

用电容瞬态技术测量界面态密度

北京大学物理系
晏懋洵 毛晋昌 陈开茅

摘要：本文叙述了一种简单方便的用于测量MOS界面态密度的电容瞬态技术。给出了利用该技术对N型硅-二氧化硅界面态总密度和界面态分布的测量结果。该技术适用于工厂中作一般工艺监测。

目前，研究界面态的方法很多，传统的方法有准静态C-V^[1]、高频C-V^[2]、电导法^[3]以及温度法等，光发射技术也是研究界面态的有力手段，近年来DLTS技术^{[4][5]}也广泛用于界面态的研究。但是，在一般工艺监测中作界面态密度测量时，上述方法或计算复杂，或精度不高，或设备昂贵不易推广作一般工艺监测用。我们采用的电容瞬态技术，是将样品置于液氮温度，利用界面态瞬时填充后引起的MOS电容的瞬时变化来测量界面态密度，所需设备简单，操作方便，精度较高，可适用于一般工艺的监测。

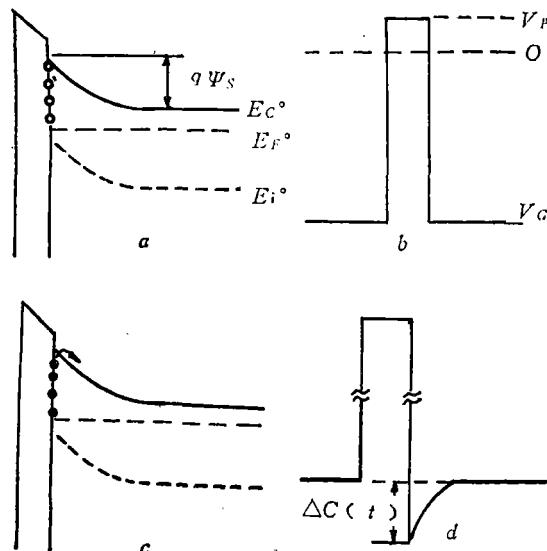


图 1

1. 基本原理

N型MOS在反型前的某一栅压V_G下的能带如图1.a所示。费米能级E_F°以上的界面态是空的。栅压V_G的脉冲变化，主要引起界面态电荷和半导体空间电荷的变化，在均匀掺杂和耗尽区假设的条件下，栅压与这两者之间的关系表现为

$$V_G = -\frac{Q_{it}}{C_i} - \frac{qN_D\epsilon_s}{2} \left(\frac{1}{C^2} - \frac{1}{C_i^2} \right) + V_0 \quad (1)$$

其中C_i、C分别是MOS的单位面积氧化层电容和单位面积总电容，Q_{it}为界面态电荷密度，N_D是浅杂质浓度，\epsilon_s是半导体的介电常数，V_0是与MOS材料参数有关的常量。

在V_G上叠加饱和注入脉冲时（参见图1.b），半导体表面由耗尽变为积累，原来空着的界面态将被饱和填充，界面态电荷密度相应地改变\Delta Q_{it}。脉冲过后，MOS电容马上恢复到原来的偏置V_G，脉冲期间填充于界面态的电子会逐渐发射出来（图1.c），从而引起如图1.d所示的电容瞬态\Delta C(t)。由脉冲前后栅压不变，根据(1)可得

$$\Delta Q_{it} = -\frac{qN_D\epsilon_s C_i}{2} \left[\frac{1}{(C + \Delta C_0)^2} - \frac{1}{C^2} \right] \quad (2)$$

所填充的界面态密度则为

$$N_{it} = \int_{E_F^0}^{E_C - q\psi_s} n_{it}(E) dE = -\frac{\Delta Q_{it}}{q} = \frac{N_D\epsilon_s C_i}{2} \left[\frac{1}{(C + \Delta C_0)^2} - \frac{1}{C^2} \right] \quad (3)$$

式中 ψ_s 为半导体的表面势， n_{is} 为单位能量间隔的界面态密度， E_F 和 E_c 分别是半导体体内的费米能级和导带底， ΔC_0 是电容瞬态之初始值。

相应于一系列不同的栅偏压 V_{G1} 、 V_{G2} ……，有一系列不同的表面势 $(\psi_s)_1$ 、 $(\psi_s)_2$ ……，也就有一系列不同的电容瞬态初始值，从而由(3)式可得到一系列不同能量范围的界面态密度 N_{is} 。如果所选择的栅偏压间隔足够小，就可用差分的办法近似求得界面态密度随能量的分布。

$$n_{is}(E) = n_{is}(\psi_s)_i = \frac{(N_{is})_{i+1} - (N_{is})_i}{q((\psi_s)_{i+1} - (\psi_s)_i)} \quad (4)$$

式中， ψ_s 是栅差压 V_{Gj} 所对应的表面势，它可由下式

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{L_D} \left[\frac{e^{\beta\psi_s} - \frac{1+\alpha}{1+\alpha e^{\beta\psi_s}}}{(1+\alpha) \left(\ln \frac{1+\alpha e^{\beta\psi_s}}{1+\alpha} - \beta\psi_s \right) + e^{\beta\psi_s} - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

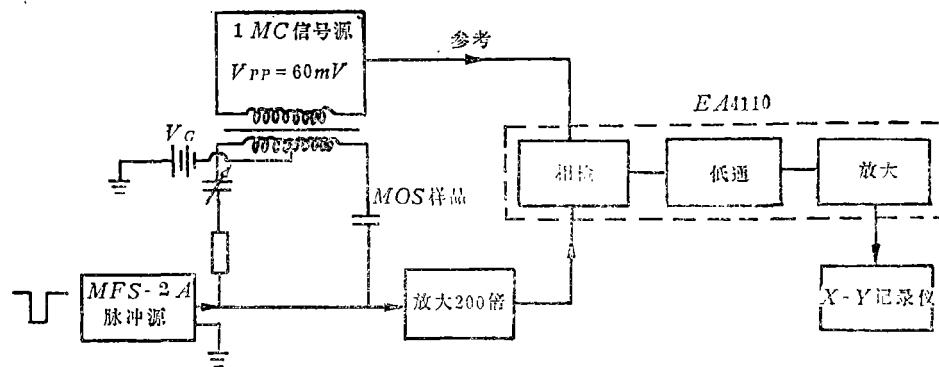


图 2 瞬态电容仪方框图

录仪就可能较真实地记录下 $\Delta C(t)$ 的初始值 ΔC_0 。大概的测量步骤是，首先，在室温下使样品处于一定的反偏置 V_G ，以使束缚于费米能级 E_F 以上界面态的载流子发射光。然后，在保持 V_G 不变的情况下，将样品置于液氮温度，待稳定后，再加以有足够幅度和宽度的脉冲，使MOS电容达到强积累状态，原来空着的界面

及高频C-V曲线来确定。(5)式中， L_D 为德拜长

$$度, L_D = \left[\frac{2\epsilon_s k T}{N_D q^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \beta = \frac{q}{k T}, \alpha = e^{\frac{(E_F - E_c)}{k T}}.$$

(5)式考虑了在低温下浅杂质不完全电离，费米能级的位置也应修正^[8]。

对于P型MOS可以有完全类似的结果。

2. 测量装置

瞬态电容仪^[7]的核心部分是自制的高频电容电桥，桥路的输出与MOS电容的瞬时变化成正比。放大器是自装的1MC交流放大器，带宽约50KC。放大器与桥路的连接应考虑相互的匹配。另外还应注意解决在脉冲注入期间，注入脉冲使放大器过载的问题。相敏检波器是美国EV公司的相检单元EA4110。测量方框图见图2。

3. 测量步骤及结果分析

在我们的测量中，脉冲后的电容瞬态曲线，是事先把样品置于液氮温度下，用X-Y记录仪记录的。由于在液氮温度下，填充于界面态（除离导带底较近的外）的载流子发射得很慢，电容瞬态有较长的时间常数，X-Y记

录仪就可能较真实地记录下 $\Delta C(t)$ 的初始值 ΔC_0 。大概的测量步骤是，首先，在室温下使样品处于一定的反偏置 V_G ，以使束缚于费米能级 E_F 以上界面态的载流子发射光。然后，在保持 V_G 不变的情况下，将样品置于液氮温度，待稳定后，再加以有足够幅度和宽度的脉冲，使MOS电容达到强积累状态，原来空着的界面

态被饱和填充。等脉冲过后，用X-Y记录仪记录下电容瞬态 $\Delta C(t)$ 。选取合适的 V_G ，使MOS样品处于弱反型，在室温下使上半带的界面态腾空，按上述步骤就可测得总界面态密度。

在作界面态密度随能量分布的测量时，栅偏压从平带电压开始选取，每间隔0.1伏取一值，直到弱反型为止。对于选定的每一栅偏

压，都按前述步骤测量。

我们实测了铝栅- SiO_2 -N型Si结构的两组MOS样品。一组是用三氯乙烯氧化工艺做的两种不同晶面样品，并经过氮氢退火。一组是用一般氧化工艺做的(111)晶面样品，在这一组中，一种是经过氮氢退火的，一种则未作退火处理。测量结果列于表1。

表1 不同氧化工艺、不同晶面的总界面态密度

	三氯乙烯氧化工艺		一般氧化工艺	
	(111)	(100)	2号 (未退火)	10号 (退火)
总界面态密度 ($\times 10^{10} cm^{-2}$)	4.7	1.7	46	27

对于10号样品，我们用高频C-V法测得的总界面态密度是 $12 \times 10^{10} cm^{-2}$ 。高频C-V曲线是用美国PAR公司的C-V PLOTTER测得的。可以看到用高频C-V法测得的结果比用瞬态法测得结果要小些。

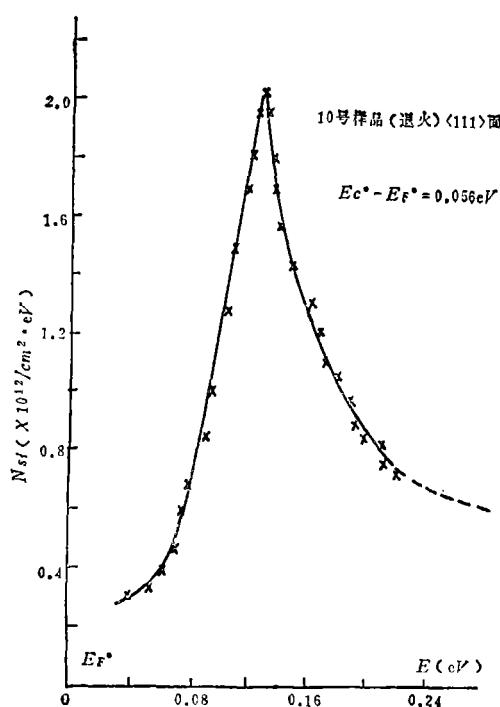


图3 界面态密度随能量的分布

我们还测量了10号样品的界面态密度分布结果如图3。从图3可以看到，靠近带边的界面态密度偏低比较多。这是由于靠近导带底的界面态发射时间常数很小，即使在液氮温度下，其发射时间常数也还是不大，使一般的X-Y记录仪响应不了。为了说明这一点，我们用X-Y记录仪和BOXCAR作了对比测试。在相敏检波之后同时接X-Y记录仪和BOXCAR（美国PAR公司生产的M164、M162），BOXCAR用来对瞬态电容进行单点取样，如图4所示。之所以在脉冲过后约100μs取样，主要是为了避开电路中分布参数产生的假瞬态的影响。

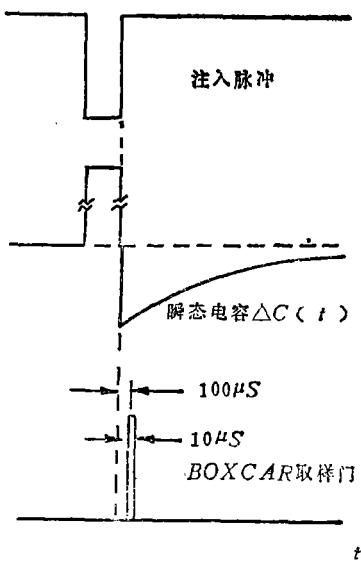


图4 取样门位置选择

表2列出了X-Y记录仪和BOXCAR同时进行测量时所得到的结果。从表中可以看到，在栅压较低时，两种仪器测量的数值相差较多，

表2 不同偏压下BOXCAR和X-Y记录仪测得的瞬态电容值之比较

栅偏压(伏)	-2.8	-2.9	-3.0	-3.1	-3.5	-3.7
势垒高度(eV)	0.013	0.023	0.036	0.053	0.103	0.119
瞬态电容初 始值 ΔC_0 (pf)	BOXCAR	5.78	7.82	8.50	8.91	10.30
X-Y		4.10	5.72	7.10	7.82	9.50
两种仪器测量值之比		0.70	0.73	0.84	0.88	0.92
					0.94	

栅压较高时，就很接近了。尽管BOXCAR可以更精确地测量电容瞬态值，但一般工厂不易具备这种条件，而用X-Y记录仪进行记录。由于它响应较慢，会造成一些误差，但在作总界面态测量时，这个误差会很小。因此，在工厂中用X-Y记录仪记录电容瞬态是完全可行的。

综上所述，由于我们采用高频电容电桥来测量电容瞬态，因此灵敏度高，响应快。特别是采取了把样品置于液氮温度后再注入的办法，用X-Y记录仪就可记录到电容瞬态，从而使测量设备大为简化，操作也简便了。这就使我们的方法特别适合于一般工艺监测中作总界面态的测量。对于界面态密度随能量分布的测量，由于禁带中心附近的界面态密度的计算是取自两个大量之差，因而误差较大。

对于体内深中心含量较多的单晶片，必须采取其它方法，以扣除体内深中心对界面态测

量的影响。关于这个问题，本文不在此作进一步的讨论。

在我们的工作中，曾与秦国刚、杜永昌等同志进行过许多有益的讨论，在此仅致谢意。

参 考 资 料

- 〔1〕 C.N.Berglund, *IEEE Trans. on Electron Devices.*, ED-13, P.701, 1966
- 〔2〕 L.M.Terman, *Solid State Electron.*, Vol. 5, P. 285, 1962
- 〔3〕 E.H.Nicolson and A.Goetzberger, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 46, P.1055, 1967
- 〔4〕 N.M.Johnson, *Proceedings of the International Topical Conference*, P. 421, 1978
- 〔5〕 K.L.Wang, *J. Appl. Phys.*, Vol.47, P. 4574, 1976
- 〔6〕 黄昆、谢希德著, *半导体物理学*(1958), P.46
- 〔7〕 杜永昌, *物理*, 10-2, P. 109, 1981

⑥高反压大功率晶体管烧结工艺的改革

徐 如 然

本文在分析了3DA58型高反压大功率晶体管，因采用金-锑($Au:Sb=99\%:1\%$)合金真空中烧结而造成“微等离子体击穿”之后，提出了一种采用“化学镀镍法”，在管芯背面淀积镍磷合金，同时使用锡-铅-银软焊料，把管芯烧焊在刻有槽或凹坑的F-2管座上，使管芯和

管座之间形成低阻欧姆接触的方法。本方法简化了工艺、降低了成本，同时有效地克服了由于台面沾污造成的表面击穿，改善了器件电性能，提高了烧结成品率，同时节省了黄金。
(约3600字，3图)