

PN结部分测验讲解

张凯丽

单项选择题（每小题5分）

1a) 公式 $\Delta n = (n_i^2/N_A)(e^{qV_A/k_B T} - 1)$ 被称为？

- a) 爱因斯坦关系
- b) Caughey-Thomas关系
- c) 热力学第二定律
- d) 摩尔定律
- e) **PN结定律**

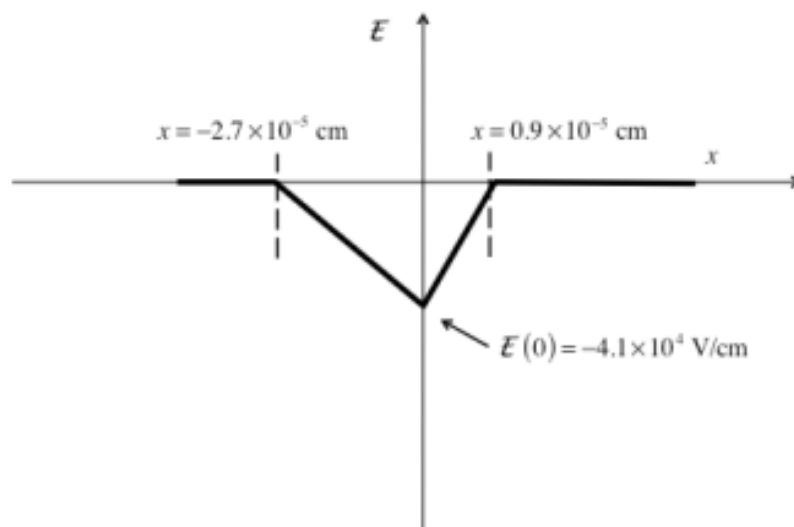
1b) 在 $N_D \gg N_A$ 的NP结中，二极管的饱和电流 I_0 与温度强相关的主要原因是什么？

- a) I_0 的表达式中有 D_n
- b) I_0 的表达式中有 L_n
- c) I_0 的表达式中有 N_A
- d) **I_0 的表达式中有 n_i^2**

1c) 处于平衡态时，“ $E(x) - x$ ”图像与x轴围成的面积的物理含义是什么？

- a) 它是输运区域中总的掺杂浓度
- b) 它等于半导体的能隙
- c) 它是输运区域中的净空间电荷密度
- d) 它是结的净电偶极矩
- e) **它是结的内建电势**

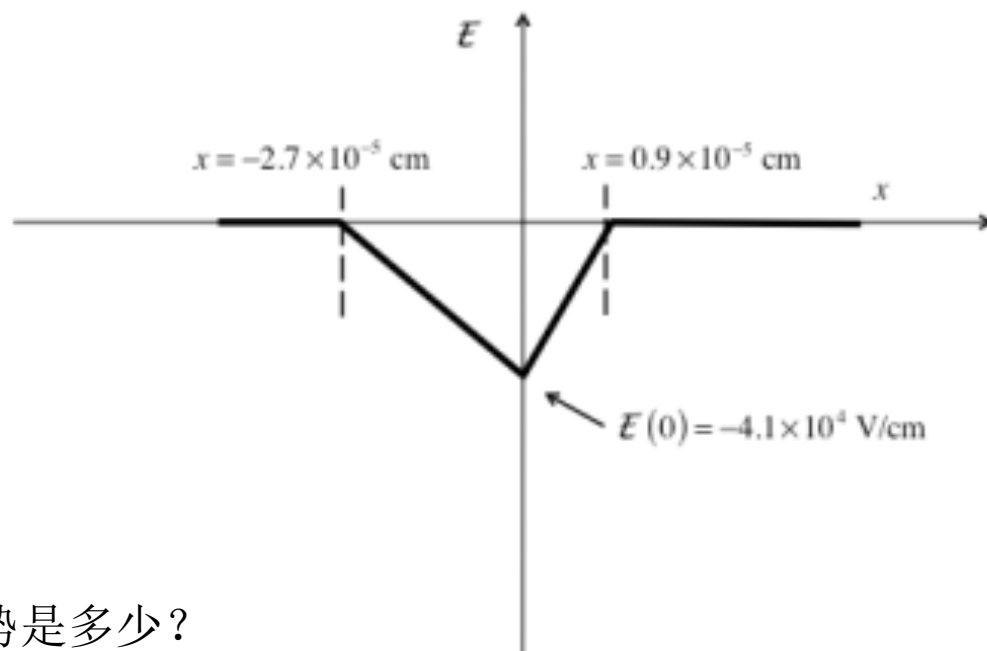
2) 下图为平衡态下Si的PN结的“电场-位置”图像。（假设耗尽层近似）。根据给出的信息，回答下列问题。



- 2a) 该PN结的内建电势是多少？
- 2b) 假设在PN结上施加一个 $V_R = 3V_{bi}$ 的反向偏置。请画出此时的“电场-位置”图像，并标出图像落在横轴和纵轴的具体数值。（虚线表示平衡态下的电场。）简要解释画出的图像。
- 2c) N型半导体这边的掺杂浓度是多少？（提示：需要首先判别N型半导体是哪一边。）
- 2d) P型半导体这边的掺杂浓度是多少？
- 2e) 若处于平衡态时 $x = 0.9 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 处的电压为0，则 $x = 0$ 处的电压为多少？

计算与简答

2) 下图为平衡态下Si的PN结的“电场-位置”图像。（假设耗尽层近似）。根据给出的信息，回答下列问题。



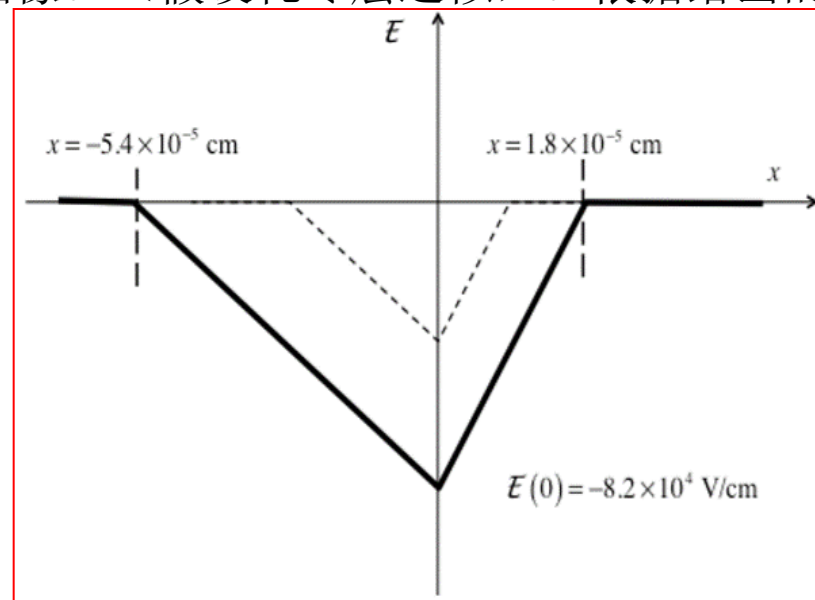
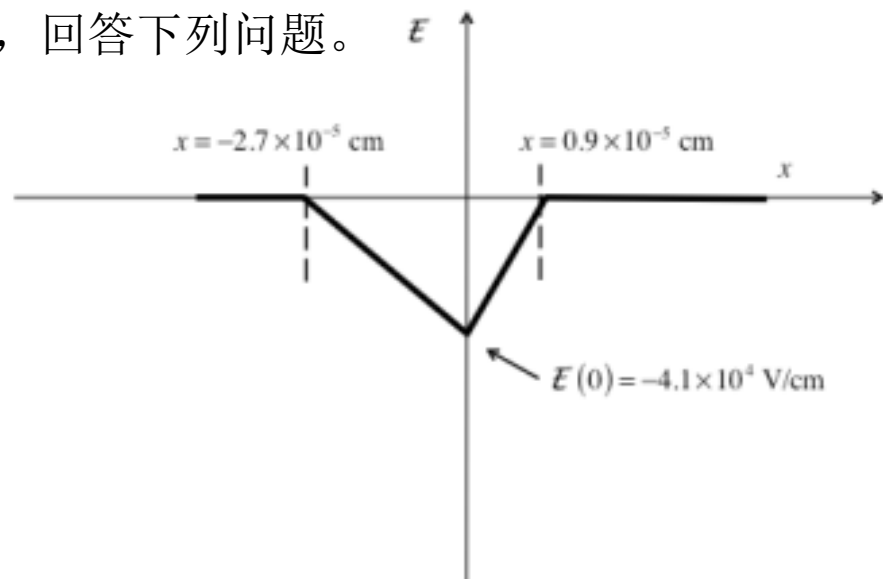
2a) 该PN结的内建电势是多少？

由于电压是电场的积分，所以内建电压就是上面曲线下的积分。（根据定义， V_{bi} 为正值）

$$V_{bi} = \frac{1}{2} |E(0)| W = 0.5 \times 4.1 \times 10^4 \times (2.71 \times 10^{-5} + 0.9 \times 10^{-5}) = 0.74 \quad \boxed{V_{bi} = 0.74 \text{ V}}$$

计算与简答

2) 下图为平衡态下Si的PN结的“电场-位置”图像。（假设耗尽层近似）。根据给出的信息，回答下列问题。

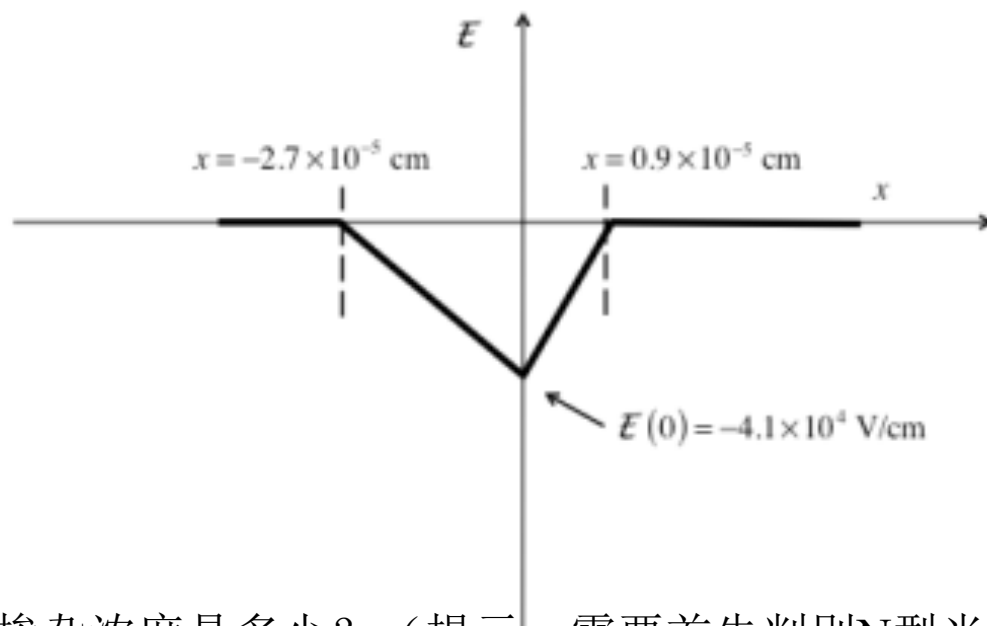


2b) 假设在PN结上施加一个 $V_R = 3V_{bi}$ 的反向偏置。请画出此时的“电场-位置”图像，并标出图像落在横轴和纵轴的具体数值。（虚线表示平衡态下的电场。）简要解释画出的图像。

通过PN结的电压会从 V_{bi} 升至 $V_{bi} + V_R = 4V_{bi}$ 耗尽层的厚度和电场的峰值的大小都随着穿过结的电压的平方根而变化，所以“电场-位置”图像落在横纵轴的数值变化都是双倍。

计算与简答

2) 下图为平衡态下Si的PN结的“电场-位置”图像。（假设耗尽层近似）。根据给出的信息，回答下列问题。



2c) N型半导体这边的掺杂浓度是多少？（提示：需要首先判别N型半导体是哪一边。）

根据泊松公式，在N型半导体这边： $\frac{d(\epsilon_{si} E)}{dx} = \rho(x) = +qN_D$

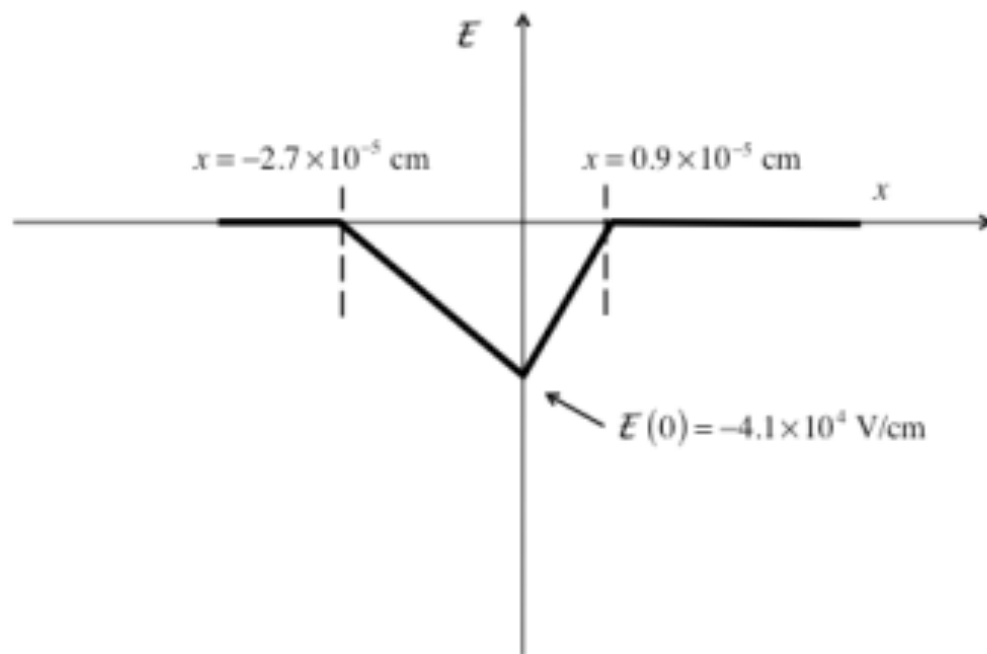
电场有一个正的斜坡在 $x > 0$ 时，因此在N型半导体这边： $\frac{dE}{dx} = \frac{+qN_D}{K_s \epsilon_0}$ $N_D = \frac{K_s \epsilon_0}{q} \frac{dE}{dx}$

从图中可得： $\frac{dE}{dx} = -\frac{(0 - (-4.1 \times 10^4)) \text{ V/cm}}{0.9 \times 10^{-5}} = 4.6 \times 10^9 \text{ V/cm}^2$

$$N_D = \frac{11.8 \times 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \times (4.6 \times 10^9 \text{ V/cm}^2) = 3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad \boxed{N_D = 3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}}$$

计算与简答

2) 下图为平衡态下Si的PN结的“电场-位置”图像。（假设耗尽层近似）。根据给出的信息，回答下列问题。



2d) P型半导体这边的掺杂浓度是多少？

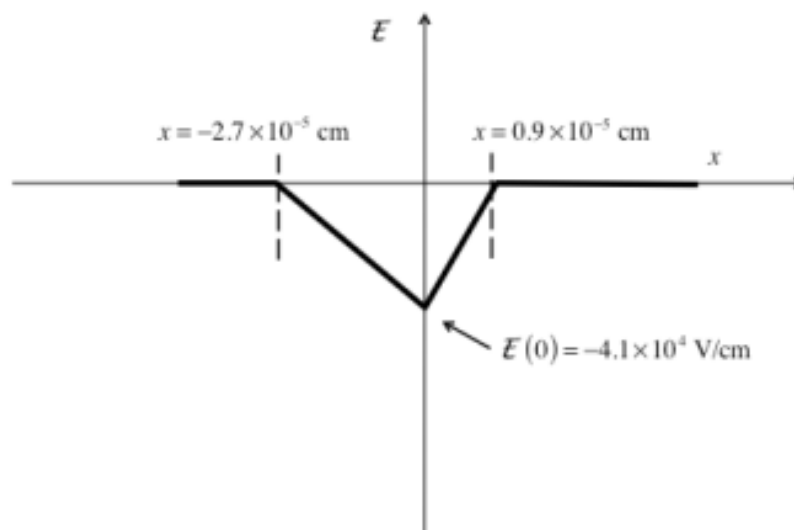
做法跟2c相同，但是必须考虑到电荷需要保持平衡。

$$N_A x_p = N_D x_n$$

$$N_A = N_D \frac{x_n}{x_p} = 3.0 \times 10^{16} \times \frac{0.9}{2.7} = 1.0 \times 10^{16} \quad N_A = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

计算与简答

2) 下图为平衡态下Si的PN结的“电场-位置”图像。（假设耗尽层近似）。根据给出的信息，回答下列问题。



2e) 若处于平衡态时 $x = 0.9 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 处的电压为0，则 $x = 0$ 处的电压为多少？

根据电场定义 $\mathcal{E} = -\frac{dV}{dx}$, so $V(x_n) - V(0) = -\int_0^{x_n} \mathcal{E} dx$
 $\therefore V(x_n) = 0$

$$\therefore V(0) = \int_0^{x_n} E dx$$

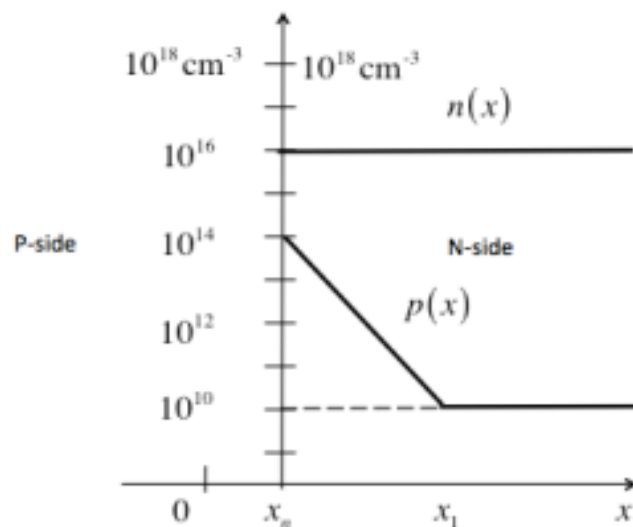
在 $x=0$ 处的电压是 $E(x)$ & x 曲线在 $x=0$ 与 $x=x_n$ 之间的面积, 但是符号为负。

$$V(0) = \frac{1}{2} \mathcal{E}(0) x_n = 0.5 \times (-4.1 \times 10^4) \times 0.9 \times 10^{-5} = -0.18$$

$$\boxed{V(0) = -0.18 \text{ V}}$$

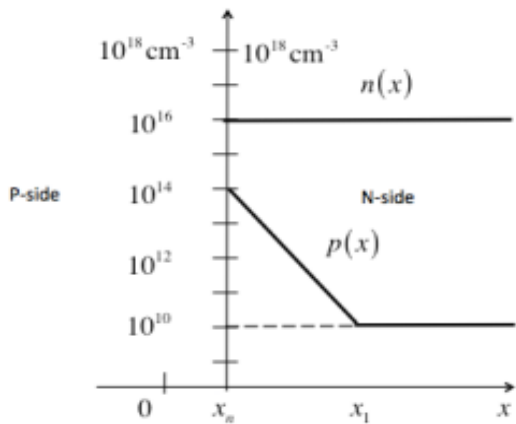
计算与简答

3) 下图为室温下PN结中的载流子浓度，但仅展示了PN结中准电中性的N型半导体的载流子浓度。请回答下列问题。



- 3a) 该PN结是正偏还是反偏？请阐述理由。
- 3b) 该PN结的N型半导体这边的长度是“较长”还是“较短”。请阐述理由。
- 3c) 什么是本征载流子浓度？
- 3d) 该二极管上施加的电压为多少？
- 3e) 在哪个位置 x ($x \geq x_n$)，准费米能级分离的距离最大？请阐述理由。

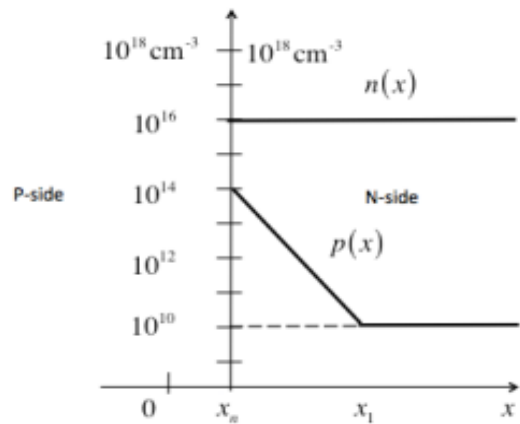
3) 下图为室温下PN结中的载流子浓度，但仅展示了PN结中准电中性的N型半导体的载流子浓度。请回答下列问题。



3a) 该PN结是正偏还是反偏？请阐述理由。

正偏。因为在N侧处有多余的空穴。（because there are excess holes on the N-side）

3) 下图为室温下PN结中的载流子浓度，但仅展示了PN结中准电中性的N型半导体的载流子浓度。请回答下列问题。

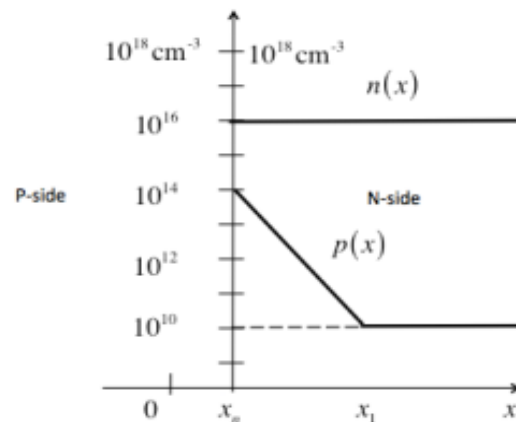


3b) 该PN结的N型半导体这边的长度是“较长”还是“较短”。请阐述理由。

“较长”

它之所以长，是因为在 $x=x_n$ 处注入的多余空穴在n区域结束前衰减为0。（同样的，在一个对数图上的直线意味着过剩的载流子密度是指数衰减，这是一个长二极管的情况。）

3) 下图为室温下PN结中的载流子浓度，但仅展示了PN结中准电中性的N型半导体的载流子浓度。请回答下列问题。



3c) 什么是本征载流子浓度？

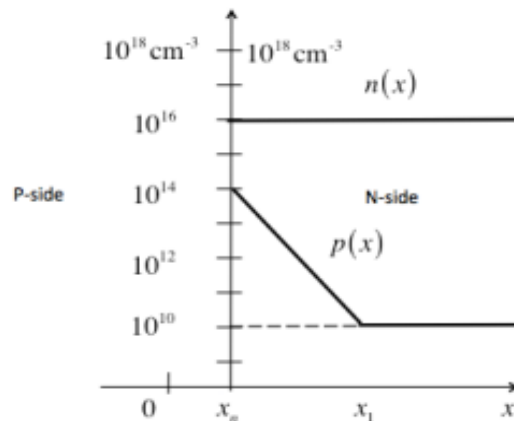
$$n_0 p_0 = n_i^2$$

在N侧，在多余的空穴浓度衰减至0：

$$n_0 p_0 = 10^{16} \times 10^{10} = 10^{26} \quad n_i = \sqrt{10^{26}} = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

3) 下图为室温下PN结中的载流子浓度，但仅展示了PN结中准电中性的N型半导体的载流子浓度。请回答下列问题。



3d) 该二极管上施加的电压为多少？

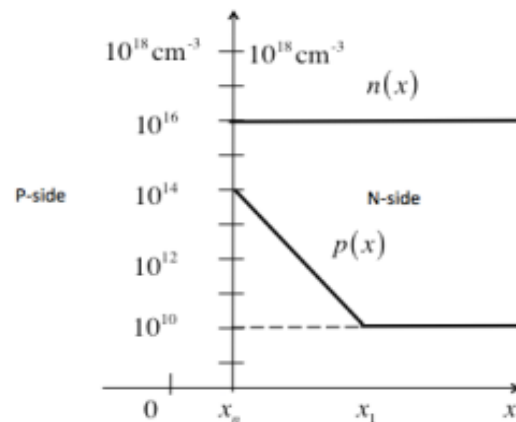
$$n(x_n)p(x_n) = n_i^2 e^{qV_A/k_B T} \quad 10^{16}10^{14} = (10^{13})^2 e^{qV_A/k_B T}$$

$$e^{qV_A/k_B T} = 10^4$$

$$V_A = \frac{k_B T}{q} \ln 10^4 = 0.026 \times 9.21 = 0.24 \text{ V}$$

$V_A = 0.24 \text{ V}$

3) 下图为室温下PN结中的载流子浓度，但仅展示了PN结中准电中性的N型半导体的载流子浓度。请回答下列问题。



3e) 在哪个位置 x ($x \geq x_n$)，准费米能级分离的距离最大？请阐述理由。

准费米能级分离的距离最大出现在 $x=x_n$ 。

原因：N区域是低水平注入，所以电子准费米能级出现在费米能级处于平衡状态的地方——它不随位置变化。

在空穴参杂浓度最高时，空穴的准费米能力最低。

参照公式： $p(x) = n_i e^{(E_i - F_p(x))/k_B T}$

半导体在 $x > x_1$ 处处于平衡，因此 $F_n = F_p$ 且这里没有分裂。在 $x = x_n$ 时空穴浓度最大。因此这里是准费米能级分离最多的地方。准费米能级分离距离最大出现在 $x = x_n$ 。

谢 谢!