

若PN结，一边为均匀掺杂，另外一边为线性缓变掺杂，怎么办呢？

现有一硅PN结，N区一侧为均匀掺杂，杂质浓度为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，P区一侧为线性缓变区，杂质浓度梯度 α 为 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-4}$ 。假设P区一侧足够厚，而N区一侧的厚度为 $10 \mu\text{m}$ ，在N、P区外侧有重掺的 N^+ 区和 P^+ 区以制作低接触电阻的金半欧姆接触，并且已知硅材料的最大电场 $E_{\text{max}} = 3.2 \times 10^5 \text{V/cm}$ ，介电常数 ϵ_{si} 为 $1.0 \times 10^{-12} \text{F/cm}$ 。试求（基于耗尽近似，不考虑内建电势 V_{bi} ，不考虑中性区压降）：

- (1) 击穿时N区耗尽区内的电场强度分布函数； $E_n(x) = 1.6(x - 20)$
- (2) 击穿时P区耗尽区内的电场强度分布函数； $E_n(x) = 0.32(x^2 - 100)$
- (3) 求此PN结的击穿电压；
- (4) 求当P区厚度和N区厚度均为 $5 \mu\text{m}$ 时击穿电压。

- **练习题2:** 在硅中当最大电场接近 10^6V/cm 时发生击穿。假设在P侧 $N_A=10^{20}\text{cm}^{-3}$, 为要得到2V的击穿电压, 采用单边突变近似, 求N侧的施主浓度。
- **练习题3:** 用二极管恢复法测量P+N二极管空穴寿命。对于 $I_f=1\text{mA}$ 和 $I_r=2\text{mA}$, 在具有0.1ns下降时间的示波器上测定 $t_s=3\text{ns}$, 求 τ_p

在某偏置于放大区的NPN晶体管中，从发射区注入基区的电子电流为 2mA ，从基区注入发射区的空穴电流为 $15\mu\text{A}$ ，基区中的复合电流为 $10\mu\text{A}$ 。试求该晶体管的发射结注入效率、基区输运系数、共基极电流放大系数和共发射极电流放大系数。

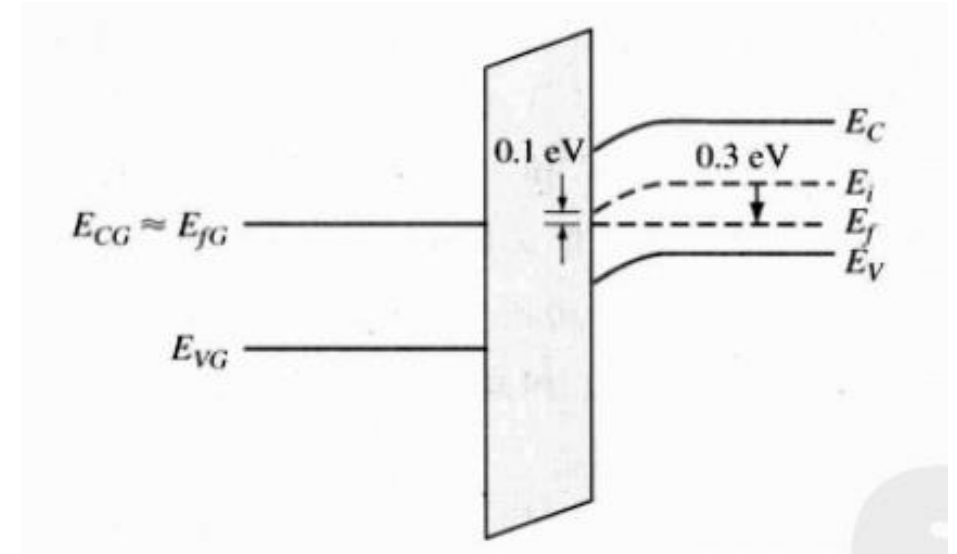
一个均匀掺杂的NPN型硅双极管， $W_B=1.0\mu\text{m}$ ， $W_C=20.0\mu\text{m}$ 。晶体管掺杂浓度为 $N_B=2.5\times 10^{16}/\text{cm}^3$ ， $N_C=1.0\times 10^{15}/\text{cm}^3$ ，硅材料的雪崩击穿临界电场强度 $E_C=3.2\times 10^5\text{V}/\text{cm}$ ， $\epsilon_{\text{si}}=1.0\times 10^{-12}\text{F}/\text{cm}$ 。试计算：

- 1、该双极管的 BV_{CBO} ；
- 2、基区厚度不变，集电区厚度变为 $10\mu\text{m}$ 时的 BV_{CBO} ；
- 3、集电区厚度不变，基区厚度变为 $0.4\mu\text{m}$ 时的 V_{pt}

答案：1、332.8V 2、252.8V 3、83.2V

如右下图所示为一零偏压时MOS晶体管的能带图，假设外加电压的1/2降在栅介质层上，1/2降在半导体上。试回答 ($n_i=1\times 10^{10}/\text{cm}^3$)：

- 1、这是NMOS管还是PMOS管？
- 2、这是增强型FET还是耗尽型FET？为什么？
- 3、求平带电压 V_{FB} ；
- 4、求本征电压 V_i （即此时半导体表层的电子浓度=空穴浓度=本征载流子浓度 n_i ）；
- 5、求阈值电压 V_T ；
- 6、求衬底浓度 N 。



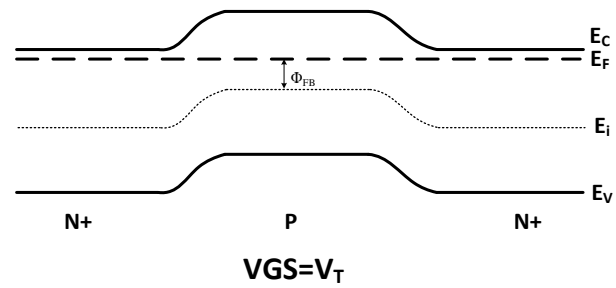
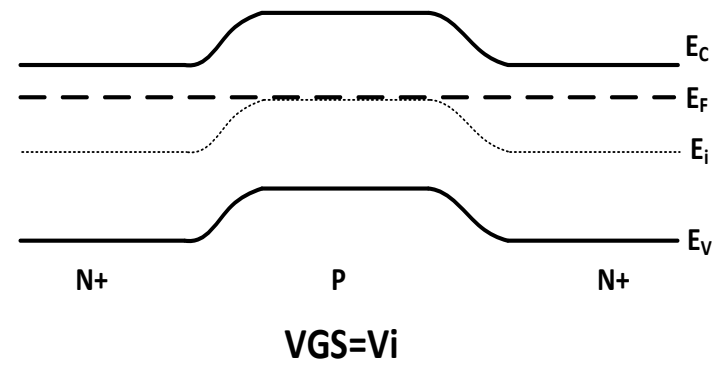
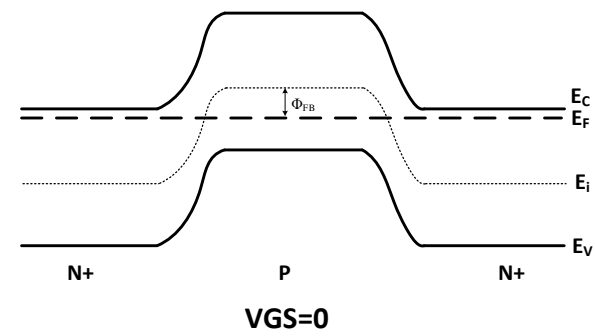
解答：

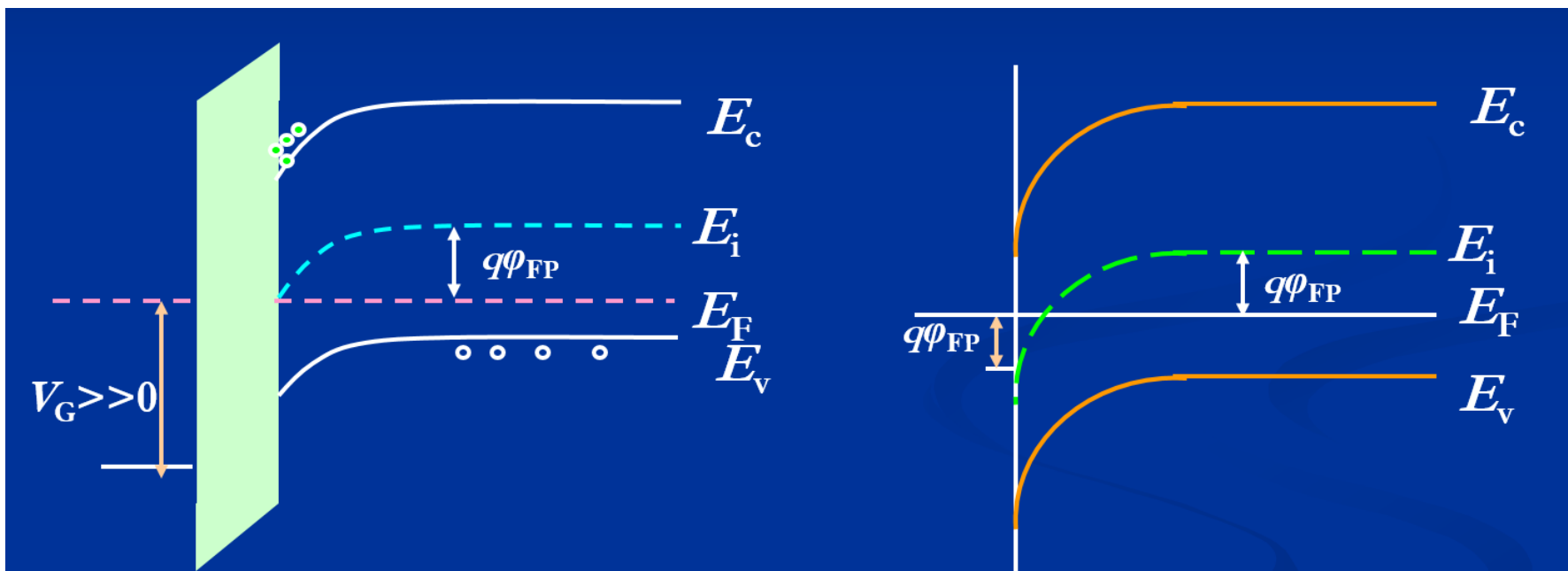
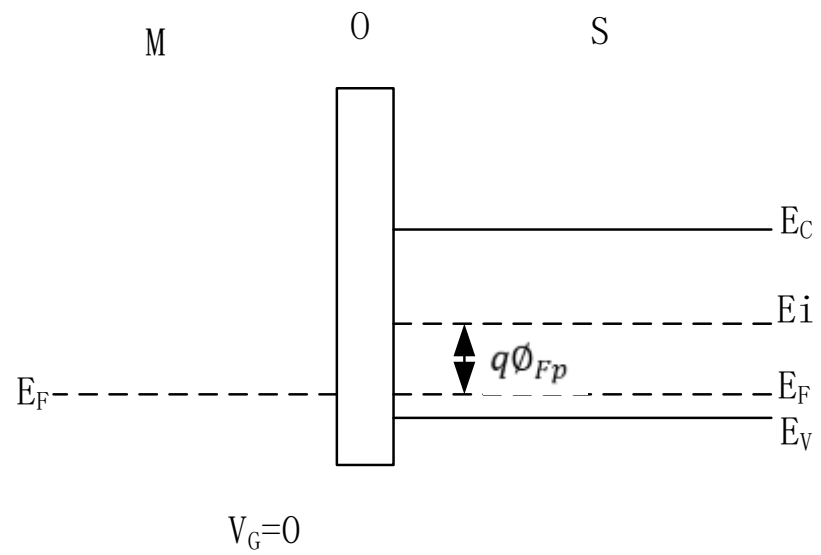
- 1、这是NMOS管。因为衬底为P型（根据费米能级位置或衬底费米势 > 0 ）
- 2、这是增强型FET。因为外加栅压等于0时还没达到强反型
- 3、平带电压 V_{FB} 即为让半导体表面能带水平的电压，此时需要在半导体表面有压降 $(0.3-0.1) \text{ eV}/-e=-0.2\text{V}$ ，所以平带电压 $V_{FB}=-0.2\times 2=-0.4\text{V}$
- 4、本征电压 V_i 即为让半导体表面的本征费米能级 $E_i=E_F$ 的外加栅压，此时需要能带往下继续弯曲 0.1eV ，因此需要半导体表面有额外压降 $-0.1\text{eV}/-e=0.1\text{V}$ ，所以本征电压 $V_i=0.1\times 2=0.2\text{V}$
- 5、阈值电压 V_T 即为让半导体表面的本征费米能级 E_i 比 E_F 还要低1个衬底费米势的外加栅压，此时需要能带往下继续弯曲 $(0.1+0.3)=0.4\text{eV}$ ，因此需要半导体表面有额外压降 $-0.4\text{eV}/-e=0.4\text{V}$ ，所以阈值电压 $V_T=0.4\times 2=0.8\text{V}$
- 6、衬底费米势 $=0.3\text{eV}$ ，所以衬底浓度 $N=n_i \times e^{(0.3/0.026)} \approx 1 \times 10^{15}/\text{cm}^3$

设 $V_{FB} = 0$, $V_{DS} = 0$, $V_{BS} = 0$, 请分别画出n沟道MOSFET在 $V_{GS} = 0$ 、
 $V_{GS} = V_i$ 、 $V_{GS} = V_T$ 的情况下,

- (1) 沿源区-沟道区-漏区方向 (N^+ 区- P区- N^+ 区) 的能带图;
- (2) 沿金属栅电极-栅介质-沟道 (M-O-S) 方向的能带图。

解答：





一个多晶硅栅n沟道MOSFET，衬底掺杂浓度 $N_A=1.0\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ，多晶硅栅掺杂浓度 $N_D=1.0\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ， $t_{\text{ox}}=6\text{nm}$ ，栅氧化层内的电荷面密度 $Q_{\text{ox}}=0$ 。硅和多晶硅的电子亲和势 χ 相等且禁带宽度相等（ $E_g=1.12\text{eV}$ ）， $n_i=1\times 10^{10}/\text{cm}^3$ ， $\epsilon_s(\text{Si})=1.0\times 10^{-12}\text{ F/cm}$ ， $\epsilon_{\text{ox}}(\text{SiO}_2)=3.453\times 10^{-13}\text{ F/cm}$ 。

- (1) 计算多晶硅栅-半导体功函数差 $q\phi_{\text{MS}}$;
- (2) 当 $V_{\text{BS}}=0\text{V}$ ，计算该MOSFET的阈电压 V_{T} ;
- (3) 当 $V_{\text{GS}}=1\text{V}$ ， $V_{\text{DS}}=1\text{V}$ ， $Z/L=1$ ， $\mu_n=300\text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，计算该MOSFET管的漏极电流 I_{D} 。

$$(1) \text{ 衬底费米势 } \Phi_{Fp} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.026 \times 7 \times \ln 10 = 0.4191V$$

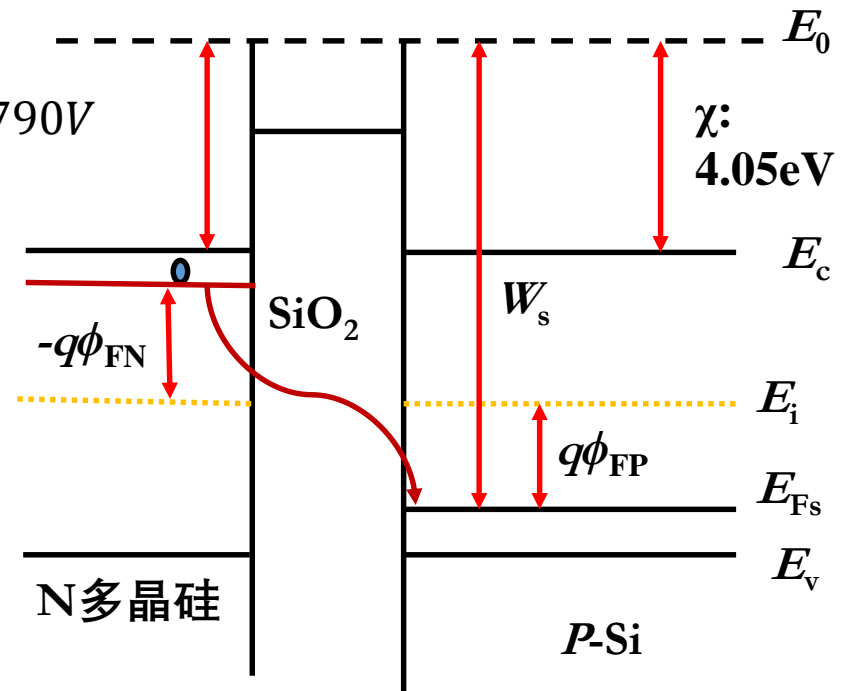
$$\text{多晶硅栅费米势 } \Phi_{Fn} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = -0.026 \times 8 \times \ln 10 = -0.4790V$$

$$\therefore \text{对多晶硅栅而言, } E_F - E_i = q|\Phi_{Fn}| = 0.4790eV$$

$$q\Phi_{MS} = q(\Phi_M - \Phi_S)$$

$$= \chi + \left(\frac{E_g}{2} - (E_F - E_i) \right) - \left[\chi + \frac{E_g}{2} + q\Phi_{Fp} \right]$$

$$= -\frac{(E_F - E_i)}{q} - \Phi_{Fp} = -0.4790 - 0.4191 = -0.8981eV$$



$$(2) C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} = \frac{3.453 \times 10^{-13} F/cm^2}{6 \times 10^{-7} cm} = 5.755 \times 10^{-7} F/cm^2$$

$$K = \frac{(2q\epsilon_s N_A)^{\frac{1}{2}}}{C_{ox}} = \frac{(2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-12} \times 10^{17})^{\frac{1}{2}}}{5.755 \times 10^{-7}} = 0.3108$$

$$V_T = \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + K(2\Phi_{FB})^{1/2} + 2\Phi_{FB} = -0.8981 - 0 + 0.3108 \times (0.4191 \times 2)^{\frac{1}{2}} + 2 \times 0.4191 = 0.2246V$$

$$(3) V_{Dsat} = V_{GS} - V_T = 1 - 0.2246 = 0.7754V$$

$V_{DS} = 1V > V_{Dsat} = 0.7754V$, 所以MOSFET工作在饱和区

$$I_D = I_{Dsat} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} \times \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 300 \times 5.755 \times 10^{-7} \times 0.7754^2 = 5.19 \times 10^{-5} A$$