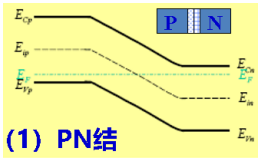
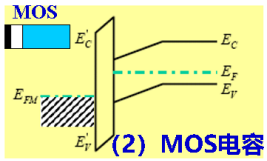
三：P-N结

Monday, March 2, 2020 12:42

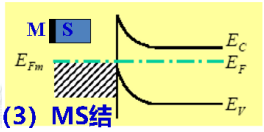
1. 预习作业：
    a. 引言：
        i. 什么是P-N结？
            1) 由P型半导体和N型半导体形成的冶金学接触(原子级接触)；
            2) P-N结时除金属-半导体接触器件外几乎所有半导体器件的基本单元；
        ii. 有哪几种类型的结？
            1) 同质结：同种物质构成；
            2) 异质结：不同种物质构成；
            3) 同型结：同种导电类型的物质构成；
            4) 异质结：不同种导电类型的物质构成；
            5) 金半结：金属-半导体接触或金属-半导体结(M-S结)；
        iii. 半导体器件有哪些主要的基本结构单元？
            1) $P-N$结；



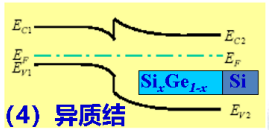
            2) MOS电容；



            3) M-S结；



            4) 异质结；



        iv. 制备半导体器件的平面工艺主要包括哪些工艺技术？
            1) 离子注入工艺；

                杂质元素的原子离化变成带电的杂质离子，在强电场下加速，获得较高的能量($10^4 \sim 10^6 eV$)后直接轰击到半导体基片(靶片)中，再经过退火使杂质激活，在半导体片中形成一定的杂质分布；

                a) 离子注入技术的特点：
                    i) 低温；
                    ii) 可精确控制浓度和结深；
                    iii) 可选出一种元素注入，避免混入其他杂质；
                    iv) 可在加大面积上形成薄而均匀的掺杂层；
                    v) 控制离子束扫描的区域，可实现选择注入，不需要掩膜技术；
                    vi) 设备昂贵；
            2) 扩散工艺；
                a) 常用的扩散工艺：
                    i) 固态源扩散；

ii) 液态源扩散；

iii) 气态源扩散；

3) 外延工艺；

在单晶衬底上沿晶体原来晶向向外延伸生长一层薄膜单晶层；

i) 外延工艺类型：

同质外延：在一种单晶材料上生长同种单晶材料；

异质外延：在一种单晶材料上生长另一种单晶材料薄膜；

ii) 外延工艺的特点：

可以方便地形成不同导电类型，不同杂质浓度，杂质分布陡峭的外延层；

iii) 外延技术的分类：

气相外延(PVD，CVD)、液相外延(LPE)、分子束外延(MBE)、热壁外延(WHE)、原子层外延等；

4) 光刻工艺；

利用光刻胶(由光敏化合物、树脂和有机溶剂组成的高分子有机化合物)在紫外光照射下会发生改性的特点，将掩模版上的图形转移到基片上；

a) 光刻工艺的基本原理：

i) 紫外光通过掩模版照射到附有一层光刻胶的基片表面，曝光区域的光刻胶发生光化学反应；

ii) 通过显影技术溶解去除曝光区域或未曝光区域的光刻胶(前者称正性胶，后者称负性胶)，使掩模版上的图形被复制到光刻胶薄膜上；

iii) 最后利用蚀刻技术将图形转移到基片上；

b) 光刻作用的用途：

实现选择掺杂、电极图案和电极布线、表面钝化；

5) 真空镀膜技术；

6) 氧化工艺；

硅表面的二氧化硅层有阻值杂质向硅内扩散的作用；

a) 二氧化硅薄膜的作用：

i) 对杂质扩散的掩蔽作用；

ii) 作为MOS器件的绝缘栅材料；

iii) 器件表面的钝化作用；

iv) 集成电路中的隔离介质和绝缘介质；

v) 集成电路中电容器元件的绝缘介质；

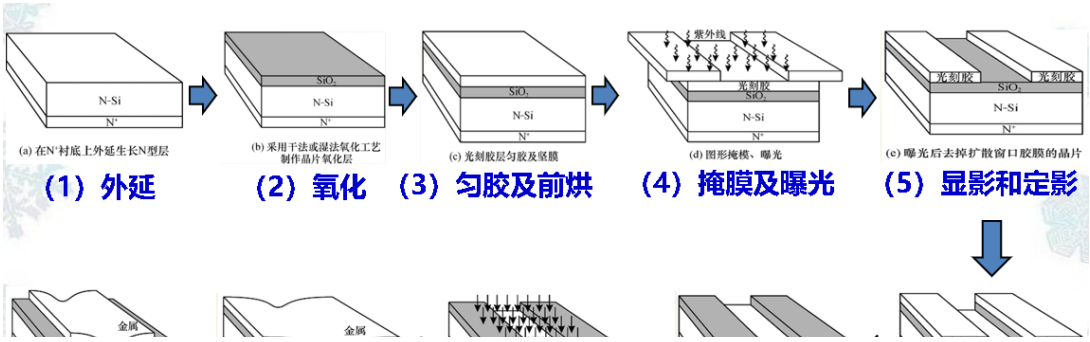
b) 硅表面二氧化硅薄膜的生长方法：

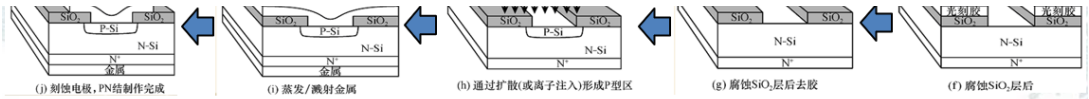
i) 热氧化；

ii) 化学气相沉积(CVD)；

7) 测试和封装工艺等；

v. 简述利用扩散技术制作PN结的基本工艺流程；





vi. 什么是突变结?

载流子浓度从P区到N区急剧变化的结;

$$N(x) = N_a - N_d \approx \begin{cases} N_a, (x \le x_j) \\ N_d, (x \ge x_j) \end{cases}$$

vii. 什么是线性缓变结?

杂志分布可用处的切线近似表示的缓变结(杂质浓度从P区到N区使逐渐变化的);

$$N(x) = N_a - N_d = -a(x - x_j)$$

viii. 写出突变结的杂质分布表达式;

$$N(x) = N_a - N_d \approx \begin{cases} N_a, (x \le x_j) \\ N_d, (x \ge x_j) \end{cases}$$

ix. 写出线性缓变结的杂质分布表达式;

$$N(x) = N_a - N_d = -a(x - x_j)$$

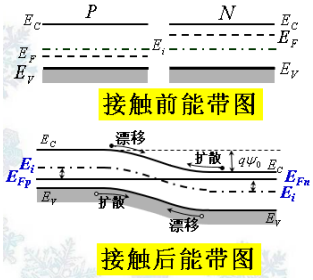
x. 简述$Al - Si$合金结的工艺过程;

1) 将铝粒放在一块N型单晶硅片上，加热到一定温度，形成铝硅的熔融体;
2) 然后降低温度，熔融体开始凝固，在N型硅片上形成含有高浓度铝的P型硅薄层;
3) P型薄层和N型硅衬底的交界面即为P-N结(也称之为铝-硅合金结);

xi. 简述正性光刻胶和负性光刻胶的区别;

1) 通过显影技术溶解去除曝光区域或未曝光区域的光刻胶(前者称正性胶，后者称负性胶)
2) 正性光刻胶：显影后曝光区域被溶解的光刻胶;
3) 负性光刻胶：显影后未曝光区域被溶解的光刻胶;

b. 热平衡(无偏压)P-N结:



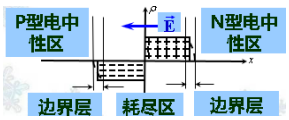
i. 既然P-N结存在内建电势差，能够利用万用表或电压表直接测量内建电势差的大小吗？为什么?

不能;

原因:

接触后体系处于热平衡状态，漂移电流与扩散电流相互抵消，对外不显电性;

ii. P-N结空间电荷区内的电荷分布是什么样子的?



iii. P-N结空间电荷区内电场分布是均匀的吗?

不是;

麦克斯韦方程组第一个方程:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

一维情况下:

$$\nabla \cdot E = \frac{dE}{dx}$$

得：

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

解得：

$$E = \frac{\rho}{\varepsilon}x + C$$

1. 对于突变结：

空间电荷区电荷密度：

$$\rho = \begin{cases} -eN_a, (-x_p \le x \le 0) \\ eN_d, (0 \le x \le x_n) \end{cases}$$

得：

$$E = \begin{cases} -\frac{eN_a}{\varepsilon}x + C_p, (-x_p \le x \le 0) \\ \frac{eN_d}{\varepsilon}x + C_n, (0 \le x \le x_n) \end{cases}$$

边界条件：认为空间电荷区之外没电场

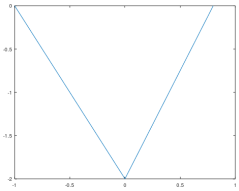
$$\begin{cases} E(x_n) = 0 \\ E(-x_p) = 0 \end{cases}$$ (电场强度的绝对值在交界面最大)

解得：

$$\begin{cases} C_n = -\frac{eN_d}{\varepsilon}x_n, (0 \le x \le x_n) \\ C_p = -\frac{eN_a}{\varepsilon}x_p, (-x_p \le x \le 0) \end{cases}$$

代入得：

$$E = \begin{cases} -\frac{eN_a}{\varepsilon}(x + x_p), (-x_p \le x \le 0) \\ \frac{eN_d}{\varepsilon}(x - x_n), (0 \le x \le x_n) \end{cases}$$



iv. P-N结电中性区内的电场分布应该如何？

无电场分布；

v. P-N结电中性区内的电势分布应该如何？

电中性区相当于良导体(等势体)，电势分别相等；

vi. 怎样求空间电荷区内的电场和电势分布呢？

1) 费米能级法：

空间电荷区电场为：

$$E_0 = (E_i - E_{Fp}) + (E_{Fn} - E_i)$$

由：

$$\begin{cases} p_0 = n_i \cdot \exp\frac{E_i - E_{Fp}}{kT} \\ n_0 = n_i \cdot \exp\frac{E_{Fn} - E_i}{kT} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_i - E_{Fp} = kT\ln\frac{p_0}{n_i} = kT\ln\frac{N_a}{n_i} \\ E_{Fn} - E_i = kT\ln\frac{n_0}{n_i} = kT\ln\frac{N_d}{n_i} \end{cases}$$

联立解得：

$$E_0 = kT\ln\frac{N_aN_d}{n_i^2}$$

静电势为：

$$E_0 = q\psi_0$$

热电势为：

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

将热电势和静电势表达式代入解中得：

$$\psi_0 = V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

2) 静电势法：

由：

$$\begin{cases} n = N_d = n_i \exp \dfrac{E_{Fn} - E_i}{kT} \\ p = N_a = n_i \exp \dfrac{E_i - E_{Fp}}{kT} \end{cases}$$

静电势为：

$$\psi = \frac{E_F - E_i}{V_T}$$

带入得：

$$\begin{cases} n = N_d = n_i \exp \dfrac{\psi_n}{V_T} \\ p = N_a = n_i \exp -\dfrac{\psi_p}{V_T} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \psi_n = V_T \ln \dfrac{n}{n_i} = V_T \ln \dfrac{N_d}{n_i} \\ \psi_p = -V_T \ln \dfrac{p}{n_i} = -V_T \ln \dfrac{N_a}{n_i} \end{cases}$$

内建电势差：

$$\psi_0 = \psi_n - \psi_p = V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

内建电场：

$$E = q\psi_o = qV_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = kT \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

2. 练习题：

a. 计算$Si\ P-N$结的内建电势差：

已知：$Si\ P-N$结，$T = 300K$，$n_i = 1.5\times10^{10} cm^{-3}$；

i. $N_a = 5\times10^{17} cm^{-3}, N_d = 1\times10^{16} cm^{-3}$；

热电势：

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

内建电势差：

$$\begin{aligned} \psi_0 &= V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \\ &= \frac{0.026eV}{e} \times \ln \frac{5\times10^{17} cm^{-3} \times 1\times10^{16} cm^{-3}}{(1.5\times10^{10} cm^{-3})^2} \\ &\approx 0.79\ V \end{aligned}$$

ii. $N_a = 10^{15} cm^{-3}, N_d = 2\times10^{16} cm^{-3}$；

同上：

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \\ &= \frac{0.026eV}{e} \times \ln \frac{10^{15} cm^{-3} \times 2\times10^{16} cm^{-3}}{(1.5\times10^{10} cm^{-3})^2} \\ &\approx 0.66\ V \end{aligned}$$

b. 计算$GaAs\ P-N$结的内建电势差：

已知：$GaAs\ P-N$结，$T = 300K$，$n_i = 1.8\times10^{6} cm^{-3}$；

i. $N_a = 5\times10^{17} cm^{-3}, N_d = 1\times10^{16} cm^{-3}$；

同前一题：

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \\ &= \frac{0.026eV}{e} \times \ln \frac{5\times10^{17} cm^{-3} \times 1\times10^{16} cm^{-3}}{(1.8\times10^{6} cm^{-3})^2} \\ &\approx 1.27\ V \end{aligned}$$

ii. $N_a = 10^{15} cm^{-3}, N_d = 2\times10^{16} cm^{-3}$；

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \\ &= \frac{0.026eV}{e} \times \ln \frac{10^{15} cm^{-3} \times 2\times10^{16} cm^{-3}}{(1.8\times10^{10} cm^{-3})^2} \end{aligned}$$