΔV_{MG} 、平带电压漂移 ΔV_{FB} 和界面态密度 D_{it} 随注入剂量(时间)的变化等因素来分别讨论雪崩热电子注入对快速热氮化的 SiO_xN_y 膜体电子陷阱和界面陷阱的影响。

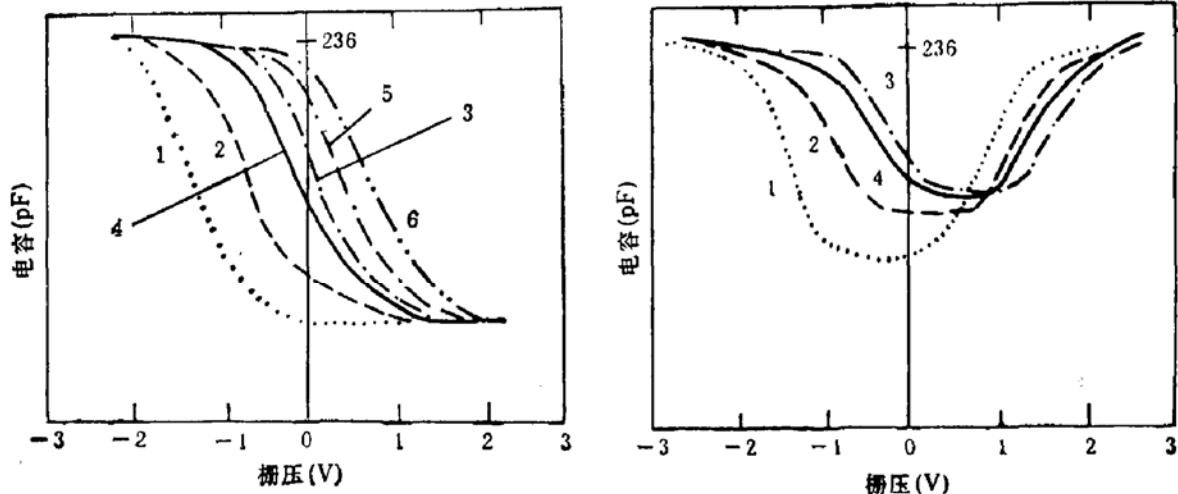


图3 雪崩注入前后高频 $C-V$ 实验。
 $I_{de} = 4 \times 10^{-8} \text{ A}$ “1”、“2”、“3”、“4”、“5”、“6”是注入时间分别为 0、2、4、8、16、22 分的实验结果。样品: 氮化温度 1150°C; 氮化时间 60s

图4 雪崩注入前后准静态 $C-V$ 实验
 $I_{de} = 4 \times 10^{-8} \text{ A}$ 。“1”、“2”、“3”、“4”是注入时间分别为 0、2、4、8 分的实验结果。样品: 氮化温度 1150°C; 氮化时间 60s

〈一〉 ΔV_{MG} 与膜体内不同类型电子陷阱的关系

以往报道的 Si/SiO_2 系统和 $\text{Si}/$ 常规热氮化的 SiO_xN_y 系统中 ΔV_{MG} 随注入的变化呈现“饱和状态”(图5a所示)这被解释为: 雪崩注入后, 介质膜体内产生了受主型的电子陷阱(该陷阱被电子填充时带负电、空位时呈电中性), 注入到一定剂量(时间)后, 这种陷阱上陷阱的电子数趋于饱和。详细物理过程大致如下: 注入初期, 这种陷阱俘获

了注入的部分电子，膜体内便有负电荷堆积， ΔV_{MG} 增大。但当注入到一定剂量（时间）后，俘获了一定数量电子的陷阱，其电子再激发的几率增大，因而陷阱对电子反俘获现象增强。当俘获与反俘获一旦达到动态平衡时，陷阱上陷阱的电子数趋于饱和，这时再继续注入的电子就直接流向栅极处， ΔV_{MG} 就不再增大。而我们的实验结果与上述有明显区别，图 5b、c”是我们对于快速热氮化的 SiO_xN_y 膜的实验结果（b, c 曲线来源于图 3）。从图上曲线 b 看出，禁带中央电压的漂移并不是出现简单的饱和状态，而是弱呈现“N”形状。这说明快速热氮化的 SiO_xN_y 膜具有 SiO_2 膜和常规工艺下的 SiO_xN_y 膜的受主型电子陷阱特性，并不是唯一类型的陷阱。曲线 b 上显示出的“回转现象”，说明这种介质膜除了存在着受主型的电子陷阱以外，还存在有其他正电荷，使得 ΔV_{MG} 下降。为了分析该陷阱特性，雪崩注入前，我们对样品作了正、负偏压的电容变化实验（与雪崩注入后的实验结果类似），见图 6 所示。发现从负偏到正偏，再由正偏到负偏，MIS 结构里有“剩余”负电荷存在膜内。说明这是一种充、放电时间较长的陷阱（又称为慢界面态），当偏压从正到负扫描时，被陷电子来不及放电，还停留在陷阱内。综上所述，我

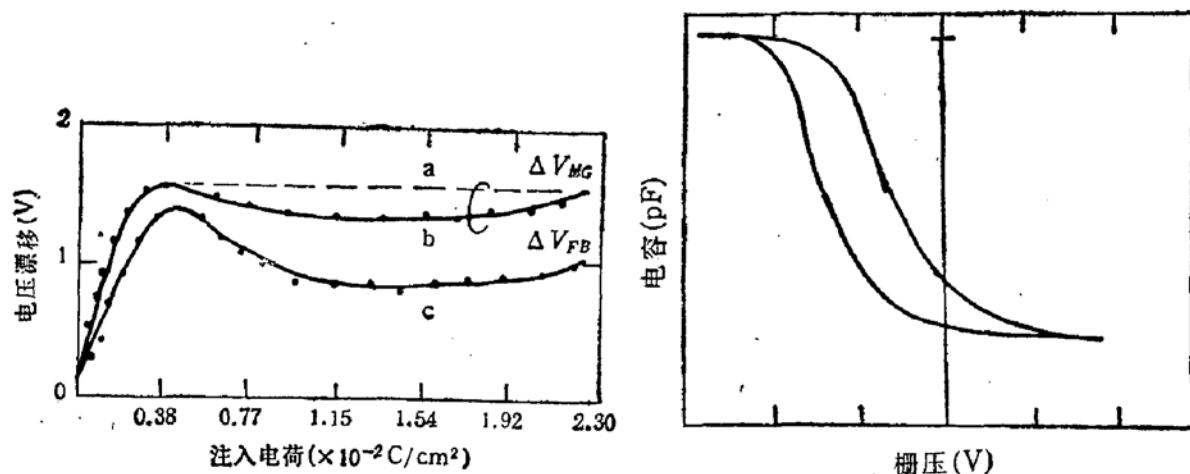


图 5 ΔV_{FB} 、 ΔV_{MG} 与注入剂量的关系

图 6 雪崩注入前或后，正、负偏压 C-V 特性变化实验示意图

们认为 ΔV_{MG} 达到一个峰值后又下降是该介质膜内还存在有施主型的电子陷阱（填充电子时呈电中性，空位时带正电），并进一步假设这种膜体内的电子陷阱位于 $\text{Si}/\text{SiO}_x\text{N}_y$ 界面附近，是一种充、放电时间较长的慢界面态。注入初期，这部分电子陷阱被电子填充，呈现电中性，对 ΔV_{MG} 没有影响。当雪崩注入到一定剂量时，继续注入的电子大部分不再被陷，在电场 ($F_0 = 6 \text{ mV/cm}$) 驱动下直接运行向栅电极。膜体内位于界面附近的施主型电子陷阱，其上陷阱的电子在该电场作用下逐渐离开陷阱，大多数向栅电极运行、小部分运动到膜体内（被陷），这种施主型电子陷阱的空位呈现出正电性，它们与体内负电荷（含膜体内部受主型电子陷阱俘获的电子）互相补偿而使 ΔV_{MG} 下降。然而，图中看出 ΔV_{MG} 下降是有限度的，下降到一定程度时又缓慢上升，仍显出受主型电子陷阱的俘获特性，我们认为这有可能是膜体内还存在着另一类型的受主型电子陷阱（不同于前述的那一种类）在这时起作用。本实验的结果与讨论也和文献[7]的实验结果一致。因而， ΔV_{MG} 弱呈现“N”形的实验结果表明：快速热氮化的 SiO_xN_y 膜体内受主

型的电子陷阱密度大于膜体内靠近界面位置的施主型慢界面态的陷阱密度；这种新型介质膜内的受主型电子陷阱不是单一类型的陷阱，而是陷阱机理尚不清楚的多种类型的陷阱（如陷阱俘获截面不同等）。要深入弄清这些问题还必须有更多的实验数据和进一步的数学模拟。

〈二〉 ΔV_{FB} 与界面施主、受主陷阱产生的关系

实验得到的图 5c 变化关系曲线与文献[8]吻合。从图 5c 看到，平带电压的漂移并不是与禁带中央电压漂移成比例地增减。按上所述，平带电压的漂移反映的是整个膜内的带电状况（含界面电子陷阱），说明在 ΔV_{FB} 回转过程中，除了介质膜内存在的正陷阱电荷以外，在界面上雪崩注入时还产生额外正电荷。

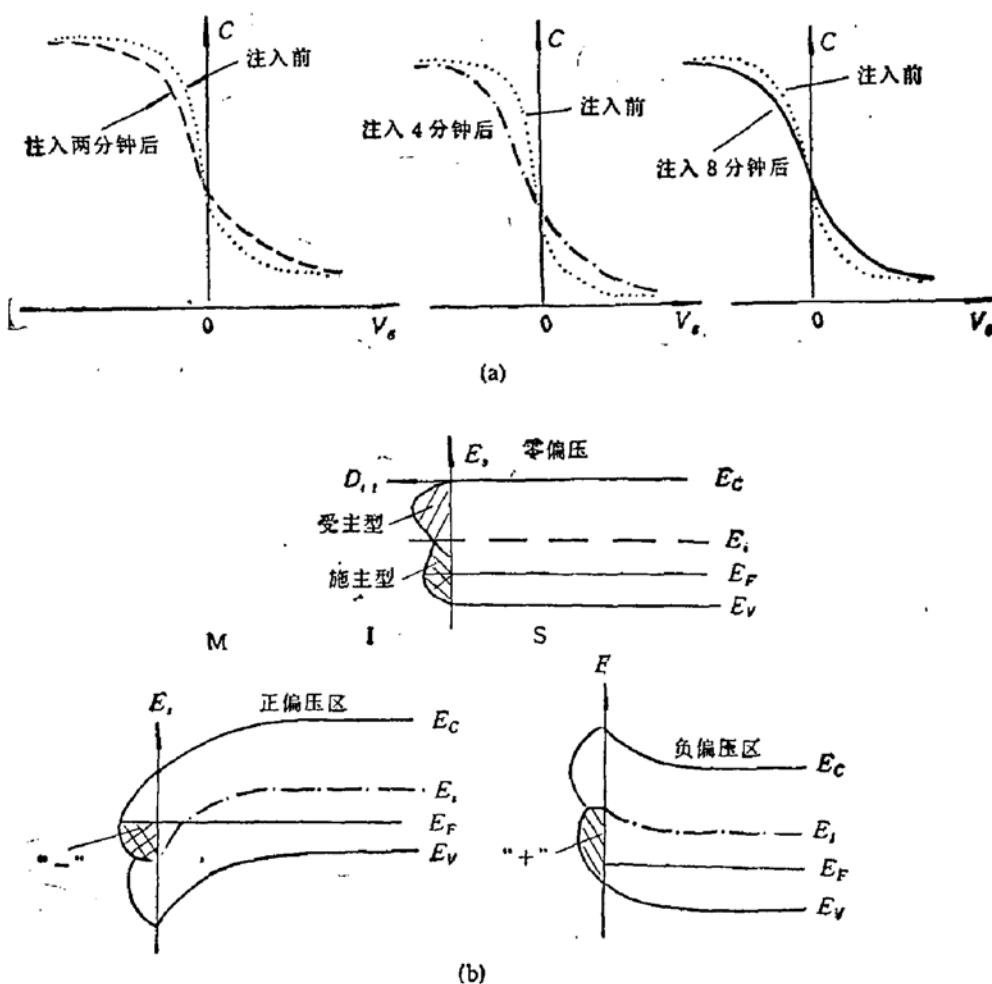


图 7 不同类型界面陷阱特征示意图

这里侧重分析界面上雪崩注入时产生的陷阱电荷。考察图 5c 第二次上升曲线以及图 7(a) 不同注入时间前后的 C-V 曲线（积累区、耗尽区重合）。不难看出，雪崩注入时界面上产生的正的陷阱电荷不是单一类型的界面陷阱电荷，同时，雪崩注入后期界面上还产生一种负的陷阱电荷。分析图 7(a) 的实验结果，注入后的 C-V 曲线形状较注入前的普遍要“平”：正偏压区 C-V 曲线向右延伸，说明界面陷阱带负电；负偏压区 C-V 曲线向左延伸，说明界面陷阱带正电。于是我们认为：在雪崩热电子注入时， $\text{Si}/$ 快速热氮化的

SiO_xN_y 膜界面上可能产生两种性质不同的界面陷阱：一种是施主型的界面陷阱，它们位于 Si 禁带的下半部分；另一种是受主型的界面陷阱，它们位于禁带的上半部分，（见图 7(b)）。这两种界面陷阱在雪崩注入的不同阶段表现出来，并随着外加栅压的变化或显正电或显负电。图 7 具体给出雪崩注入不同偏压的区域 (a)，及其相应的 MIS 结构能带变化与界面陷阱带电状态 (b) 的示意图。从图 7(b) 看到，零偏压时，费米能级以下的少部分施主型的界面陷阱被电子填充（呈现电中性），未被填充的陷阱带正电，而受主型的界面陷阱全部处于空状态呈现中性，结果呈现微弱正电性。正偏压时，费米能级上升，施主型界面陷阱全部被电子填满（呈中性），受主型界面陷阱部分被电子填充（呈负电），所以整个界面呈现负电性， $C-V$ 特性曲线向右漂移。而在负偏压时，费米能级下降受主型界面陷阱全部处于空状态（呈中性），而施主型界面陷阱极小部分被电子填充（呈中性），大部分处于电离状态（呈正电），结

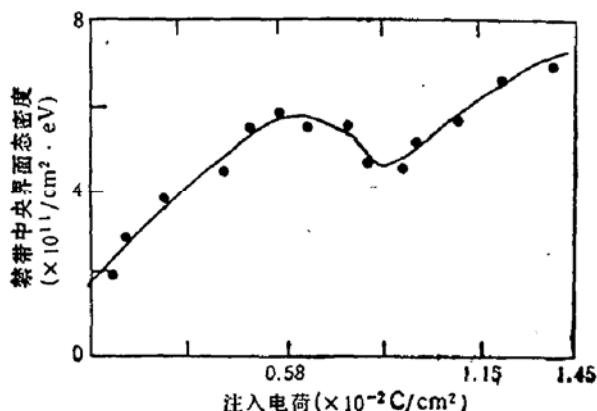


图 8 禁带中央界面态密度随雪崩热电子注入剂量的变化关系

果呈现正电性，所以 $C-V$ 特性曲线向左漂移。若再转向正偏时，界面又呈现负电性， $C-V$ 特性曲线再次向右漂移。这就是 ΔV_{FB} 呈现“N”形状的物理原因。

还须强调的是，严格确定界面陷阱所属的种类还必需考察不同偏压下界面陷阱俘获截面的变化情形^[9]。有关不同类型界面陷阱的来源，目前尚未定论，可能与界面上 N、Si、 O_2 等的键合作用有关，还可能与界面附近固定电荷有关^[7,8]。

〈三〉 D_{it} 与雪崩注入剂量的关系

前人报道了 Si/SiO_2 系统的界面态密度随注入剂量（时间）的变化关系是单调增加^[11]。我们针对 $\text{Si/快速热氮化的 SiO}_x\text{N}_y$ 系统进行研究，实验得到界面态密度随注入剂量的变化关系却呈现“N”形状（如图 8 所示）。

对于这个实验结果，我们的初步解释是：起初时，随着雪崩注入剂量增加，雪崩热电子注入碰撞界面机会增多，使界面上产生的界面缺陷增多，导致界面态密度增加；随着注入剂量增加到一定程度出现界面态密度变化的“迴转效应”，可能是 T. Hori 等人最近提出的当界面上受到一定电子剂量注入后引起的“退火”效应^[10]；随后雪崩注入剂量继续增加时，电子碰撞界面达到足够程度时，有可能产生另一种新的界面态，因而界面态密度呈现再度上升。

五、结 论

本文报道了雪崩热电子注入对快速热氮化的 SiO_xN_y 膜体电子陷阱和界面陷阱的影响，得到如下结论：

〈一〉 雪崩热电子注入过程中观察到，快速热氮化的 SiO_xN_y 膜体内除了存在着受主

型的电子陷阱以外，还存在着施主型的慢界面态陷阱（位于膜内但靠近界面的位置），这种施主型慢界面态陷阱的密度小于受主型的陷阱密度，受主型的电子陷阱不是单一类型的陷阱。

〈二〉雪崩注入过程中，Si/快速热氮化的 SiO_xN_y 系统的界面上除了产生施主型的快界面陷阱以外，还会产生受主型的快界面陷阱。前者位于禁带的下半部，后者位于禁带的上半部。

〈三〉观察到 Si/快速热氮化的 SiO_xN_y 系统的界面态密度随雪崩注入剂量的变化关系：呈现“N”形迴转效应，认为这与电子碰撞界面和界面附近的退火效应有关。

参 考 文 献

- [1] S. K. Lai and D. R. Young, *J. Appl. Phys.*, **52**(10), 6231(1981).
- [2] Chih-Tang Sah, Jack Yuan-Chen Sun and Joseph Jeng-Tao Tzau, *J. Appl. Phys.*, **54**(5), 2547(1983).
- [3] Maurizio Severi and Maurizio Impronta, *Appl. Phys. Lett.*, **51**(21), 1702(1987).
- [4] E. H. Nicollian, C. N. Berglund, P. F. Schmidt and J. M. Andrews, *J. Appl. Phys.*, **42**, 5654(1971).
- [5] 杨光有, 陈蒲生, 郑学仁, 华南理工大学学报, **18**(1), 48(1990).
- [6] 孙恒慧, 包宗明, 半导体物理实验, p. 172, p. 242, 高等教育出版社, (1986).
- [7] 陈蒲生, 杨光有, 刘百勇等, 半导体学报, **11**(6), 465(1990).
- [8] Z. H. Liu, P. S. Chen, Y. C. Cheng et al., *J. Electrochem. Soc.*, **137**(6), 1871(1990).
- [9] E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS Physics and Technology*, P. 285, John Wiley & Sons, Inc. (1982).
- [10] T. Hori, H. Iwasaki, Y. Naito and H. Esaki, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **ED-34**(11), 2238(1987).

Effects of Avalanche Hot-Electron Injection on Trapping of Rapid Thermal Nitrided SiO_xN_y Film

Chen Pusheng and Yang Guangyou

(Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou)

Abstract

The effects of avalanche hot-electron injection on trapping of bulk electron and interface state of rapid thermal nitrided SiO_xN_y film are studied. The results show that the different kinds of trap exist in the rapid thermal nitrided SiO_xN_y dielectric films, and the trap densities are different markedly. In the course of the avalanche hot-electron injection, two kinds of fast interface state traps with different properties are generated in Si/SiO_xN_y interface. The positions of the traps in forbidden band and the change of the interface state density with avalanche injection are given. The experimental results are also discussed.