

半导体表面与MIS结构

复旦大学 微电子学系

13307130163

李琛

June 18, 2015

Contents

1	半导体表面态	3
1.1	理想表面	3
1.2	实际表面	3
2	表面电场效应	3
2.1	空间电荷层	3
2.2	表面静电特性	5
2.3	表面层的五种基本状态	5
2.3.1	积累	5
2.3.2	平带	6
2.3.3	耗尽	6
2.3.4	弱反型	6
2.3.5	强反型	6

3 MIS结构C-V特性 7

3.1 理想MIS结构C-V特性 7

3.1.1 积累 7

3.1.2 平带 7

3.1.3 耗尽 7

3.1.4 强反型 8

3.2 实际MIS结构C-V特性 8

4 Si – SiO₂系统性质 8

1 半导体表面态

1.1 理想表面

理想表面的薛定谔方程有两组解，一组对应无限周期场，一组对应表面态

$$\varphi_1(x) = A \exp \left\{ \frac{[2m_0(v_0 - E)]^{1/2}}{\hbar} x \right\} \quad (x \leq 0)$$

波函数在表面指数衰减，说明电子主要分布在表面附近

每个表面原子对应禁带中一个表面能级，这些能级组成表面能带

悬挂键 在表面的最外层的硅原子有一个未配对的电子,与之对应的就是表面态。

1.2 实际表面

- **清洁表面** 超高真空下解理，有重构现象.
- **真实表面** 天然氧化层,界面态 $10^{10} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$
空态下施主型俘获电子后呈电中性，受主型俘获电子后呈负电荷态
- **界面**
 - 不同导电类型 Si pn结（同质结）
 - 不同半导体 异质结
 - 金属-半导体 肖特基接触、欧姆接触
 - M - O - S MOSFET
 - 晶粒间界 多晶结构

2 表面电场效应

2.1 空间电荷层

MIS结构实际上就是电容， $Q_m = -Q_s$ ，但半导体中自由载流子浓度低得多，对应 Q_s 的电荷量需要分布在一定厚度的表面层内，这个带电的表面层即为空间电荷层

表面势 V_s 空间电荷层两端的电势差，表面比内部高为正

电势沿电力线方向减小，而能带为电势乘以 $-q$

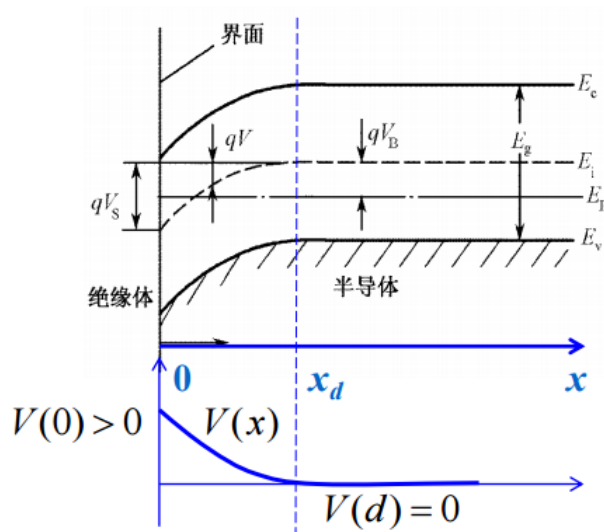


Figure 1: 表面势与能带的关系

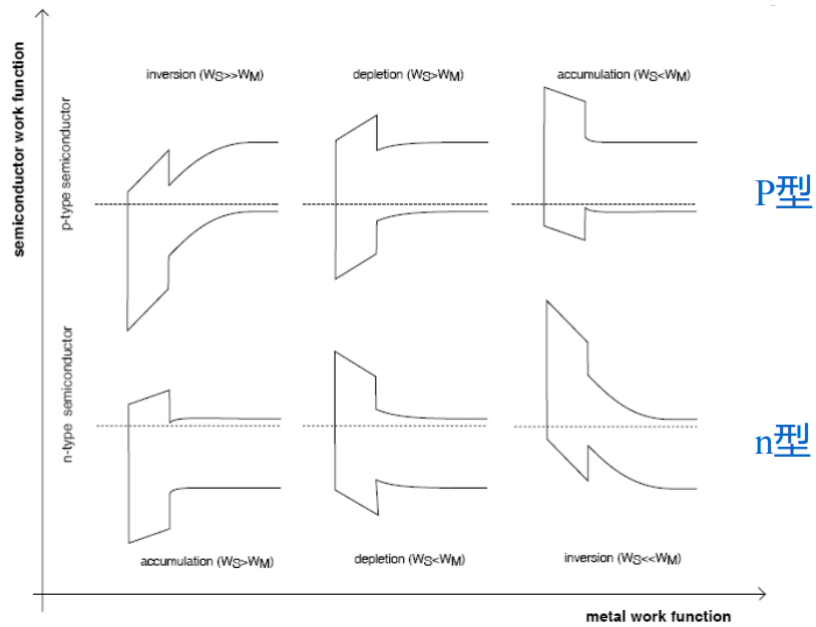


Figure 2: 可能的热平衡MIS结构的能带图

利用泊松方程与玻尔兹曼统计，可以解出电容
一维情况下的P型半导体

$$\begin{cases} \frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \\ n_p = n_{p0} \exp(qV/k_B T), p_p = p_{p0} \exp(qV/k_B T) \end{cases}$$

$$\text{解得 } E(x) = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\frac{qV(x)}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$$

$$F\left(\frac{qV(x)}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) + \frac{qV}{kT} - 1 \right] + \frac{n_{n0}}{p_{p0}} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - \frac{qV}{kT} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

$$\text{德拜长度 } L_D = \left(\frac{2\varepsilon_s k_B T}{q^2 p_{p0}} \right)^{1/2}$$

$$C_s = \left| \frac{dQ_s}{dV_s} \right| = \frac{\varepsilon_s}{L_D} \frac{\left[-\exp\left(-\frac{qV_s}{kT}\right) + 1 \right] + \frac{n_{n0}}{p_{p0}} \left[\exp\left(\frac{qV_s}{kT}\right) - 1 \right]}{F\left(\frac{qV(x)}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)}$$

2.2 表面静电特性

$$E_s = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\frac{qV_s}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$$

$$Q_s = -\varepsilon_s E_s = \mp \frac{2\varepsilon_s kT}{qL_D} F\left(\frac{qV(x)}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$$

2.3 表面层的五种基本状态

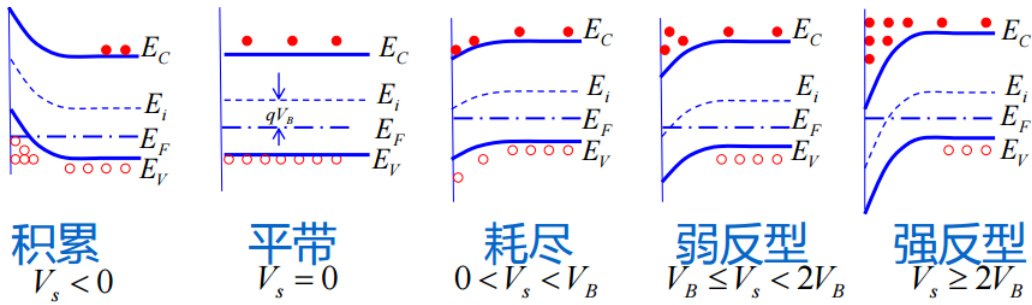


Figure 3: 表面层的五种基本状态

$$Q_s \propto E_s \propto F\left(\frac{qV(x)}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) + \frac{qV}{kT} - 1 \right] + \frac{n_{n0}}{p_{p0}} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - \frac{qV}{kT} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

2.3.1 积累

$$Q \propto \exp\left(-\frac{qV_s}{2kT}\right)$$

2.3.2 平带

$$Q = 0, C_{FBS} = \lim_{V_s \rightarrow 0} \frac{dQ_s}{dV_s} = \frac{\sqrt{2}\epsilon_s}{L_D} \left(1 + \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)^{1/2} \approx \frac{\sqrt{2}\epsilon_s}{L_D}$$

2.3.3 耗尽

也可用耗尽层近似求解

$$F\left(\frac{qV(x)}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left(\frac{qV_s}{kT}\right)^{1/2} \Rightarrow Q_s = -\frac{2\epsilon_s kT}{qL_D} \left(\frac{qV_s}{kT}\right)^{1/2}$$

2.3.4 弱反型

$$Q_s = -\frac{2\epsilon_s kT}{qL_D} \left(\frac{qV_s}{kT}\right)^{1/2}$$

2.3.5 强反型

$$Q_s \propto \exp\left(\frac{qV_s}{2kT}\right)$$

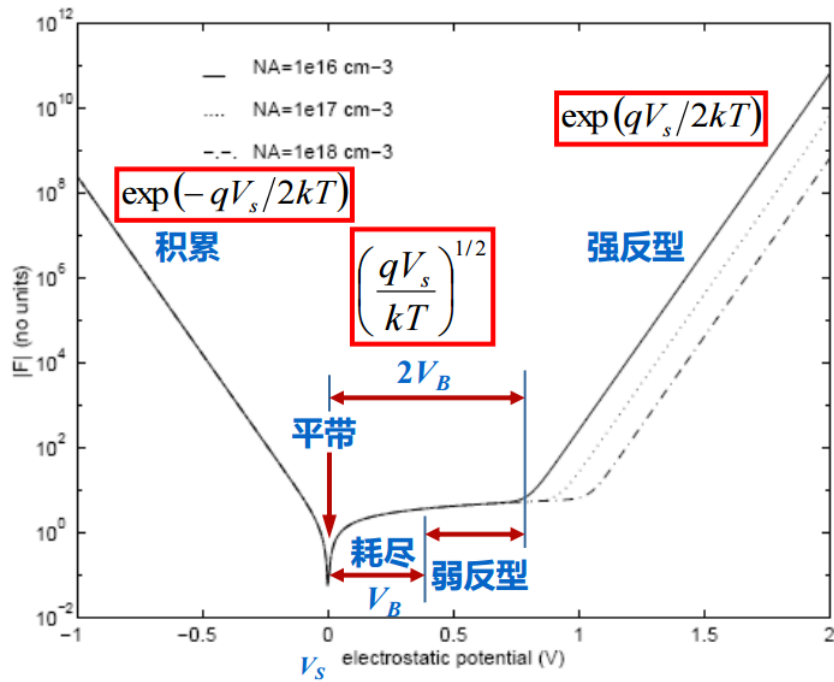


Figure 4: F函数与电势的关系

3 MIS结构C-V特性

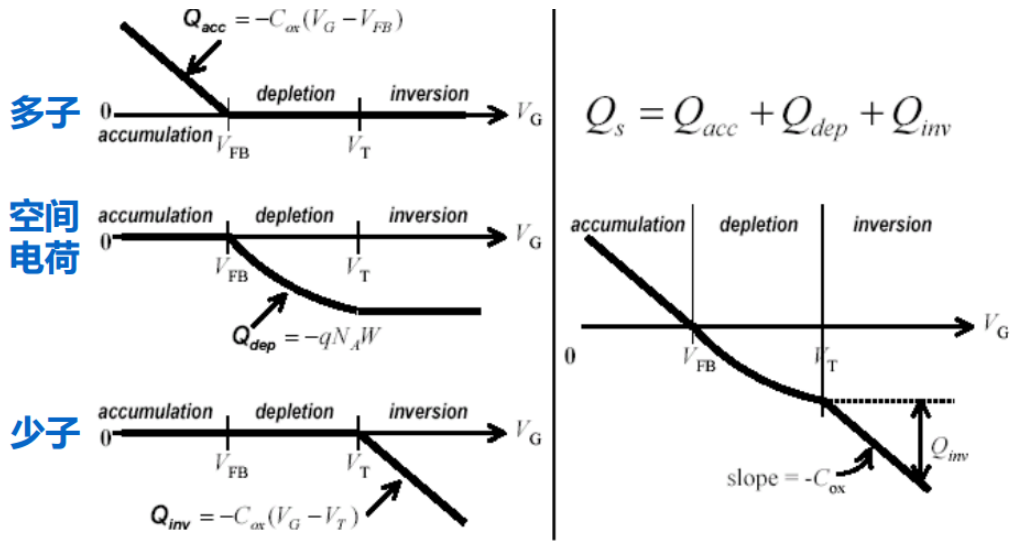


Figure 5: 电荷随 V_G 的变化

3.1 理想MIS结构C-V特性

理想条件 假设在绝缘层中和绝缘层与半导体的界面不存在电荷，也不存在界面态，并且栅电压 $V=0$ 时半导体中不存在电场，能带是平直的。

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s}, C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} \text{ 为氧化层电荷，是常数}$$

3.1.1 积累

$$C_s = \frac{\epsilon_s}{L_D} \exp\left(-\frac{qV_s}{2k_B T}\right) \gg C_{ox} \Rightarrow C = C_{ox}$$

3.1.2 平带

$$C_{FBS} \approx \frac{\sqrt{2}\epsilon_s}{L_D} \Rightarrow C = \frac{C_{ox}}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} \left(\frac{k_B T}{q^2 N_A \epsilon_s}\right)^{1/2}}$$

3.1.3 耗尽

$$C_s \approx \frac{\epsilon_s}{L_D} \sqrt{\frac{k_B T}{qV_s}} = \sqrt{\frac{qN_A \epsilon_s}{2V_s}} \Rightarrow C \approx \frac{C_{ox}}{1 + \sqrt{\frac{2C_{ox}^2}{q\epsilon_s N_A} (V_G - V_{FB})}}$$

3.1.4 强反型

$$C_s \approx \frac{\varepsilon_s}{L_D} \sqrt{\frac{n_{p0}}{p_{p0}}} \exp\left(\frac{qV_s}{2k_B T}\right) \gg C_{ox} \Rightarrow C = C_{ox}$$

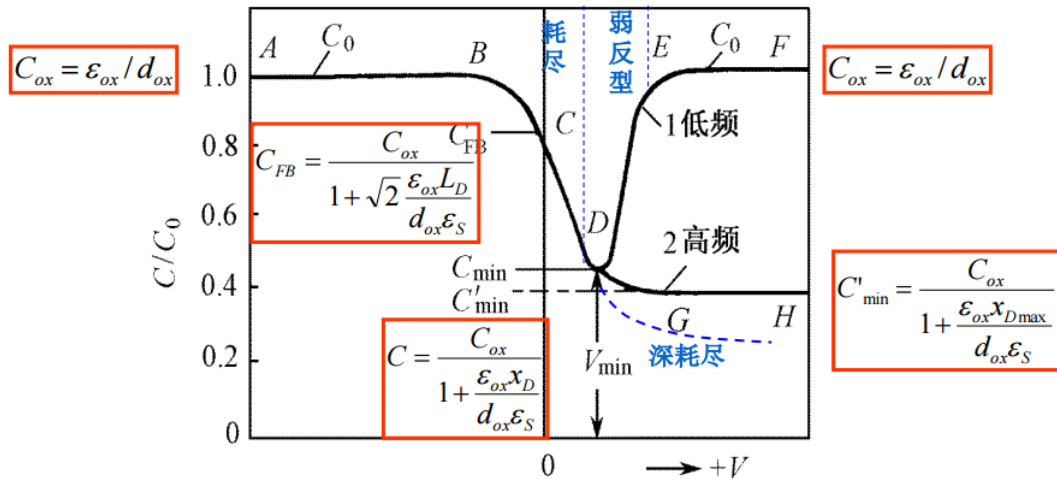


Figure 6: 理想MIS C-V特性

3.2 实际MIS结构C-V特性

- **功函数的影响** 将图像向右平移 V_{ms}
- **平带电压的影响** 将图像向右平移 V_{FB}
- **界面态的影响** 绝缘层和半导体界面处的电子能级称为界面态。能级处于禁带之中，是一个连续分布的界面态。

$N_{ss}(E)$ 为界面态密度的分布函数。

界面态电容与表面电容是并联的

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{\theta x}} + \frac{1}{C_S + C_{Nss}}, C_{Nss} = q^2 N_{ss}(E)$$

4 $Si-SiO_2$ 系统性质

- 界面陷阱电荷（快界面态） Q_{it}
- 氧化层中可动电荷 Q_m
- 氧化层中固定电荷 Q_f
- 氧化层中陷阱电荷 Q_{ot}