

MOS 结构 Si/SiO₂ 界面态的电荷泵测量

张国强 王国彬 余学锋 任迪远 严荣良

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

摘要 建立了一套进行 MOS 结构 Si/SiO₂ 界面态电荷泵测量的测试系统,其发展的快速电荷泵技术可使界面态测量速度达到 5 次/秒. 分析研究了泵电流与 Si/SiO₂ 界面态测量之间所应关注的技术细节. 借助于电荷泵法,研究了 PMOSFET Si/SiO₂ 界面态在辐照和退火过程中生长和退火的行为规律.

EEACC: 2560R, 2530F; **PACC:** 7340Q

1 引言

MOSFET 是组成 MOS 器件电路的最基本单元,研究它的电离辐射效应对器件电路的可靠性使用具有重要意义. 研究表明,电离辐射将在 MOS 结构氧化物体内和 Si/SiO₂ 界面产生氧化物电荷和界面态的增长积累,从而导致器件阈电压漂移和漏电流增加等电参数退化. 因此,获得辐射感生 Si/SiO₂ 界面态密度的测量方法就显得尤为重要. 这是研究 MOS 结构辐射响应微观机理必不可少的手段之一.

关于 MOS 结构 Si/SiO₂ 界面态密度测量,已有许多方法,其中包括计算弱反型到强反型区平均界面态密度测量的亚阈摆幅法^[1],给出弱反型区 $3/2 \varphi_B$ 周围平均界面态密度的亚阈法^[2],Stretch-out 法^[3]能够计算出中带到强反型区的平均界面态密度等,这些方法,各自测量的能量范围不一样,而且都必须获得器件 $I_{ds}-V_{gs}$ 特性,在计算界面态密度时,还需知道器件的工艺参数(如沟道掺杂浓度,沟道宽长比等). 尤其是当器件漏源电流较大并超出亚阈区时,界面态密度将不能计算得到. 因此,有必要发展一种克服上述测试方法的弱点又能准确测定 Si/SiO₂ 界面态密度的新方法. 本文建立了一套 MOS 结构 Si/SiO₂ 界面态密度测量的电荷泵 (Charge Pumping 简称 C-P) 技术测试系统,并应用测试系统分析研究了 MOS 结构 Si/SiO₂ 界面陷阱的辐照和退火行为.

2 电荷泵技术原理

MOSFET Si/SiO₂ 界面态测量的基本电荷泵技术,是在漏源结上加一个反偏压,利用在

张国强 男,1962 年生,副研究员,主要从事 MOS 结构新栅场介质的辐射效应、机理和加固应用研究
王国彬 男,1963 年生,助理研究员,主要从事 MOS 辐射损伤计算机模拟应用研究
余学锋 男,1964 年生,助理研究员,主要从事抗辐射 LSI 机理和加固研究
1996 年 3 月 30 日收到初稿,1996 年 8 月 31 日收到修改稿

栅极上加一个脉冲,使沟道区从积累到反型间不断变换,从而使来自漏源区的少数载流子在 Si/SiO₂ 界面陷阱上与来自衬底的多数载流子反复复合,由此产生净的衬底电流(泵电流),饱和泵电流的大小直接与 Si/SiO₂ 界面态密度、栅面积、脉冲频率成正比,从而获得 Si/SiO₂ 界面态密度的测量^[2,4,5],其原理如图 1(a)所示。

由饱和泵电流 I_{cp} , 可求得平均界面态密度 D_{it} 为:

$$D_{it} = I_{cp} / (f A_g q^2 \Delta \Psi_s) \quad (1)$$

其中 D_{it} 为平均界面态密度(费米能级扫过的能量范围内界面态的平均值,单位: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$); I_{cp} 为饱和泵电流(单位: A); f 为脉冲

频率(单位: s^{-1}); A_g 为沟道漏源区掺杂状态的函数。最好的近似是沟道面积,其中沟道长为漏源结间距(单位: cm^2); q 为电子电荷; $\Delta \Psi_s$ 为表面势的总扫描范围(单位: V),或写成:

$$N_{it} = I_{cp} / (f A_g q) \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2)$$

栅极上所加脉冲的方法主要有三种^[4]:

- 1) 保持脉冲基准处于积累,改变脉冲高度使表面反型;
- 2) 保持脉冲基准处于反型,改变脉冲高度使表面积累;
- 3) 改变脉冲基准从反型到积累,同时保持脉冲高度为常数。

由基本的 C-P 技术,已经发展成能测量界面态密度沿沟道的横向分布^[6],界面态在禁带中的能量分布^[7],以及考虑电子和空穴散射等统计因素影响的更精确测定界面态密度的 C-P 方法^[5]。

3 样品制备及实验

实验所用样品为 Si 栅 PMOSFET,制作在电阻率为 $3.5 \sim 4 \Omega \cdot \text{cm}$, N(100) 的 Si 衬底上, 1000°C 干 $\text{O}_2 + \text{HCl}$ 栅氧化,栅氧厚度 100nm ,沟道长 $12\mu\text{m}$,宽 $1500\mu\text{m}$,多晶硅厚 500nm 。辐照在新疆物理所 Co-60 γ 源上进行,辐照剂量率为 $104.6 \text{ Gy}(\text{Si})/\text{min}$ 。辐照偏压为 $V_g = V_s = 5\text{V}$, $V_d = 0\text{V}$ 。辐照后,样品处于 100°C 恒温箱中和 20°C 室温下进行热退火。C-P 测试系统见图 1(b)。

它由 PC 机、HP8165A(信号源)、HP4140B(PA 表/DC 源)和样品台构成,通过 IEEE-488 总线控制,实现数据自动采集。HP8165A 提供栅极脉冲源,HP4140B 提供漏源结反向偏压 V_{cr} 并测量泵电流 I_{cp} ,见图 1(a)所示。

常速 C-P 测试,栅极所加脉冲可采取二种方式:(1) 固定脉冲幅度($V_{\text{amplitude}}$),改变脉冲补偿电压(V_{offset});(2) 固定脉冲补偿电压,改变脉冲幅度,其脉冲波形如图 2 所示。

快速电荷泵测试,采取二种栅脉冲方式都

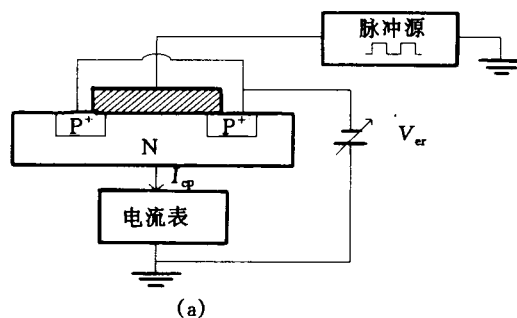


图 1(a) 电荷泵 C-P 测量装置示意图

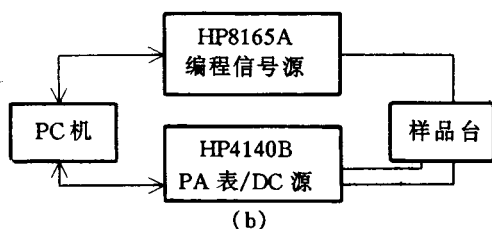


图 1(b) 电荷泵 C-P 测试系统

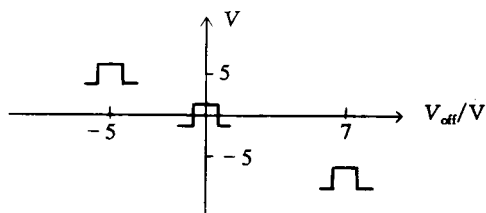


图 2(a) 固定脉冲幅度($V_g=2.5V$),
改变脉冲补偿电压(V_{offset})的栅脉冲波形

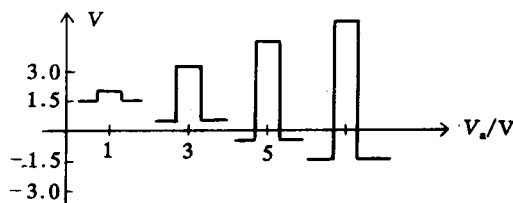


图 2(b) 固定脉冲补偿电压($V_{offset}=-2V$),
改变脉冲幅度(V_g)的栅脉冲波形

可. 如采取第二种方式, 从 $I_{cp} \sim$ 脉冲幅度关系图中, 选择当 I_{cp} 达到饱和时所对应的某一脉冲幅度值, 此点选择应考虑到辐照或退火所引起的 $I_{cp} \sim$ 脉冲幅度曲线沿横轴方向漂移的范围, 保证当取此脉冲幅度值时, I_{cp} 能达到饱和. 于是固定脉冲补偿电压, 亦固定脉冲幅度, 反复快速测量 I_{cp} , 即可实现快速电荷泵测试. 本文所述系统, 可达到 5 次/秒的 I_{cp} 测量速度.

4 实验结果及讨论

4.1 泵电流与脉冲频率的关系

图 3 所示的是泵电流与脉冲频率的依赖关系. 由图可见, 在大约 0.1~100kHz 范围内,

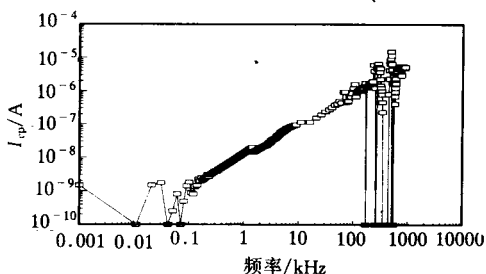


图 3 饱和泵电流与脉冲频率的依赖关系

饱和 I_{cp} 与脉冲频率成正比. 此结果表明脉冲频率仅影响饱和泵电流的大小, 但不影响界面态密度的值. 因此, 在 $I_{cp} \sim$ 频率线性关系范围内, 选任何脉冲频率都可进行界面态的测量, 这与前述公式(1)和(2)相一致. 但当栅脉冲频率小于 0.1kHz 或大于 100kHz 时, 饱和泵电流与脉冲频率之间不遵循线性关系. 其结果表明, 栅脉冲频率过大或过小将影响界面态密度的准确测量.

可能的原因是, 当脉冲频率过低时, 慢界面陷阱的俘获与反俘获事件也对电荷泵电流有贡献, 这使得泵电流的成分复杂化. 但过高的脉冲频率又相当于在 I_{cp} 中加入了几何成分, 从而使 I_{cp} 与脉冲频率间失去线性依赖关系. 另外, 过高或过低的栅脉冲频率亦使得 I_{cp} 测量的噪声增大. 一般而言, 脉冲频率的选择依赖于所希望的信号强度和界面陷阱俘获时间常数

的大小. 这一点与国外所报道的结果不一致^[8].

4.2 泵电流与漏源反偏压的关系

图 4 所示的是 I_{cp} 与漏源反偏压的关系. 由图可见, 漏源反偏压轻微影响饱和泵电流的大小, 较大的反偏压将导致较大的饱和泵电流. 这与国外所报道的结果存在一定的偏差^[8].

在一个脉冲周期中, 当 MOSFET 被脉冲

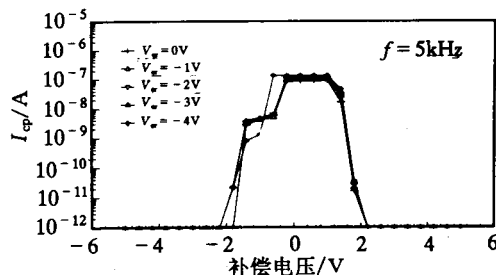


图 4 I_{cp} 与漏源反偏压的依赖关系

到反型时,表面成为深耗尽,少子将从源和漏流进沟道,在这里,它们中的一部分将被界面陷阱所俘获.当栅脉冲把表面驱动成积累时,可动电荷在漏源反偏压的作用下将反贯穿进漏和源区,这时被界面陷阱所俘获的电荷将与从衬底来的多子相结合,从而产生净的电荷流进衬底.当脉冲反复作用时,将形成泵电流.由此可知,漏源反偏压的作用是:(1)在表面处于积累状态时,驱动可动电荷迁移回漏源区,为形成泵电流提供条件.(2)使漏源结处于截止状态.因此,漏源反偏压对形成泵电流是重要的.漏源反偏压越大,可能将引起更多非界面陷阱电荷成分的自由电荷加入到衬底泵电流形成之中,从而引起,饱和泵电流轻微的增长.

4.3 PMOSFET 的电离辐射响应

图 5 所示的是用常速 C-P 法获得的 PMOSFET,泵电流 I_{cp} 随 Co-60 γ 辐照总剂量的响应关系,图中同时显示出相应的 $I_{ds}-V_{gs}$ 亚阈特性.由图可见,随辐照总剂量的增加,饱和泵电

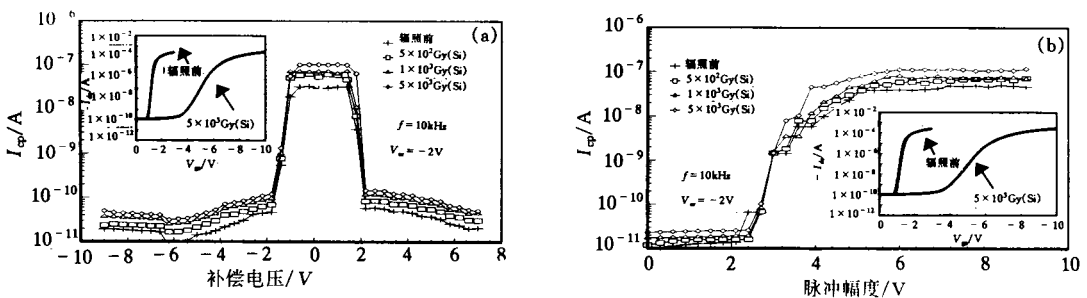


图 5 用两种栅脉冲方法获得的 PMOSFET 辐照前后的泵电流
图中同时给出相应的 $I_{ds}-V_{gs}$ 亚阈特性.

流相应增加,表明了界面态随辐照的积累增长.这亦可从 $I_{ds}-V_{gs}$ 亚阈曲线的畸变中得到证实.从图中以及表 1 还可以看到,两种栅脉冲方式下获得的饱和泵电流相差很小,表明界面态密度测量与栅脉冲方式的选择关系不大.但用亚阈法和电荷泵法获得的界面态密度应该存在差异,因为所计算平均界面态的能带范围不一样,而且电荷泵法对测量较大沟道尺寸器件(一般大于 10 μ m)的界面态,其精确度下降.

表 1 $I_{cp} \sim V_{offset}$ 与 $I_{cp} \sim V_{amplitude}$ 法获得的平均界面态密度 N_{it} (单位: cm^{-2}) 的比较

	$I_{cp} \sim V_{offset}$ 法	$I_{cp} \sim V_{amplitude}$ 法	亚阈法
辐照前	1.03×10^{11}	1.56×10^{11}	9.35×10^{10}
5×10^2 Gy	1.95×10^{11}	2.25×10^{11}	
1×10^3 Gy	2.43×10^{11}	2.57×10^{11}	
5×10^3 Gy	3.51×10^{11}	3.85×10^{11}	5.05×10^{11}

注:1) $f=10kHz$, $A_g=12\mu m \times 1500\mu m$.

2) 对亚阈法, $N_{it} = (C_{ox}/q) (V_{in} - V_{mk})$. [C_{ox} :单位面积氧化层电容; V_{in} :反型电压; V_{mk} :中带电压]

4.4 PMOSFET 的辐照后退火行为

为了研究辐射感生界面态在辐照后退火过程中的变化规律,采用快速 C-P 技术,研究了 PMOSFET 在 1×10^3 Gy(Si) 总剂量辐照后的 100 $^{\circ}C$ 恒温退火下,饱和泵电流随退火时间的依赖关系.其结果如图 6 所示.

由图可见,辐照后的 100 $^{\circ}C$ 恒温退火,饱和泵电流随时间快速增加,表明 Si/SiO₂ 界面缺

陷将在辐照后的高温退火环境中继续增多,呈现出界面态的“后生”效应.快速获得 MOS 结构 Si/SiO₂ 界面缺陷在辐照或退火中的行为规律,可用快速电荷泵技术,其界面态测量速率可达 5 次/秒,这可从图 7 中清楚地看到.这为准确研究 MOS 结构 Si/SiO₂界面态的生长和复合行为规律,提供了有效的方法和手段.

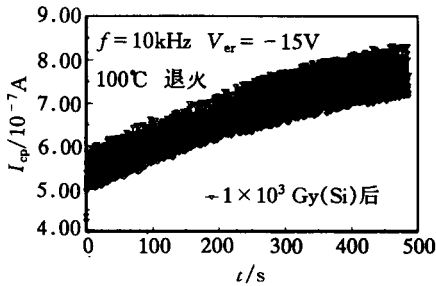


图 6 PMOSFET 1×10^3 Gy(Si)总剂量辐照后,在 100℃ 恒温退火下,饱和泵电流随退火时间的变化关系

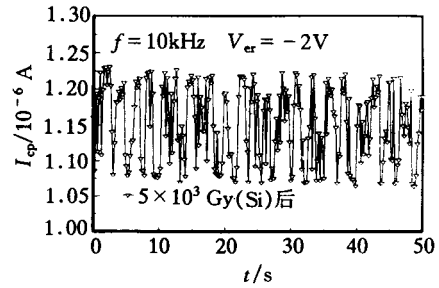


图 7 用快速 C-P 技术获得的 PMOSFET, 5×10^3 Gy 总剂量辐照后处于室温条件下,饱和 I_{cp} 与时间的相互关系

5 结语

本文给出了一套能常速和快速进行 MOS 结构 Si/SiO₂ 界面态测量的测试系统,所获得的快速电荷泵测试技术可使界面态的测试速率达到 5 次/秒.分析研究了泵电流与脉冲方式、脉冲频率和漏源反偏压之间的关系规律,采用电荷泵技术,获得了 PMOSFET 界面缺陷在辐照退火中生长和复合的行为规律,给出了电荷泵测量中应关注的技术细节,为研究 MOS 结构电离辐射微观机理提供了新的方法手段.

参 考 文 献

- [1] J. M. Benedetto and H. E. Boesch, Jr., IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6): 1461.
- [2] M. Gaitan and T. J. Russel, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6): 1256.
- [3] P. S. Winokur, J. R. Schwank, P. J. Mcwhorter *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6): 1453.
- [4] G. Groeseneken, H. E. Maes, N. Beltran *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1984, **31**(1): 42.
- [5] T. J. Russel, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1986, **33**(6): 1228.
- [6] W. Chen and T. P. Ma, IEEE Electron Device Lett., 1991, **12**(3): 393.
- [7] N. S. Saks, M. G. Ancana and W. Chen, Appl. Phys. Lett., 1992, **60**(18): 2261.
- [8] J. S. Brugler and P. G. A. Jespers, IEEE Trans. Electron Devices, 1969, **16**(2): 297.

New Charge Pumping Technique of Measuring Si/SiO₂ Interface States in MOS Devices

Zhang Guoqiang, Wang Guobin, Yu Xuefeng, Ren Diyuan and Yan Rongliang

(*Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*)

Received 30 March 1996, revised manuscript received 31 August 1996

Abstract A charge pumping test system for determining the Si/SiO₂ interface state density in MOS transistors has been set up. A fast measurement rate of interface states is up to 5 times/sec. The interface state dependence on the charge pumping current has been investigated. The formation and annealing characteristics of Si/SiO₂ interface traps after Co-60 irradiation or anneal have been studied by means of the charge pumping technique.

EEACC: 2560R, 2530F; **PACC:** 7340Q