

## 第六章 金属-氧化物-半导体场效应晶体管

### 一、 简答题

#### 1、写出 MOSFET 器件的工作原理。

答：对于 MOSFET 器件，源极、衬底和漏极构成两个背靠背的二极管，如果不加栅极偏压，那么不论源极和漏极间的偏压如何，都只有很小的反向饱和电流通过。如果栅极相对半导体加上足够大的正电压，那么栅极下方半导体表面会反型，即：栅极下方半导体表面会变成 n 型薄层。这个 n 型薄层把 n 型源区和漏区连起来。这时，如果在漏极相对于源极加上正偏压，就会有较大的电流从漏极流入源极，这个电流称为漏极电流。n 型反型层称为导电沟道。导电沟道的电导受控于栅极偏压，这种现象称为场效应。可以看出：由于导电沟道的电导受控于栅极偏压，所以漏极电流的大小不仅受漏极电压的控制，也受栅极电压的调制，即 MOSFET 晶体管工作的基本原理。

或：

当漏极加上正电压  $V_D$ ，而栅极未加电压时，从源极到漏极相当于两个背靠背的 pn 结。当栅极加上足够大的正电压  $V_G$  时，半导体表面发生反型，在两个  $n^+$  区之间的 p 型半导体形成一个表面反型层（即导电沟道）。这个沟道的电导可以用改变栅电压来调制（场效应）。

给栅极加一正电压，使半导体表面反型。在漏极和源极之间加上漏极电压  $V_D$ ，电子通过沟道从源极流到漏极，相应的电流称为漏极电流  $I_D$ 。漏极电流使导电沟道上产生电压降，从漏端的  $V_D$  下降到源端的零电位。沟道上的电压降使 pn 结反偏，空间电荷区变宽。此外，对栅极偏压也起抑制作用，使导电沟道从  $0 \sim L$  逐渐变窄，沟道电导逐渐变小。 $V_D$  较小时，沟道变窄不明显，漏极电流  $I_D$  和漏极电压  $V_D$  成正比，沟道相当于一个电阻。即线性区，可用一条恒定电阻的直线来表示。

当漏极电压较大时，漏极电流  $I_D$  的增加变得缓慢。

当漏极电压继续增大，当  $V_G - V_D = V_{TH}$  时， $y=L$  处反型层宽度减小到零，这种现象称为沟道夹断。沟道夹断发生的地点叫夹断点，用 P 表示。沟道夹断首先发生在漏端附近。夹断时的漏极电压记为  $V_{Ds}$ 。夹断后，漏极电流基本上保持不变。当  $V_D > V_{Ds}$  时，夹断点左移到  $y=L$  处，夹断点的电压  $V_G - V(L)$  仍等于阈值电压，即导电沟道两端的电压保持不变。但 L 缩短到  $L'$ 。忽略沟道长度的变化（沟道长度调制效应），那么漏极电流将保持不变。称为饱和工作状态。饱和漏极电流用  $I_{Ds}$  表示。载流子在 P 点注入漏极耗尽区，被

反偏压的耗尽区电场漂移进入漏极。

**2、什么是沟道？什么是沟道电导？什么是阈值电压？写出理想 MOS 结构的阈值电压公式，并解释各项的意义。**

答：（1）在 MOS 晶体管的栅极上加一足够大的正电压，在栅极下面半导体表面就出现一层反型层，这层反型层在源极和漏极之间提供了一条导电通道，称为沟道。

（2）沟道电导是指反型层导电沟道的电导。

（3）阈值电压  $V_{TH}$  定义为形成强反型所需要最小栅电压。

（4）理想 MOS 结构的阈值电压公式：

$$V_{TH} = -\frac{Q_B}{C_o} + \phi_{Si}$$

阈值电压  $V_{TH}$  的第一项表示：在形成强反型时，要用一部分电压去支撑空间电荷  $Q_B$ ；

第二项表示：要用一部分电压为半导体表面提供达到强反型时所需要的表面势  $\phi_{Si}$ 。

**3、在二氧化硅、二氧化硅-硅界面系统中存在哪些类型的电荷？说明这些类型电荷的物理意义，以及如何去消除这些电荷？**

答：热平衡时，MOS 系统除功函数差之外，还受氧化层电荷和 Si-SiO<sub>2</sub> 界面陷阱的影响，这些陷阱和电荷的基本分类包括：界面陷阱电荷、氧化物固定电荷、氧化物陷阱电荷和可动离子电荷。

（1）界面陷阱电荷  $Q_{it}$ ：起因于 Si-SiO<sub>2</sub> 界面的性质，并取决于界面的化学成分。在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面上的陷阱，其能级位于硅禁带之内。界面态密度（即单位面积陷阱数）和晶面取向有关。在 <100> 面，界面态密度比 <111> 面的约少一个数量级。因此，对于硅 <100> 面， $Q_{it}$  很低。因此，为减少  $Q_{it}$  的影响，可选取 <100> 面的硅。

（2）氧化物固定电荷  $Q_f$ ： $Q_f$  位于 Si-SiO<sub>2</sub> 界面约 3 nm 的范围内，这些电荷是固定的，在表面势  $\phi_s$  大幅度变化时，它们不能充放电。 $Q_f$  通常是正的，并和氧化、退火条件以及 Si 的晶面取向有关，因为 <100> 面的  $Q_{it}$  和  $Q_f$  较低，故硅 MOSFET 一般多使用 <100> 晶面。

（3）氧化物陷阱电荷  $Q_{ot}$ ： $Q_{ot}$  和二氧化硅缺陷有关。例如，在受到 x 射线辐射或高能电子轰击时就可能产生这类电荷。这些陷阱分布在二氧化硅层内。这些电荷和工艺过程有关，大都可以通过低温退火消除。

（4）可动离子电荷  $Q_m$ ：对于诸如钠离子和其他碱金属离子，在高温和高压下工作时，它们能在氧化层内移动。半导体器件在高偏置电压和高温条件下工作时的可靠性问题可能和

微量的碱金属离子玷污有关。在高偏置电压和高温条件下，可动离子随着偏置条件的不同可以在氧化层内来回移动，引起 C-V 曲线沿电压轴移动。因此，在器件制造过程中，要特别注意可动离子玷污问题。

#### 4、写出实际的 MOS 的阈值电压公式，并说明每一项的物理意义。

答：实际的 MOS 阈值电压公式为：

$$V_{TH} = \phi'_{MS} - \frac{Q_o}{C_o} - \frac{Q_B}{C_o} + \varphi_{si}$$

第一项：为消除半导体和金属的功函数差的影响，在金属电极上相对于半导体所加的外加电压；

第二项：为了把绝缘层中正电荷发出的电力线全部吸引到金属电极一侧，即消除硅-二氧化硅界面陷阱和二氧化硅电荷的影响所需要加的外加电压；

第三项：当半导体表面开始出现强反型层时，半导体空间电荷区中的体电荷  $Q_B$  与金属电极的相应电荷在绝缘层上所产生的电压降，即支撑出现强反型层时所需体电荷  $Q_B$  所需要的外加电压；

第四项：开始出现强反型层时，半导体表面所需的表面势，也就是跨在空间电荷区上的电压降。

## 二、计算题

1、在受主浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的 p 型硅衬底上，理想的 MOS 电容具有  $0.1 \mu\text{m}$  厚度的氧化层，二氧化硅相对介电常数  $\epsilon_{r0} = 4$ ，计算下列条件下的电容值：(1)  $V_G = +2 \text{ V}$  和  $f = 1 \text{ Hz}$ ；(2)  $V_G = 20 \text{ V}$  和  $f = 1 \text{ Hz}$ ；(3)  $V_G = +20 \text{ V}$  和  $f = 1 \text{ MHz}$ 。(  $q = 1.6 \times 10^{-19}$ ，硅相对介电常数  $k = 11.9$ ， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/M}$ ， $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ， $V_T = 0.026 \text{ V}$ )

解：(1) 已知  $V_G = +2 \text{ V}$  和  $f = 1 \text{ Hz}$ ，由

$$V_{TH} = -\frac{Q_B}{C_o} + \varphi_{si}$$

$$C_o = \frac{\epsilon_o}{x_o} = \frac{\epsilon_{r0}\epsilon_0}{x_o} = \frac{4 \times 8.85 \times 10^{-14}}{0.1 \times 10^{-4}} = 3.54 \times 10^{-8} \text{ (F/cm}^{-2}\text{)}$$

$$\varphi_{si} = 2\phi_f = 2V_T \ln \frac{N_a}{n_i} = 2 \times 0.026 \ln \frac{10^{16}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.70 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} Q_B &= -qN_a x_{dm} = -\sqrt{2k\epsilon_0 q N_a \varphi_{si}} = -\sqrt{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16} \times 0.7} \\ &= -4.86 \times 10^{-8} \text{ (C/cm}^{-2}\text{)} \end{aligned}$$

$$V_{TH} = -\frac{Q_B}{C_o} + \varphi_{si} = \frac{4.86 \times 10^{-8}}{3.54 \times 10^{-8}} + 0.70 = 2.07 V$$

因为  $V_G < V_{TH}$ , 所以:

$$C = \frac{C_o C_s}{C_o + C_s} = \frac{C_o}{\left(1 + \frac{2C_o^2 V_G}{qN_a k \varepsilon_0}\right)^{1/2}} = \frac{3.54 \times 10^{-8}}{\left[1 + \frac{2 \times (3.54 \times 10^{-8})^2 \times 2}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16} \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14}}\right]^{1/2}} \\ = 1.78 \times 10^{-8} (F/cm^{-2})$$

(2) 已知  $V_G = +2 V$  和  $f = 1 Hz$ , 因为  $V_G > V_{TH}$ , 低频, 所以:

$$C = C_o = 3.54 \times 10^{-8} (F/cm^{-2})$$

(3) 已知  $V_G = +20 V$  和  $f = 1 MHz$ , 因为  $V_G > V_{TH}$ , 高频, 总电容为  $C_o$  与  $C_s$  串联, 所以:

$$C_s = C_{smin} = \frac{\varepsilon_s}{x_{dm}} = \frac{k \varepsilon_0}{\sqrt{\frac{2k \varepsilon_0 \varphi_{si}}{qN_a}}} = \sqrt{\frac{k \varepsilon_0 q N_a}{2 \varphi_{si}}} = \sqrt{\frac{11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16}}{2 \times 0.7}} \\ = 3.47 \times 10^{-8} (F/cm^{-2})$$

故:

$$C = \frac{C_o C_s}{C_o + C_s} = \frac{3.54 \times 10^{-8} \times 3.47 \times 10^{-8}}{3.54 \times 10^{-8} + 3.47 \times 10^{-8}} = 1.75 \times 10^{-8} (F/cm^{-2})$$

2、在  $n_a = 10^{15} cm^{-3}$  的 p 型<111>硅衬底上制成一铝栅 MOS 晶体管。栅极氧化层厚度为 120 nm, 在氧化硅-硅界面的表面电荷密度为  $3 \times 10^{11} cm^{-2}$ 。计算阈值电压。(  $q = 1.6 \times 10^{-19}$ , 二氧化硅相对介电常数  $\varepsilon_{r0} = 4$ , 硅相对介电常数  $k = 11.9$ ,  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} F/M$ ,  $n_i = 1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$ ,  $V_T = 0.026 V$ ,  $E_g = 1.1 eV$ )

解: 由于:

$$\phi_f = V_T \ln \frac{N_a}{n_i} = 0.026 \ln \frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.289 V$$

$$\varphi_{si} = 2\phi_f = 2 \times 0.289 = 0.578 V$$

$$x_{dm} = \sqrt{\frac{2k \varepsilon_0 \varphi_{si}}{qN_a}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.578}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15}}} = 8.72 \times 10^{-5} (cm)$$

$$Q_B = -qN_a x_{dm} = -1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \times 8.72 \times 10^{-5} = -1.40 \times 10^{-8} (F/cm^{-2})$$

$$C_o = \frac{\varepsilon_o}{x_o} = \frac{\varepsilon_{r0} \varepsilon_0}{x_o} = \frac{4 \times 8.85 \times 10^{-14}}{120 \times 10^{-7}} = 2.95 \times 10^{-8} (F/cm^{-2})$$

$$\phi'_{ms} = \phi'_m - \phi'_s = \phi'_m - \left(\chi' + \frac{E_g}{2} + \phi_f\right) = 3.2 - \left(3.25 + \frac{1.1}{2} + 0.289\right) = 0.889 V$$

则阈值电压为:

$$\begin{aligned}
 V_{TH} &= \phi'_{ms} + \varphi_{si} - \frac{Q_B}{C_o} - \frac{Q_o}{C_o} = -0.889 + 0.578 - \frac{-1.40 \times 10^{-8}}{2.95 \times 10^{-8}} - \frac{3 \times 10^{11} \times 1.6 \times 10^{-19}}{2.95 \times 10^{-8}} \\
 &= -1.46 \text{ V}
 \end{aligned}$$