

集成电路习题与详解

蒋建飞 编

上海科学技术文献出版社

集成电路习题与详解

蒋建飞 编

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行
上海商务印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 21.75 字数 526,000

1986年4月第1版 1986年4月第1次印刷

印数: 1—14,200

书号: 15192·426 定价: 3.95 元

《科技新书目》109-234

前 言

集成电路已成为各大学有关专业大学生、研究生的重要课程。为便于教学起见,我们选编了这本习题集,并对每一个所选习题进行了详细解答。考虑到各学校所用教材不一,我们采用了选编的形式,并侧重于模拟集成电路的分析和设计,但对数字集成电路的选题也注意到能满足课程教学的需要。

本书共分三篇十四章。第一篇七章为集成器件物理与模型,主要内容有集成器件的物理基础、集成器件的电学和热学模型以及集成器件的工艺原理等。第二篇四章为模拟集成电路,主要内容包括双极型和 MOS 型模拟集成电路的分析与设计。第三篇三章为数字集成电路,主要包括双极型、MOS 型数字集成电路以及大规模集成电路的分析与设计。

本书所选习题既有具体计算,又有概念解答,但以计算为主。每一章的开头部分都列出了本章所要用到的主要关系式。选题的顺序采用从器件到电路,从子电路到功能电路,最后是系统集成电路。

本书可以作为半导体物理、半导体器件、微电子学、无线电和固体电子学等专业的大学生、研究生、教师的教学参考书,也可以作为有关工程技术人员的参考书。

由于集成电路发展迅速,面广,内容极其丰富,本书难免有不尽周到之处,敬请读者批评指正。

编 者
1984.10.

目 录

第一篇 集成器件物理与模型	1
第一章 集成器件物理基础	1
第二章 集成双极型晶体管模型	31
第三章 集成结型场效应晶体管模型	69
第四章 集成 MOS 场效应晶体管模型	81
第五章 集成无源器件模型	125
第六章 集成器件的热模型	162
第七章 集成器件工艺原理	202
第二篇 模拟集成电路	250
第八章 双极型模拟集成电路子电路	250
第九章 双极型模拟集成电路功能电路	334
第十章 MOS 模拟集成电路	432
第十一章 模拟集成电路的特性	503
第三篇 数字集成电路	562
第十二章 双极型数字集成电路	562
第十三章 MOS 型数字集成电路	610
第十四章 大规模集成电路	641
主要符号表	684

第一篇

集成器件物理与模型

第一章 集成器件物理基础

基本关系式

1. N型和P型半导体的电导率

$$\text{N型: } \sigma_n = nq\mu_n \quad (1-1a)$$

$$\text{P型: } \sigma_p = pq\mu_p \quad (1-1b)$$

2. N型和P型半导体的电阻率

$$\text{N型: } \rho_n = \frac{1}{\sigma_n} = \frac{1}{nq\mu_n} \quad (1-2a)$$

$$\text{P型: } \rho_p = \frac{1}{\sigma_p} = \frac{1}{pq\mu_p} \quad (1-2b)$$

3. 费米能级 E_F 与载流子浓度 n 、 p 之间的关系

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (1-3a)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \quad (1-3b)$$

4. 费米能级 E_F 与掺杂浓度 N_D 、 N_A 之间关系

$$E_F - E_i = 2.3kT \log(N_D/n_i) = kT \ln(N_D/n_i) \quad (1-4)$$

$$E_i - E_F = 2.3kT \log(N_A/n_i) = kT \ln(N_A/n_i) \quad (1-5)$$

5. 杂质浓度与PN结内建电势差的关系

$$\begin{aligned}\psi_0 &= 2.3(kT/q) \log(N_D N_A / n_i^2) \\ &= (kT/q) \ln(N_D N_A / n_i^2)\end{aligned}\quad (1-6)$$

6. 本征载流子浓度和温度的关系

$$n_i(T) = 3.87 \times 10^{18} T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1-7)$$

7. 在绝对温度为 T 的固体内, 电子达到热平衡时, 能量为 E 的能级被电子占据的几率 $f(E)$ 可以表示成为

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (1-8)$$

8. 非平衡载流子和准费米能级的关系

$$n = n_i e^{[(E_F)_n - E_i]/kT} \quad (1-9a)$$

$$p = n_i e^{[E_i - (E_F)_p]/kT} \quad (1-9b)$$

9. 非平衡载流子浓度随时间的变化关系

$$\Delta n(t) = \Delta n(0) e^{-t/\tau} \quad (1-10a)$$

$$\Delta p(t) = \Delta p(0) e^{-t/\tau} \quad (1-10b)$$

10. 非平衡载流子的复合率

$$\text{非平衡电子复合率} = \frac{\Delta n(t)}{\tau} \quad (1-11a)$$

$$\text{非平衡空穴复合率} = \frac{\Delta p(t)}{\tau} \quad (1-11b)$$

11. 载流子扩散系数和迁移率之间的关系

$$D = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu \quad (1-12)$$

12. 半导体表面空间电荷层中单位面积上的电荷量 Q_{so} 与表面势 ψ_s 之间的关系

$$Q_{so} = \pm \sqrt{2kT \epsilon_{Si} \epsilon_0 \cdot F'(\psi_s)} \quad (1-13)$$

式中 $F(\psi_s) = p_0(e^{-u_s} + u_s - 1) + n_0(e^{u_s} - u_s - 1)$

$$u = \frac{q}{kT} \psi \quad u_s = \frac{q}{kT} \psi_s$$

13. 半导体中电荷守恒定律的一般表达式

$$\rho = q(N_D + p - N_A - n) \quad (1-14)$$

式中 ρ , N_D , N_A , p , n 可以是空间的三维、二维或一维函数。

14. 半导体硅表面耗尽、反型和强反型的一般判别式

$$\begin{aligned} |q\psi_s| &< E_i - E_F \quad (\text{耗尽}) \\ |q\psi_s| &> E_i - E_F \quad (\text{反型}) \\ |q\psi_s| &> 2(E_i - E_F) \quad (\text{强反型}) \end{aligned} \quad (1-15)$$

15. 通过硅表面氧化层中固定电荷密度对硅表面耗尽、反型和强反型作出判据的关系式

P 型硅

$$\begin{aligned} \left(\frac{Q_{ss}}{q}\right)^2 &< 3.4 \times 10^5 N_A \ln \frac{N_A}{n_i} \text{ atom}^2/\text{cm}^4 \quad (\text{耗尽}) \\ &> 3.4 \times 10^5 N_A \ln \frac{N_A}{n_i} \text{ atom}^2/\text{cm}^4 \quad (\text{反型}) \quad (1-16a) \\ &> 6.8 \times 10^5 N_A \ln \frac{N_A}{n_i} \text{ atom}^2/\text{cm}^4 \quad (\text{强反型}) \end{aligned}$$

N 型硅

$$\begin{aligned} \left(\frac{Q_{ss}}{q}\right)^2 &< -3.4 \times 10^5 N_D \ln \frac{N_D}{n_i} \text{ atom}^2/\text{cm}^4 \quad (\text{耗尽}) \\ &> -3.4 \times 10^5 N_D \ln \frac{N_D}{n_i} \text{ atom}^2/\text{cm}^4 \quad (\text{反型}) \quad (1-16b) \\ &> 6.8 \times 10^5 N_D \ln \frac{N_D}{n_i} \text{ atom}^2/\text{cm}^4 \quad (\text{强反型}) \end{aligned}$$

或者

P 型硅

$$\begin{aligned} Q_{ss}^2 &< 2\epsilon_{Si}\epsilon_0 N_A kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (\text{耗尽}) \\ &> 2\epsilon_{Si}\epsilon_0 N_A kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (\text{反型}) \end{aligned} \quad (1-16c)$$

$$> 4\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 N_A kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (\text{强反型})$$

N 型硅

$$Q_{ss}^2 < -2\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 N_D kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (\text{耗尽})$$

$$> -2\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 N_D kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (\text{反型}) \quad (1-16d)$$

$$> -4\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 N_D kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (\text{强反型})$$

16. 硅表面空间电荷层的最大宽度

$$\delta_m = \left(\frac{2\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0}{qN_A} \psi_s \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{4\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 kT}{q^2 N_A} \ln \frac{N_A}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-17)$$

17. 硅表面空间电荷层在耗尽近似下电荷量与空间电荷层宽度的关系

$$Q_{so} = (qN_A \delta_s)^{\frac{1}{2}} = Q_{ss}^- \quad (1-18)$$

18. 硅表面空间电荷层在耗尽近似下电荷量与表面势的关系

$$Q_{so} = (2\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 N_A q \psi_s)^{\frac{1}{2}} \quad (1-19)$$

19. 不考虑氧化层中固定正电荷时 SiO_2 -Si 系统的 SiO_2 上外加偏压 V_G 与表面势 ψ_s 的关系

$$V_G = \pm \frac{d_{\text{SiO}_2}}{\epsilon_{\text{SiO}_2}\epsilon_0} \sqrt{\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 2kTF(\psi_s)} + \psi_s \quad (1-20)$$

20. 理想 MOS 电容器电容 C 的表达式

$$C = \frac{C_{\text{SiO}_2} C_s}{C_{\text{SiO}_2} + C_s} \quad (1-21a)$$

$$C_{\text{SiO}_2} = \frac{\epsilon_{\text{SiO}_2}\epsilon_0}{d_{\text{SiO}_2}} \quad (1-21b)$$

$$C_s = \frac{dQ_M}{d\psi_s} \quad (1-21c)$$

21. 理想 MOS 电容器平带时的空间电荷层电容

$$C_{s0} = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0}{L_D'} = q\sqrt{\frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 N_A}{kT}}$$

22. 考虑 SiO_2 中有固定正电荷 Q_{ss} 时 SiO_2 层电容

$$C_{\text{SiO}_2} = \frac{Q_{ss}}{|V_{FB}|} \quad \text{或} \quad |V_{FB}| = \frac{Q_{ss}}{C_{\text{SiO}_2}} \quad (1-22)$$

23. 金属-半导体间接触电势差 V_{MS} 与功函数 W_{Si} , W_M 间的关系

$$V_{MS} = \frac{W_{Si} - W_M}{q} \quad (1-23)$$

24. 同时考虑 SiO_2 中的 Q_{ss} 和金-半接触差 V_{MS} 时的平带电压

$$V_{FD} = -V_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_{\text{SiO}_2}} \quad (1-24a)$$

或者

$$\begin{aligned} Q_{ss} &= C_{\text{SiO}_2}(-V_{FB} - V_{MS}) \\ &= C_{\text{SiO}_2}(|V_{FB}| - V_{MS}) \end{aligned} \quad (1-24b)$$

$$\frac{Q_{ss}}{q} = \frac{C_{\text{SiO}_2}}{q}(|V_{FB}| - V_{MS}) \quad (1-24c)$$

25. P 型半导体的功函数

$$W_{Si} = qx + (E_g/2) + kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (1-25a)$$

N 型半导体的功函数

$$W_{Si} = qx + (E_g/2) - kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (1-25b)$$

习 题 详 解

1.1 实验测出某批 N 型外延片(硅)的电阻率为 $2\Omega\cdot\text{cm}$, 试估算施主掺杂浓度。

解 因为这是属于掺杂较低的情形, 迁移率可以采用 $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。因为电导率 σ 是电阻率 $\rho = 2 \Omega\cdot\text{cm}$ 的倒数, 所以, 把这里的 μ_n , σ 和 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ F}$ 代入到(1-1)式, 得到

$$\sigma = nq\mu_n = \frac{1}{\rho} = n \times (1.6 \times 10^{-19}) \times 1350 = \frac{1}{2}$$

则有

$$n = 2.3 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3$$

1.2 根据图 1-1 所示的实验图线近似估算电阻率为 $1 \Omega\cdot\text{cm}$ 、 $0.1 \Omega\cdot\text{cm}$ 和 $0.01 \Omega\cdot\text{cm}$ 的 N 型硅材料中电子的迁移率。

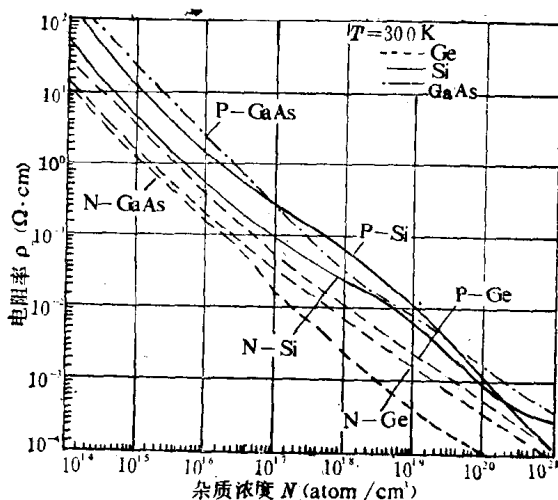


图 1-1 硅中电阻率和杂质浓度的关系

解 根据图 1-1 查出题中电阻率所对应的电子浓度为

$$\rho_n = 1 \Omega\cdot\text{cm}, n = 5 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3;$$

$$\rho_n = 0.1 \Omega\cdot\text{cm}, n = 9 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3;$$

$$\rho_n = 0.01 \Omega\cdot\text{cm}, n = 5 \times 10^{18} \text{ atom/cm}^3;$$

根据(1-2a)式有电子迁移率表达式为

$$\mu_n = \frac{1}{nq\rho_n}$$

代入以上的 ρ_n , n , 可以得到结果如下:

$$\mu_n(1) = \frac{1}{5 \times 10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1} = 1.25 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

$$\mu_n(0.1) = \frac{1}{9 \times 10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.1} = 6.9 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

$$\begin{aligned} \mu_n(0.01) &= \frac{1}{5 \times 10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.01} \\ &= 1.25 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

1.3 已知 $T=300\text{ K}$, 一块硅材料的费米能级在禁带中线 E_i 以上 0.26 eV , 如图 1-2 所示。试问电子和空穴的浓度是多少?

解 已知 $T=300\text{ K}$ 时 $kT=0.026\text{ eV}$, 所以有

$$\frac{E_F - E_i}{kT} = \frac{0.26}{0.026} = 10$$

直接查 e^x 、 e^{-x} 表, 或用对数计算可得

$$\exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) = e^{10} = 2.2 \times 10^4$$

$$\exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) = e^{-10} = 4.5 \times 10^{-5}$$

由表 A1-2 可知, $T=300\text{ K}$ (常温) 时硅中的 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3$, 所以由 (1-3a) 式和 (1-3b) 式可得

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) = 3.3 \times 10^{14} \text{ atom/cm}^3$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) = 6.8 \times 10^5 \text{ atom/cm}^3$$

1.4 已知硅中施主杂质浓度 N_D 为 $10^{15} \text{ atom/cm}^3$, 求在 $T=300\text{ K}$ 时 E_F 的位置。

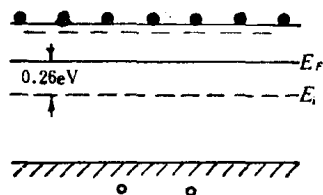


图 1-2 $E_F - E_i = 0.26\text{ eV}$ 时的能带图

解 根据表 A1-2 得 $n_i = 5 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3$, 从而有

$$N_D/n_i = 10^{15}/5 \times 10^{10} = 6.7 \times 10^4$$

查对数表得

$$\log(N_D/n_i) = \log(6.7 \times 10^4) = 4.83$$

和 $kT = 0.026 \text{ eV}$ 一起代入到 (1-4) 式可得

$$E_F - E_i = 2.3 \times 0.026 \times 4.83 = 0.29 \text{ eV}$$

即费米能级 E_F 在禁带中线 E_i 以上 0.29 eV 处。

1.5 已知 PN 结 N 区掺杂浓度为 $N_D = 1.5 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$, P 区掺杂浓度为 $N_A = 1.5 \times 10^{18} \text{ atom/cm}^3$, 求温度为 300 K 时的内建电势差 ψ_0 。

解 把

$$N_D = 1.5 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3, N_A = 1.5 \times 10^{18} \text{ atom/cm}^3$$

$$n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3, kT/q = 0.026 \text{ V}$$

代入到 (1-6) 式, 可得

$$\psi_0 = 2.3 \times 0.026 \log \left\{ \frac{1.5 \times 10^{18} \times 1.5 \times 10^{16}}{(1.5 \times 10^{10})^2} \right\} = 0.83 \text{ V}$$

1.6 从 -50°C 到 $+125^\circ\text{C}$ 之间每隔 25°C 求 $n_i(T)$ 在不同温度下的数值。已知硅的禁带宽度 $E_g = 1.21 \text{ eV}$, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ 焦耳/K}$ 。

解 根据 (1-7) 式有

$$n_i(T) = 3.87 \times 10^{16} T^{3/2} \exp$$

$$\cdot \left[\frac{-1.21}{2 \times 1.38 \times 10^{-23} T / (1.6 \times 10^{-19})} \right] \text{ atom/cm}^3$$

$$-55^\circ\text{C} (223 \text{ K}) \quad n_i = 2.8 \times 10^6 \text{ atom/cm}^3$$

$$-25^\circ\text{C} (248 \text{ K}) \quad n_i = 7.8 \times 10^7 \text{ atom/cm}^3$$

$$0^\circ\text{C} (273 \text{ K}) \quad n_i = 1.2 \times 10^9 \text{ atom/cm}^3$$

$$25^\circ\text{C} (298 \text{ K}) \quad n_i = 1.2 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3$$

$$50^\circ\text{C} (323 \text{ K}) \quad n_i = 8.3 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3$$

$$75^{\circ}\text{C}(348\text{ K}) \quad n_i = 4.4 \times 10^{11} \text{ atom/cm}^3$$

$$100^{\circ}\text{C}(373\text{ K}) \quad n_i = 1.9 \times 10^{12} \text{ atom/cm}^3$$

$$125^{\circ}\text{C}(398\text{ K}) \quad n_i = 6.8 \times 10^{12} \text{ atom/cm}^3$$

把以上结果作成曲线图,如图 1-3 所示。

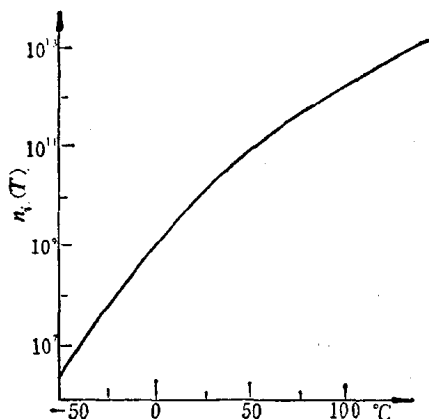


图 1-3 本征载流子浓度 n_i 与温度 T 之间的关系曲线

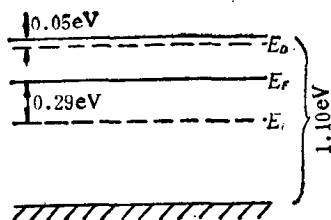


图 1-4 $N_D = 10^{15} \text{ atom/cm}^3$ 的 N 型硅的能带图

1.7 图 1-4 画出了掺施主浓度 $N_D = 10^{15} \text{ atom/cm}^3$ 的 N 型硅的能带图,其中 E_i 假定在禁带正中,图中还注明了习题 1.4 中计算出的费米能级 E_F 的位置。设施主的电离能是 0.05 eV ,试根据(1-8)式计算 $T = 300 \text{ K}$ 时施主能级上电子的数目。

解 用 E_D 表示施主能级,根据(1-8)式, N 个施主上的电子数目应等于:

$$(\text{能级数}) \times (\text{电子占据几率})$$

$$= N_D f(E_D) = \frac{N_D}{1 + e^{(E_D - E_F)/kT}}$$

由于禁带宽度为 1.10 eV , E_i 在正中,所以,导带底在 E_i 之上 0.55 eV ,

$$E_D - E_F = (0.55 - 0.05) - 0.29 = 0.21 \text{ eV}$$

在 $T = 300 \text{ K}$ 时, $kT = 0.026 \text{ eV}$, 故有

$$e^{(E_D - E_F)/kT} = e^{0.21/0.026} \approx 3200$$

于是, 施主上的电子数

$$N_D f(E_D) \approx \frac{N_D}{3200 + 1} \approx 3.1 \times 10^{-4} N_D$$

也就是说, 只有约万分之三的施主上有电子, 这个结果是与在常温 (300 K) 下施主基本上全部电离的实际情况相符的。

1.8 分别计算比 E_F 高 $2kT$, $3kT$ 和低 $2kT$, $3kT$ 的能级的电子占据几率。

解

(1) 比 E_F 高 $2kT$ 的能级

$$E - E_F = 2kT$$

根据(1-8)式可得

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^2} = 0.12 = 12\%$$

(2) 比 E_F 低 $2kT$ 的能级

$$E - E_F = -2kT$$

根据(1-8)式可得

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{-2}} = 0.88 = 88\%$$

(3) 比 E_F 高 $3kT$ 的能级

$$E - E_F = 3kT$$

根据(1-8)式可得

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^3} = 0.048 = 4.8\%$$

(4) 比 E_F 低 $3kT$ 的能级

$$E - E_F = -3kT$$

根据(1-8)式可得

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{-3}} = 0.95 = 95\%$$

1.9 施主浓度 $N_D = 10^{15} \text{ atom/cm}^3$ 的 N 型硅, 由于光的照射产生了非平衡载流子 $\Delta n = \Delta p = 10^{14} \text{ atom/cm}^3$, 试计算在这种情况下准费米能级的位置, 并和原来的费米能级相比较。

解 未经光照射时平衡的费米能级 E_F 实际上就是习题 1.4 中根据公式 $E_F - E_i = 2.3kT \log(N_D/n_i)$ 计算所得的 $E_F - E_i = 0.29 \text{ eV}$, 现求电子的准费米能级。根据公式(1-9a)两边取对数后化简得

$$(E_F)_n - E_i = \frac{kT}{\log e} \log(n/n_i) = 2.3kT \log(n/n_i)$$

现在电子的浓度为

$$n = N_D + \Delta n = 10^{15} + 10^{14} = 1.1 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3$$

和原来的电子浓度 N_D 相比, 只增加 0.1 倍, 所以, 代入上式求出的电子准费米能级与原来的费米能级相差很少:

$$(E_F)_n - E_i = 2.3 \times 0.026 \log \frac{1.1 \times 10^{15}}{1.5 \times 10^{16}} \approx 0.29 \text{ eV}$$

再求空穴的准费米能级。根据公式(1-9b)两边取对数后化简得

$$E_i - (E_F)_p = 2.3kT \log(p/n_i)$$

由于平衡空穴浓度 $p_0 = n_i^2/N_D$ 极微小, 空穴浓度 p 基本上就是非平衡载流子浓度

$$p = \Delta p = 10^{14} \text{ atom/cm}^3$$

代入上式有

$$\begin{aligned} E_i - (E_F)_p &= 2.3 \times 0.026 \log \frac{10^{14}}{1.5 \times 10^{16}} \\ &= 2.3 \times 0.026 \times 3.83 = 0.23 \text{ eV}. \end{aligned}$$

即空穴准费米能级(E_F)，是在 E_i 以下 0.23 eV 处，而原来的平衡费米能级 E_F 在 E_i 以上 0.29 eV，相差是很显著的。一般在有非平衡流子的情况下，往往都是这样，多数载流子的准费米能级与平衡费米能级相差不大，但少数载流子的准费米能级则变化很大。

1.10 一块半导体材料，其非平衡载流子寿命 $\tau=10\mu\text{s}$ ，问其中非平衡载流子在经过 $20\mu\text{s}$ 后将衰减到原来的百分之几？

解 将 $\tau=10\mu\text{s}$ 和 $t=20\mu\text{s}$ 代入到 (1-10a) 式，可得

$$\Delta n(t) = \Delta n(0)e^{-t/\tau} = 0.14 \Delta n(0)$$

这个结果表明，经过 $20\mu\text{s}$ ， $\Delta n(t)$ 衰减到只有原来浓度的 14%。

1.11 在掺杂浓度 $N_D=10^{16}\text{atom/cm}^3$ ，少子的寿命为 $10\mu\text{s}$ 的 N 型硅中，如少子由于外界的作用全部被消除（加大反向偏压的 PN 结附近就是这种情形），问在这种情况下电子-空穴的产生率有多大？

解 因为少子浓度 $p=0$ ，所以

$$\Delta p = p - p_0 = -p_0$$

式中 p_0 为平衡时的少子浓度

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} = 2.3 \times 10^4 \text{ atom/cm}^3$$

根据 (1-11b) 式可得

$$\begin{aligned} \text{复合率} &= \frac{\Delta p}{\tau} = -\frac{p_0}{\tau} = -\frac{2.3 \times 10^4 \text{ atom/cm}^3}{10^{-5} \text{ s}} \\ &= -2.3 \times 10^9 \text{ atom/cm}^3 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

负的复合率代表电子-空穴的产生率，所以，这个结果表明，在少子浓度为零的情况下，每秒钟每立方厘米产生 2.3×10^9 个电子-空穴对。

1.12 已知 $T=300\text{K}$ 时，硅单晶中电子迁移率 $\mu_n=1350$

$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 空穴迁移率 $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 试求其扩散系数。

解 根据(1-12)式, 代入题中 μ_n 值, 可得电子扩散系数为

$$D_n = \left(\frac{kT}{q} \right) \times 1350 = 0.026 \times 1350 = 35 \text{ cm}^2/\text{s}$$

同样, 根据(1-12)式, 代入题中 μ_p 值, 可得空穴扩散系数为

$$D_p = \left(\frac{kT}{q} \right) \times 480 = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$$

1.13 试证二氧化硅与硅界面的空间电荷层内 Q_{so} 与 ψ_s 之间满足(1-13)式关系, 并作出 Q_{so} 随 ψ_s 变化的关系曲线。

解 在一般情况下, 空间电荷层的电荷密度 $\rho_s(x)$ 可以表示成为

$$\rho_s(x) = q(N_D + p_s - N_A - n_s)$$

上式同样适用于硅体内, 但体内必须满足电中性条件 $\rho(x) = 0$, 则有

$$\rho(x) = q(N_D + p - N_A - n) = 0$$

即

$$N_D - N_A = n - p$$

如果空间电荷层中的电势是 $\psi(x)$, 且为正, 则能带向下弯。根据玻耳兹曼分布, 空间电荷层的载流子浓度 p_s, n_s 同硅体内载流子浓度 p, n 之间有如下关系

$$n_s = n e^{-\frac{q\psi(x)}{kT}}, \quad p_s = p e^{-\frac{q\psi(x)}{kT}}$$

假设 $\frac{q\psi(x)}{kT} = u$, 把以上关系代入到 $\rho_s(x)$ 以后可得

$$\rho_s(x) = q[p(e^{-u} - 1) - n(e^u - 1)]$$

空间电荷层的泊松方程可以写成

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho_s(x)}{\epsilon\epsilon_0} = -\frac{q}{\epsilon\epsilon_0} [p(e^{-u} - 1) - n(e^u - 1)]$$

在上式两边乘以 $\frac{d\psi}{dx} dx$, 然后对 dx 积分, 同时考虑到 $d\psi =$