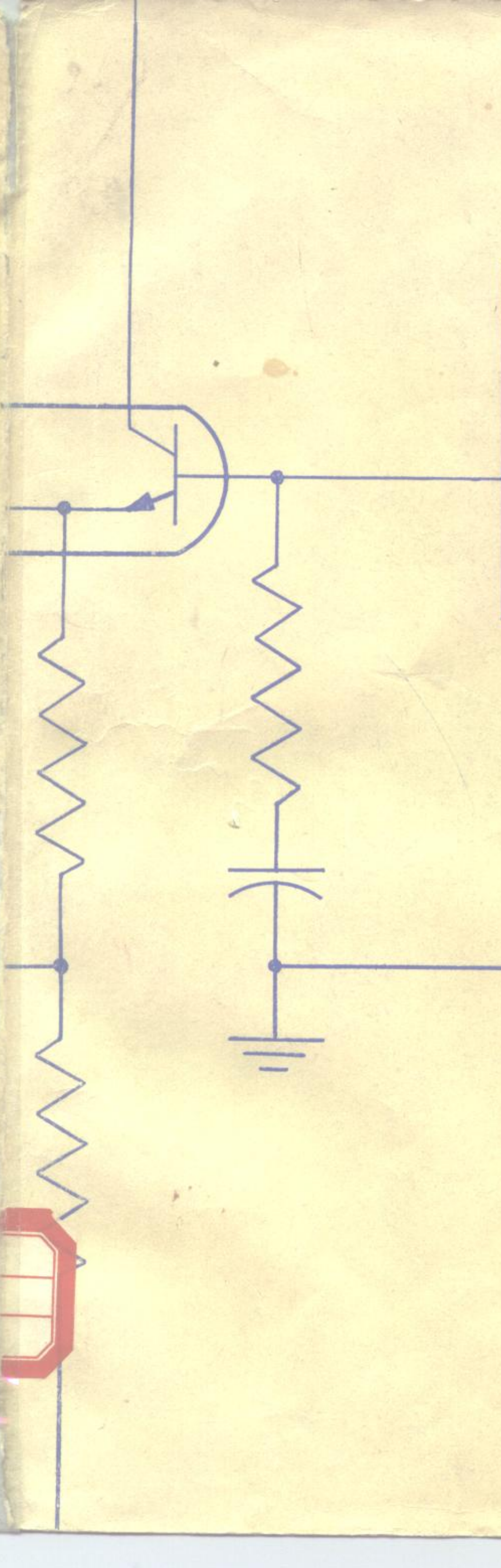

[美] C.A. 霍尔特 著

电子电路

数字与模拟

教师手册

龚之春 廖长英 陈金岭 译

魏志源 龚之春 杨钟英 校

人民教育出版社

73·76
8/2

电子电路

数字与模拟

教师手册

[美] C. A. 霍尔特 著

龚之春 廖长英 陈金岭 译

魏志源 龚之春 杨钟英 校

人民教育出版社

本书是作者所著教本“电子电路——数字与模拟”一书全部习题的解答，可供使用教本的教师参考。由于“教本”中许多命题均系通过习题证明，故本书对学习和阅读“教本”的科研与生产人员也有帮助。此外，本书中还补充了一些“教本”中没有的习题及其解答。

为了方便读者，在出版过程中，将“教本”中的习题分别插在本书相应题解之前，同时，将本书中的补充题分别放在本书相应各章的后面，并且把总注和24-4节的补遗移至“教本”有关章节中。

electronic circuits
DIGITAL AND ANALOG
TEACHER'S MANUAL
C. A. HOLT

本书责任编辑 李永和

电子电路
数字与模拟
教师手册

[美] C. A. 霍尔特 著
龚之春 廖长英 陈金岭 译
魏志源 龚之春 杨钟英 校

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
浙江淳安印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张26.75 字数600,000
1981年10月第1版 1982年10月第1次印刷
印数 00,001—16,500
书号 15012·0355 定价 2.90元

前　　言

本手册主要是作者所著《电子电路——数字与模拟》教本中全部508道章末习题的详解。此外，还包含47道补充题及其详解。其中，不少可作试题，有些则意在阐明“教本”中提出的若干重要概念。

总注用来阐明从“教本”中选出的那些章节，并陈述作者的一些想法。

24-4节开关稳压器补遗必将成为“教本”极有益的补充。但很遗憾，直到“教本”出版以后，作者才作出这一问题的推导。

关于利用“教本”组织几门课程的若干建议，已在教本的前缀材料中给出，不赘。

C. A. 霍尔特

1978.3.

电子电各①个敌

目　录

第一章 PN 结

1·1 节

1-1. 在 450 K,当 $N_a=5\times10^{23}$ 和 $N_d=3\times10^{23}\ \mathrm{m^{-3}}$ 时,求硅半导体内的 p_o 和 n_o。

解
$$T=450\ \mathrm{K}$$
$$n_i=\sqrt{15\times10^{44}T^3\mathrm{e}^{-14000/T}}=6.489\times10^{19}\mathrm{m^{-3}}$$
$$N_A=N_a-N_d=\underset{\sim\sim\sim\sim}{2\times10^{23}=p_o}$$
$$n_o=n_i^2/p_o=\underset{\sim\sim\sim\sim}{2.11\times10^{16}\mathrm{m^{-3}}}$$

1-2. 表达式$(1/n_i^2)(dn_i^2/dT)$表示温升 1°C时 n_i^2 增长几分之几。试用(1-2)式推导出上式为 $T^{-2}(B+3T)$,其中硅的 $B=1400$,锗的 $B=9100$。证明在 300 K,硅和锗 n_i^2 增长的百分数分别为16.6%和11.1%。

解
$$n_i^2=AT^3\mathrm{e}^{-B/T}$$
$$\frac{dn_i^2}{dT}=A\,\mathrm{e}^{-B/T}(BT+3T^2)$$
于是
$$\frac{1}{n_i^2}\cdot\frac{dn_i^2}{dT}=T^{-2}(B+3T)$$
$$=\frac{B}{9\times10^4}+0.01(\text{当 300 K时})$$

按上式计算,每温升 1°C,对于硅($B=1400$),n_i^2 增长16.6%;而对于锗($B=9100$),则 n_i^2 增长11.1%。因此,就硅来说,当温度为 300 K时,每上升 4.5°C,n_i^2 加倍。

1-3. 对 $p_o=a^2n_o$ 的 P 型半导体,用(1-1),(1-4)和(1-5)式推证其 $n_i=\frac{aN_A}{(a^2-1)}$。随后,定义非本征温度上限为 $n_o=0.1\,p_o$ 的温度,证明在此温度上限时,$n_i=0.35\,N_A$。此外,设 $N_d=4\times10^{22}$ 个施主原子/m³,$N_a=3\times10^{22}$ 个受主原子/m³,用图P 1-3,求硅和锗两者的非本征温度上限(单位为°C)。

解 令 $p_o=a^2n_o$。由式(1-4)和(1-5)得
$$p_o=n_o+(N_a-N_d)=n_o+N_A。$$
于是
$$a^2n_o=n_o+N_A$$
由此式得
$$n_o=N_A/(a^2-1)。$$
$$p_on_o=(a^2n_o)n_o=a^2n_o^2=a^2[N_A/(a^2-1)]^2=n_i^2$$
由此得到
$$n_i=\frac{aN_A}{a^2-1}\qquad\text{(证毕)}$$

当 $n_o=0.1\ p_o$ 时，$a^2=10$，因而 $n_i=0.351\ N_A$(证毕)。

对于 p 型半导体

$$\log_{10}n_i=\log_{10}(0.351\ N_A)=\log_{10}N_A-0.454$$

当 $N_A=4\times10^{22}$，$N_a=3\times10^{22}$ 时，则半导体为 n 型，其 $N_D=10^{22}$。因而

$$\log_{10}n_i=\log_{10}N_D-0.454=21.546$$

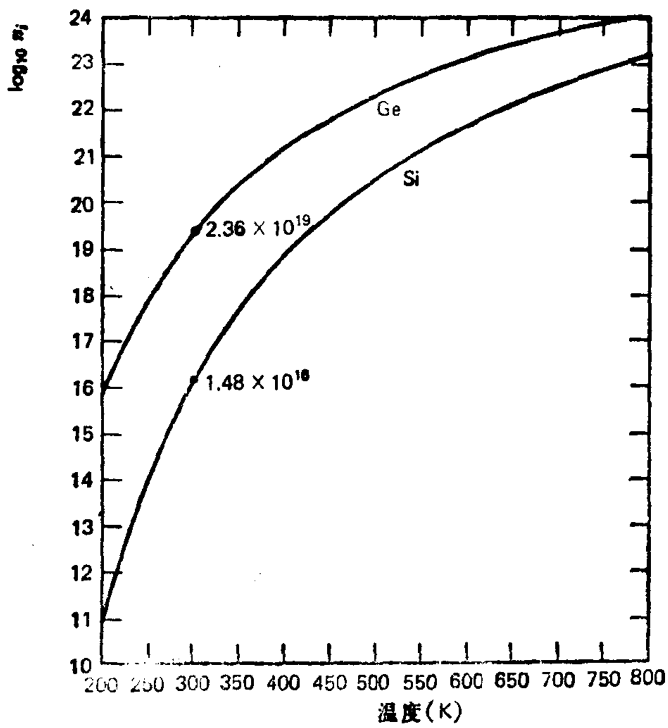

图 P 1-3

对于硅，从图 P 1-3，查得 $T=585$ K$=312$°C；而对于锗，则查得 $T=425$ K$=152$°C。

1-4．硅半导体具有 $N_A=10^{22}\text{m}^{-3}$，处于本征温度范围内，$p_o=1.1\ n_o$。计算温度 T(摄氏温度)。参考题 1-3，并利用图(P 1-3)。

解　令 $p_o=a^2n_o$，则 $n_i=aN_A/(a^2-1)$。$N_A=10^{22}$，$a^2=1.1$。因此 $n_i=1.049\times10^{23}$，和 $\log_{10}n_i=23.02$，从图(P 1-3)查得 $T=779\text{K}=506$°C。

1-2 节

1-5．$N_A=10^{21}$ 的硅半导体有 $n_i=10^{16}$(SI 单位)。载流子注入在正 x 区域内产生的剩余自由电子密度为

$$10^{23}\,e^{-20000x}$$

求空穴密度 p_o(x 的函数)。计算 $x=0$ 处的 p/n 比，说明注入为低量级还是高量级。

解　$$p_o=N_A=10^{21},\quad n_i=10^{16}。\ 所以\ n_o=10^{11}。$$

$$p-p_o=n-n_o=10^{23}e^{-20000x}$$

因而 $$p=(10^{23}e^{-20000x}+10^{21})\mathrm{m}^{-3}$$

在 $x=0$ 处，

$$p(0)=10^{23}+10^{21}=1.01\times10^{23}\mathrm{m}^{-3}$$

$$n(0)=10^{23}+10^{11}$$

$$\frac{n(0)}{p(0)}=0.99$$

由于此值超过 0.05，故注入为高量级。

$$\frac{p(0)}{n(0)}=1.01$$

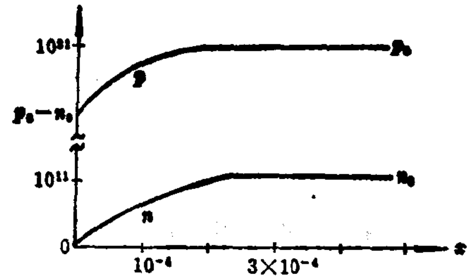

图 P 1-6

1-6．在硅器件的 P 区内，x 值从 0 到 0.0005 的电子密度 $n=n_o[1-\exp(-10^{-4}x)]$。若 $N_A=10^{21}$ 和 $n_i=10^{16}$，计算 $x=0$ 处的剩余载流子密度，以类似于图 1-6 的形式绘出 p 和 n 对 x 关系的图形。单位 SI。

解

$$p_o=N_A=10^{21}$$

$$n_o=n_i^2/p_o=10^{11}\mathrm{m}^{-3}$$

$$n-n_o=-n_oe^{-10000x}$$

在 $x=0$ 处，$n-n_o=-n_o=-10^{11}$ 为 $(x=0)$ 处的剩余电子密度。

1-3 节

1-7．(*a*) 纯硅制造的热敏电阻具有均匀截面积 $A=10^{-4}$，和长度 $l=0.003$。在 300 K，$\mu_h=0.048$ 和 $\mu_e=0.135$，而迁移率比值 $\mu(T)/\mu(300\text{ K})=(300/T)^{2.6}$。在 300 K 和 350 K 时计算其电阻值 $(l/\sigma A)$。(*b*) 对 $N_A=10^{21}$ 的 P 型半导体，重复 (*a*)，设迁移率与纯硅相同。将 (*a*) 和 (*b*) 两种结果列表。单位都是 SI。

解 (*a*) 在 300 K 时

$$n_i=1.48\times10^{16} \text{ 和 } \sigma=qn_i(\mu_e+\mu_h)=4.333\times10^{4}$$

于是 $$R=l/\sigma A=30/(4.333\times10^{-4})=69230\ \Omega(\text{单位为 SI})$$

在 350 K 时

$$\mu\left(\frac{300}{350}\right)^{2.6}\times\mu(300\text{ K})=0.670\times\mu(300\text{ K})$$

$$\mu_e=0.0904,\mu_h=0.0321,\ n_i=5.23\times10^{17}$$

$$\sigma=0.0102,R=l/\sigma A=2928\ \Omega$$

(*b*) $N_A=10^{21}$，$\sigma=qN_A\mu_h=7.68$，在 300 K 时，$R=3.91\ \Omega$。在 350 K 时，$\sigma=5.136$，$R=5.84\Omega$。

1-8．(*a*) $N_A=10^{21}$ 的 N 型半导体有截面积 $A=10^{-7}$，流过电流 1 mA。计算自由电子的漂移速度 (μ_eE_x)，并求电子漂移过 1 cm 距离所需要的时间（以小时计）。未标明的单位都是 SI。

解 (*a*) $$\mu_ee_x=\frac{I}{qAn_o}=\frac{0.001}{(1.6\times10^{-19})(10^{-7})(10^{21})}=62.5\ \mathrm{m/s}$$

$$t=\frac{0.01}{62.5}=\underline{0.00016s}$$

(b)
$$\mu_e e_x=\frac{I}{qAn_e}=\frac{0.001}{(1.6\times10^{-19})(10^{-7})(10^{29})}$$
$$=625\times10^{-9}\text{m/s}$$
$$t=\underline{4.44\text{ 小时}}$$

1-9. 设照在图 P 1-9 中硅棒一端的稳定电离辐射使注入剩余载流子为

$$n=(10^{21}e^{-50000x}+10^{9})\text{m}^{-3}$$

(a) 作为 x 的函数，计算朝正 x 方向的电子电流 I_e 和空穴扩散电流。电流以 mA 为单位。
(b) 因为电路没有闭合时，总电流 I 为零。算出空穴漂移电流为 $16\,e^{-50000x}$mA

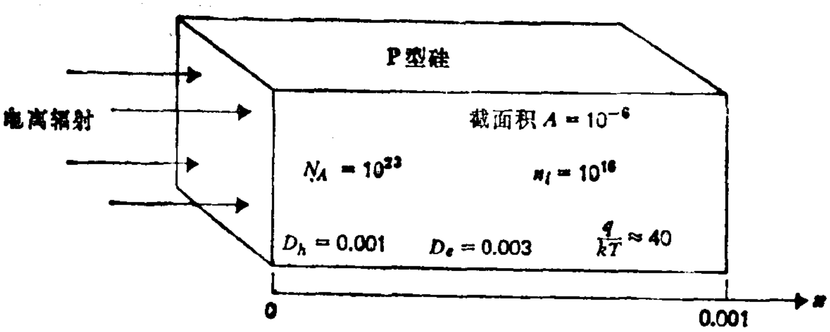

图 P1-9 受光注入的硅棒(SI 单位)

解 (a) $N_A=10^{23}$, $A=10^{-6}$, $n_i=10^{16}$, $D_h=0.001$, $D_e=0.003$, $q/_{kT}=40$。

$I_e=qAD_e dn/dx=qAD_e(-5\times10^{25})e^{-50000x}$

$=\underline{-24\,e^{-50000x}\text{mA}}$

$$(I_h)_{扩散}=-\frac{D_h}{D_e}I_e=\underline{8e^{-50000x}\text{mA}}$$

(b)
$$I=(I_h)_{漂移}+(I_h)_{扩散}+I_e=0$$

所以
$$(I_h)_{漂移}=-8e^{-50000x}+24e^{-50000x}$$
$$=\underline{16e^{-50000x}\text{mA}}$$

1-10. 本题为题 1-9 的继续。(a) 从空穴漂移电流计算电场 E_x(x 的函数)。(b) 由电磁理论中的高斯定律得出净电荷密度 ρ 为 $\epsilon dE/dx$，其中 ϵ 代表介电常数。对于硅，$\epsilon\approx10^{-10}$F/m 作为 x 的函数，计算 ρ。(c) 计算比值 ρ/(多余空穴电荷密度)。请注意，净电荷密度 ρ(产生电场及其相关联的空穴漂移电流)比剩余电荷密度小得多，可应用准中性。

解 (a) $(I_h)_{漂移}=0.016e^{-50000x}=qA\mu_h p e_x$

$$p=p_o=10^{23}\text{m}^{-3}$$

所以
$$e_x=\underline{25e^{-50000x}\text{V/m}}$$

(b)
$$\rho=\epsilon\frac{de_x}{dx}=(10^{-10})(25)(-50000)e^{-50000x}$$
$$=\underline{-1.25\times10^{-4}e^{-50000x}\text{C/m}^3}$$

(c) 剩余空穴电荷密度$=q(10^{21}e^{-50000x})=(n-n_0)/q$

ρ/(剩余空穴电荷密度)$=(-1.25\times10^{-4}e^{-50000x})/(160e^{-50000x})$

$=-7.813\times10^{-7}$

净电荷密度ρ还不到剩余电荷密度的百万分之一。$\rho=-q(n-n_o)+q(p-p_o)$，因而$n-n_o\approx p-p_o$。在受到入射光照射的表面，存在有正电荷层，其电荷量与半导体管体内的负电 荷量相等。[还有，$(I_e)_{漂移}=(\mu_e n/\mu_h p)(I_h)_{漂移}\approx(0.03e^{-50000x})(I_h)_{漂移}\approx0$]

1-4 节

1-11．在图P 1-9 中，设辐射在硅棒的终端击破共价键，在$x=0$处产生剩余载流子密度10^{20}。剩余载流子寿命为1/30 μs。因为棒的另一端在干扰源的好几个扩散长度以外，对于较大的x值，载流子密度趋近于它们的平衡值。作为x的函数，求自由电子密度n，电子电流I_e，以及朝正x方向的空穴漂移电流和扩散电流。

解 $N_A=10^{23}, D_h=0.001, A=10^{-6}, n_i=10^{16}, D_e=0.003, q/kT=40, \mu_h=0.04, \mu_e=0.12$。当$\tau=10^{-6}/30$，$L_e=\sqrt{D_e\tau}=10^{-5}$时，则

$$n_p=C_1e^{-x/L_e}+n_{po}=\underline{10^{20}e^{-10^5x}+10^9}$$

$$I_e=qAD_e\frac{dn_p}{dx}=\underline{-4.8e^{-10^5x}\text{mA}}$$

因而 $$(I_h)_{扩散}=-\frac{D_h}{D_e}I_e=\underline{1.6e^{-10^5x}\text{mA}}$$

由于 $$I_e+I_h=0$$

故 $$(I_h)_{漂移}=\underline{3.2e^{-10^5x}\text{mA}}$$

1-12．均匀掺杂半导体有$N_D=10^{22}, n_i=10^{16}, D_h=0.001$和$\tau=10$ μs。设空穴密度在$x=0$和$x=5\times10^{-5}$处分别为10^{20}和10^{10}。作为x的函数，求p和n。单位都是SI。

解 $n_{no}=10^{22}$，$p_{no}=10^{10}$，$L_h=\sqrt{D_h\tau}=10^{-4}$(均为SI单位)，则

$$p(x)=C_1e^{-10000x}+C_2e^{+10000x}+10^{10}$$

两个边界条件 $\begin{cases}p(0)=10^{20}\\p(5\times10^{-5})=10^{10}\end{cases}$

因此 $$p(x)=\underline{(1.58e^{-10000x}-0.582e^{10000x}+10^{-10})(10^{20})\text{m}^{-3}}$$

$$n(x)=n_{no}+(p_n-p_{no})$$

$$=\underline{(10^{22}+1.582\times10^{20}e^{-10000x}-0.582\times10^{20}e^{10000x})\text{m}^{-3}}$$

1-5 节

1-13．由高斯定律证明电场公式(1-31)和(1-32)。对于$N_A=2\times10^{22}, N_D=10^{22}, l=1.5\times10^{-7}$和$\psi_o=0.7$的硅结($\epsilon=10^{-10}$)，绘出电场图，并标明各量大小。结为正偏。还要计算外加电压V。单位都是SI。

解 令$E=-E_x$，则$\frac{dE}{dx}=-\frac{\rho}{\epsilon}$，$E=-\frac{\rho}{\epsilon}x+C_1$。

从$-l_p$到零，$\rho=-qN_A$，

$$E=\frac{qN_A}{\epsilon}x+C_1=\frac{qN_A}{\epsilon}(x+l_p)$$

从零到l_n

$$E=\frac{qN_D}{\epsilon}(l_n-x)$$ （证毕）

$N_A=2\times10^{22}$，$N_D=10^{22}$，因此$l_p=\frac{1}{2}l_n$。又$l=1.5\times10^7=l_p+l_n$，由此求得

$$l_p=5\times10^{-8},\quad l_n=10\times10^{-8}$$

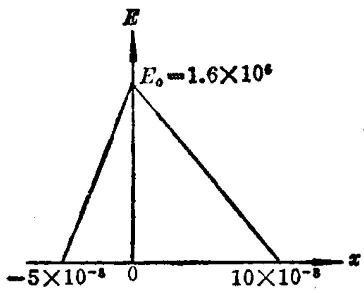

图 P 1-13

当$-5\times10^{-8}<x<0$，则

$$E=3.2\times10^{13}(x+5\times10^{-8})$$

当$0<x<10^{-7}$，则

$$E=1.6\times10^{13}(10^{-7}-x)$$

$$E_o=\sqrt{(2qN_DN_A)/[\epsilon(N_A+N_D)]}\sqrt{\psi_o-V}$$
$$=1.6\times10^6$$

因此 $V=0.58\text{V}$，结果绘于图 P-13。

1-14. 对于题1-13的PN结，多大的电压V能使结层总长度l增大到10倍（即15×10^{-7}），加上这个电压时最大电场E_o为多大？

解
$$l=\sqrt{\frac{2\epsilon}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)}\sqrt{\psi_o-V}=15\times10^{-7}$$

因此 $V=-11.3$ 和$E_o=16\times10^6\text{V/m}$

1-15. 对于下列每种情况，计算硅结的空间电荷层总长度l和最大电场E_o（$\epsilon=10^{10}$，在平衡情况下）。

(*a*) 轻掺杂，$N_A=N_D=10^{19}$，$\psi_o=0.35$。(*b*) 重掺杂，$N_A=N_D=10^{23}$，$\psi_o=0.81$。比较两种结果。单位都是SI。

解
$$l=\sqrt{\frac{2\epsilon}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)\psi_o}=50000\sqrt{\psi_o/N}$$

$$E_o=\sqrt{2qN_AN_D\psi_o/[\epsilon(N_D+N_A)]}=4\times10^{-5}\sqrt{N\psi_o}$$

(*a*) $N=10^{19}$，$\psi_o=0.35$，因此

$$l=9.354\times10^{-6}\text{m} \text{ 和 } E_o=74,800\text{V/m}$$

(*b*) $N=10^{23}$，$\psi_o=0.81$，因此

$$l=1.423\times10^{-7}\text{m} \text{ 和 } E_o=1.138\times10^7\text{V/m}$$

1-16. 缓变PN结是这样一种结，其中由P区到N区杂质浓度的变化是缓变的而不是突变的。设这种变化为线性的，并设耗尽近似适用。对于上述情况，贮存在结层内的电荷必须等量而极性相反，这一要求预示结层必定向每区伸入相等的距离。设未中和粒子产生的电荷密度为

$\rho=ax$(从P区内 $x=-\frac{1}{2}l$ 到N区内 $x=\frac{1}{2}l$)。(a) 从高斯定律开始,按照1-5节方法,求最大电场 E_o 和结层长度 l,用正常数 a,介电常数 ε,和结电压(ψ_o-V)写出。(b)对于 $a=12\times10^8$, $\psi_o=0.7$ 和 $V=-26.3$ 的硅结($\varepsilon=10^{-10}$),计算 E_o 和 l。单位都是SI。

解 (a) $\frac{dE_x}{dx}=\frac{\rho}{\epsilon}$。因此,$\frac{dE}{dx}=-ax/\epsilon$ 和

$$E=-\frac{ax^2}{2\epsilon}+C_1=\frac{a}{2\epsilon}\left(\frac{l^2}{4}-x^2\right)$$

在 $x=0$ 处,$E=E_o=\frac{al^2}{8\epsilon}$。而

$$\psi_o-V=2\left(\frac{a}{2\epsilon}\right)\int_0^{\frac{1}{2}l}\left(\frac{l^2}{4}-x^2\right)dx=\frac{al^3}{12\epsilon}$$

因此 $l=\left[\frac{12\epsilon}{a}(\psi_o-V)\right]^{\frac{1}{3}}$ 和 $E_o=\frac{a}{8\epsilon}\left[\frac{12\epsilon}{a}(\psi_o-V)\right]^{\frac{2}{3}}$

(b) $\psi_o-V=27$, $l=3\times10^{-6}$m, $E_o=1.35\times10^7$V/m。

1-6 节

1-17. 证明 $d\psi_o/dT=\psi_o/T-(kT/qn_i^2)d(n_i^2)/dT$。使用题1-2的结果并计算硅结($\psi_o=0.77$ V)在300 K的 $d\psi_o/dT$(以mV/K计)

解

$$\psi_o=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_AN_D}{n_i^2}$$

$$\frac{d\psi_o}{dT}=\frac{\psi_o}{T}-\frac{kT}{q}\left(\frac{1}{n_i^2}\times\frac{dn_i^2}{dT}\right)$$

在300 K,对于硅来说,当 $\psi_o=0.77$,则

$$\frac{d\psi_o}{dT}=-1.72\text{mV/K}$$

1-18. 证明空间电荷层两侧的剩余载流子密度有下列关系

$$n_p(0)-n_{po}=\frac{n_{po}}{p_{no}}[p_n(0)-p_{no}]。$$

由此结果推论,注入轻掺杂的剩余载流子总是大一些。

解 $n_p(0)=n_{po}e^{qV/kT}$,

因而 $n_p(0)-n_{po}=n_{po}(e^{qV/kT}-1)$,还有

$p_n(0)-p_{no}=p_{no}(e^{qV/kT}-1)$,

两式相除得

$$\frac{n_p(0)-n_{po}}{p_n(0)-p_{no}}=\frac{n_{po}}{p_{no}}=\frac{N_D}{N_A}$$

于是 $n_p(0)-n_{po}=\frac{n_{po}}{p_{no}}[p_n(0)-p_{no}]$ (证毕)

若P区为弱掺杂,则 $n_{po}\gg p_{no}$,从而

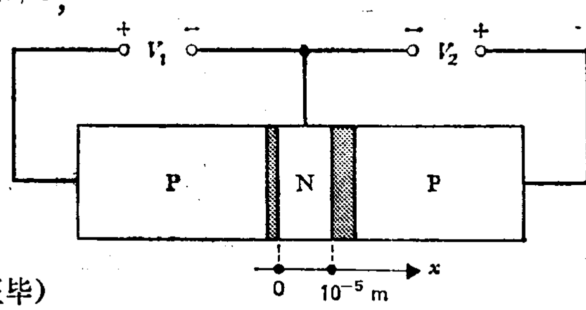

图 P1-19 双结器件

$$n_p(0)-n_{po}\gg p_n(0)-p_{no}$$

若 n 区为弱掺杂，则 $n_{po}\ll p_{no}$，从而

$$n_p(0)-n_{po}\ll p_n(0)-p_{no}$$

1-19．图 P 1-19 的中性 N 区从 $x=0$ 伸展到 $x=10^{-5}$。左边的 PN 结加 $V_1=0.6\text{V}$ 的正偏。右边的 PN 结加 $V_2=-10\text{V}$ 的反偏。设 $q/kT=40, A=10^{-7}, p_{no}=10^{10}, D_h=0.001$ 和 $L_h=10^{-4}$。(*a*) 从结上的边界条件计算(1-27)式中的 C_1 和 C_2，并将 p_n 表示为 x 的函数。请注意，(1-27)式中 p_{no} 可忽略不计。(*b*) 计算 $x=0$ 和 $x=10^{-5}$ 处朝正 x 方向的空穴电流。单位都是SI。

解 (*a*) $p_n(x)=C_1e^{-10^4x}+C_2e^{10^4x}+10^{10}$（均为 SI 单位）

在 $x=0$ 处，$p_n(0)=10^{10}e^{40\times0.6}=2.649\times10^{20}$

在 $x=10^{-5}$ 处，$p_n(10^{-5})=10^{10}e^{-400}\approx0$

由这两个边界条件求得

$C_1=1.461\times10^{21}$ 和 $C_2=-1.196\times10^{21}$

因此 $p_n=(14.60e^{-10^4x}-11.96e^{10^4x})(10^{20})\text{m}^{-3}$

(*b*) $\dfrac{dp_n}{dx}=(-14.60e^{-10^4x}-11.96e^{10^4x})(10^{24})$

$$I_h=-qAD_h\frac{dp_n}{dx}=2.336\times10^{-4}e^{-10^4x}+1.914\times10^{-4}e^{10^4x}$$

$I_h(0)=0.425\text{mA}$　$I_h(10^{-5})=0.423\text{mA}$

注意：$\boxed{qAl\dfrac{(p_h)_{平均}}{\tau}=0.002\text{mA}=I_h(0)-I_h(10^{-5})}$

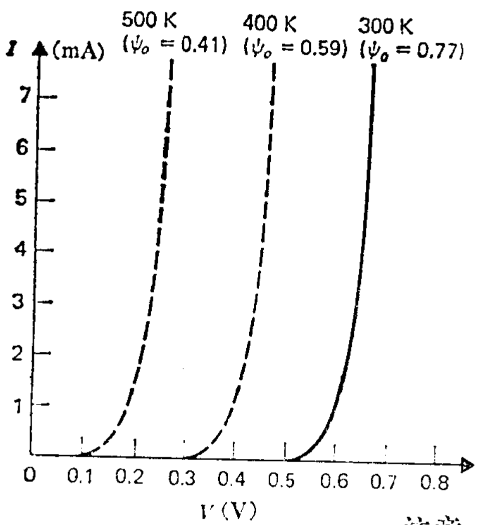

图 P 1-20

1-7 节

1-20．使用(1-2)式，消去 ψ_o 算式(1-40)中的 n_i^2。然后证明

$$\frac{d\psi_o}{dT}=\frac{k}{q}(\ln N_AN_D-3\ln T-107)。$$

对 1-7 节例题中的硅二极管，计算 300 K，400 K 和 500 K 的 $d\psi_o/dT$。用所得结果证明图 P 1-20上标明的 ψ_o 的变化。($k/q=8.6\times10^{-5}$SI 单位)。

解

$$n_i^2=15\times10^{44}T^3e^{-14000/T}$$

$$\psi_o=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_AN_D}{n_i^2}，因此$$

$$\psi_o=\frac{kT}{q}(\ln N_AN_D-3\ln T-104+14000/T)$$

$$\frac{d\psi_o}{dT}=\frac{k}{q}(\ln N_AN_D-3\ln T-107)$$ （证毕）

$$\frac{d\psi_o}{dT}=-2.58\times10^{-4}\ln T-2.40\times10^{-4}$$

在 300 K，$\dfrac{d\psi_o}{dT}=-1.71\ \text{mV/°C}$

在 400 K，$\dfrac{d\psi_o}{dT}=-1.79\ \text{mV/°C}$

在500 K，$\dfrac{d\psi_o}{dT}=-1.84\ \text{mV/°C}$

1-21．在 290 K ($q/kT=40$)，锗二极管和硅二极管的饱和电流各为 1 μA 和 0.5 pA。若两个二极管串联，并供以正向电流 1 mA，它们的结电压各为多少？

解 如图 P 1-21所示，则

$$I=0.001=10^{-6}e^{40V_{Ge}}=0.5\times10^{-12}e^{40V_{Si}}$$

所以 $V_{Ge}=0.173\ \text{V}$，和 $V_{Si}=0.535\ \text{V}$

1-8 节

1-22．1-7 节例题中二极管的电流可以从式(1-52)求得为 5.27 mA(当 $V=0.65$ V)。

(a) x 轴的单位按图(1-17)中规定，用 SI 单位，证明 $p_n=9.25\times10^{20}\exp(-35700\,x)+11\times10^9$。($b$) 作为 x 的函数，求 n_n。(c) 作为 N 区内 x 的函数，以 mA 为单位，求下列朝正 x 方向的电流：空穴电流、电子扩散电流、电子电流、电子漂移电流。

解 (a) $p_{no}=11\times10^9$，$n_{no}=2\times10^{22}$

$p_n(0)=p_{no}e^{38.7V}=9.248\times10^{20}$

$L_h=2.8\times10^{-5}$

$p_n=9.248\times10^{20}e^{-35700x}+11\times10^9\text{m}^{-3}$

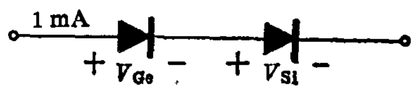

图 P1-21

(b) $n_n-n_{no}=p_n-p_{no}=9.25\times10^{20}e^{-35700x}$

所以 $n_n=2\times10^{22}+9.25\times10^{20}e^{-35700x}$

(c) $I_h=-qAD_h\dfrac{dp_n}{dx}$

$=(-1.6\times10^{-19})(10^{-6})(0.000776)(9.25\times10^{20})(-35700)e^{-35700x}$

$I_h=4.10\,e^{-35700x}\text{mA}$

$(I_e)_{扩散}=-\dfrac{D_e}{D_h}I_h=-3\,I_h=-12.30\,e^{-35700x}\text{mA}$

$I_e=I-I_h=5.27-4.10\,e^{-35700x}\text{mA}$

$(I_e)_{漂移}=I_e-(I_e)_{扩散}=5.27+8.20\,e^{-35700x}\text{mA}$

1-23．本题为题 1-22 的继续。从电子漂移电流计算中性N区内作为 x 函数的电场 E_x，并求出其最大值。设 $n_n=n_{no}$。

解 $(I_e)_{漂移}=(5.27+8.20\,e^{-35700x})(10^{-3})=qA\mu_e n_n E_x$，

$n_n\approx n_{no}=2\times10^{22}$，$A=10^{-6}$，$\mu_e=0.09$。

因此 $E_x=18.3+28.47\,e^{-35700x}\ \text{V/m}$ 和 $E_{max}=46.8\ \text{V/m}$

1-24．1-7 节例题中的二极管，从(1-52)式求得电流 $I=5.27$ mA(当 $V=0.65$)。(a) x 轴单位按图 1-17 中规定，用 SI 单位，证明 $n_p=2.04\times10^{20}\exp(27800\,x)+2.43\times10^9$。($b$) 作为 x 的函数，求 p_p。(c) 作为 P 区内 x 的函数，求下列朝 x 方向的电流：电子电流、空穴扩散电流、空穴电流、空穴漂移电流。

解 (a) $L_e=36\times10^{-6}, e^{qV/kT}=e^{38.7\times0.65}=8.408\times10^{10}$

$n_p(0)=n_{po}e^{qV/kT}=20.43\times10^{19}$,因此

$n_p(x)=\underset{\sim\sim\sim}{2.04\times10^{20}e^{27800x}+2.43\times10^{9}}$

(b) $p_p-p_{po}=n_p-n_{po}=2.04\times10^{20}e^{27800x}$

$p_{po}=N_A=9\times10^{22}$

因此 $p_p=\underset{\sim\sim\sim}{9\times10^{22}+2.04\times10^{20}e^{27800x}\mathrm{m}^{-3}}$

(c) $I_e=qAD_e\dfrac{dn_p}{dx}=\underset{\sim\sim\sim}{1.17\ e^{27800x}\mathrm{mA}}$

$D_e=0.00129$

$$(I_h)_{扩散}=-\frac{D_h}{D_e}I_e=-\frac{\mu_h}{\mu_e}I_e$$

$$=-\frac{0.035}{0.050}=\underset{\sim\sim\sim}{-0.819\ e^{27800x}\mathrm{mA}}$$

$I_h=I-I_e=\underset{\sim\sim\sim}{5.27-1.17\ e^{27800x}\ \mathrm{mA}}$

$(I_h)_{漂移}=I_h-(I_h)_{扩散}=\underset{\sim\sim\sim}{5.27-0.35\ e^{27800x}\ \mathrm{mA}}$

1-9 节

1-25．齐纳二极管有 $N_A=10^{23}$ 和 $N_D=10^{21}$。设电场达到 $2\times10^7\mathrm{V/m}$ 时发生雪崩击穿。计算击穿电压。单位都是 SI，而 $\varepsilon=10^{-10}$。

解 $E_o=\sqrt{\dfrac{2qN_AN_D}{\epsilon(N_A+N_D)}}\sqrt{\psi_o-V}$，即

$$(2\times10^7)^2=\frac{2\times1.6\times10^{-19}\times10^{23}\times10^{21}}{10^{-10}\times1.01\times10^{23}}(\psi_o-V)$$

因此 $\psi_o-V=126.25$

$$\psi_o=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_AN_D}{n_i^2}=\frac{1}{40}\ln\frac{10^{23}\times10^{21}}{(1.48\times10^{16})^2}=0.7$$

所以 $V=-126.25+0.7=-125.6$

击穿电压为$\underset{\sim\sim}{126\,\mathrm{V}}$。

1-26．齐纳二极管要设计在 1000 V 击穿。设雪崩击穿发生在场强为 $2\times10^7\mathrm{V/m}$ 时，若 $N_A=10^{23}\mathrm{m}^{-3}$，采用的掺杂剂密度 N_D 应是多少？($\varepsilon=10^{-10}$)

解 $N_A=10^{23}, \epsilon=10^{-10}$

$$E_o=2\times10^7=\sqrt{\frac{2qN_AN_D}{\epsilon(N_A+N_D)}}\times\sqrt{\psi_o-V}$$

ψ_o 可忽略，而 $V=-1000\,\mathrm{V}$，因此

$N_D=\underset{\sim\sim\sim}{125\times10^{18}\mathrm{m}^{-3}}$

1-27．硅二极管($\varepsilon=10^{-10}$)有 $N_A=N_D=10^{24}\mathrm{m}^{-3}$。计算 E_o 和 l 的平均值，并说出所产生的击穿最可能是雪崩击穿还是齐纳击穿。说明你选择的理由。$T=300\,\mathrm{K}$。

解 $\frac{q}{kT}=38.7, n_i=1.48\times10^{16}$

$$\psi_o=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}=0.9317$$

$$E_o=\sqrt{\frac{2qN_A N_D\psi_o}{\epsilon(N_A+N_D)}}=3.86\times10^7$$

$$l=\sqrt{\frac{2\epsilon}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)\psi_o}=4.826\times10^{-8}\text{m}$$

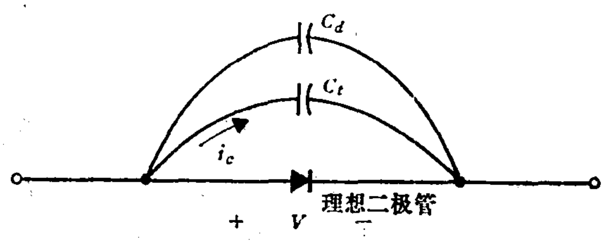

图 P1-29

当 $E_o>50$ MV/m 时(近似值),发生齐纳击穿。本题中,二极管在外加电压为零时 $E_o\approx39$ MV/m,故击穿很可能是由齐纳机理引起。

1-28. 对1-7节例题中的二极管加上1V反偏,在N区内求出:(*a*) p_n 和 n_n(作为 x 的函数),$x=0$ 取在结层处。(*b*) $x=0$ 处的空穴和电子电流,以pA为单位,朝正 x 方向。设热激发电流和表面漏电流均可忽略。(*c*) 在 $x=0$ 处的电子漂移电流和电子扩散电流,以pA为单位,朝正 x 方向(假设同前)。

解 $N_A=9\times10^{22}$, $N_D=2\times10^{22}$, 在300K, $n_i=1.48\times10^{16}$, $D_h=0.000776$, $L_h=2.8\times10^{-5}$, $p_{no}=11\times10^9$, $A=10^{-6}$, $I_s=0.0627$ pA, $\mu_h=0.03$, $\mu_e=0.09\ \text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$。

(*a*) $p_n=C_1e^{-x/L_h}+p_{no}$

$$=p_{no}(1-e^{-35700x})=11\times10^9(1-e^{-35700x})$$

$$n_n=n_{no}+p_n-p_{no}=2\times10^{22}-11\times10^9e^{-35700x}\text{m}^{-3}$$

在 $x=0$ 处,分别求得:

(*b*) $I_h=-qAD_h\frac{dp_n}{dx}=-0.04876$ pA

$$I_e=I-I_h=-0.0627-(-0.04876)=-0.0139\ \text{pA}$$

(*c*) $(I_e)_{扩散}=-3I_h=0.1463$ pA

$$(I_e)_{漂移}=I_e-(I_e)_{扩散}=-0.0139-0.1463$$

$$=-0.1602\ \text{pA}$$

1-10 节

1-29. 二极管有 $\psi_o=0.70$ 和 $a=10^{-10}$(SI单位),a 由(1-54)式定义。当偏压为0.54和 -24.3 时,计算增量空间电荷电容,单位为pF。若外加电压为 $-24.3+0.1\cos10^6t$,找出由结电容引起的时变电流分量。此电流即图P1-29中的电流 i_c。

解 由式(1-57)$C_t=\frac{a}{2\sqrt{\psi_o-V}}$,则

$$C_t=\frac{10^{-10}}{2\sqrt{0.7-V}}=\frac{50}{\sqrt{0.7-V}}\text{pF}$$

当$V=0.54$时，$C_t=\underline{125\ \text{pF}}$；当$V=-24.3$，$C_t=\underline{10\ \text{pF}}$；

当$v=-24.3+0.1\cos 10^6 t$时

$$i_c=C_t\frac{dv}{dt}=10^{-11}\frac{dv}{dt}=\underline{-10^{-6}\sin 10^6 t\ \text{A}}$$

1-30．对于题(1-16)的缓变结，结层长度l为$(12\,\varepsilon/a)^{\frac{1}{3}}(\psi_o-V)^{\frac{1}{3}}$。用题(1-16(b))的数据计算增量空间电荷电容。截面积$A=10^{-7}\text{m}^2$。

解 $A=10^{-7}$，$\varepsilon=10^{-10}$，$\psi_o=0.7$，$V=-26.3$，$a=12\times10^8$，$\rho=ax$。

$$C_t=\frac{\varepsilon A}{l}=\frac{10^{-17}}{l}$$

$$l=\left[\frac{12\,\varepsilon}{a}(\psi_o-V)\right]^{\frac{1}{3}}=3\times10^{-6}\text{m}$$

$\therefore\ C_t=\underline{3.33\ \text{pF}}$

1-6 节补充题

1．设$n_i=10^{16}\ \text{m}^{-3}$和$q/kT=40$，在均匀掺杂、正向偏置PN结的P区，$N_A=10^{21}\text{m}^{-3}$和自由电子密度为

$$n_p(x)=10^{23}\text{e}^{-20000x}+10^{11}\text{m}^{-3}$$

(*a*) 计算外加电压V。(*b*) 求P区中的$p_p(x)$。(*c*) 计算在中性P区内$x=0$处的比值p_p/n_p。(*d*) 试问注入是低量级还是高量级？

解 (*a*) $n_p(0)=n_{po}\text{e}^{40V}$

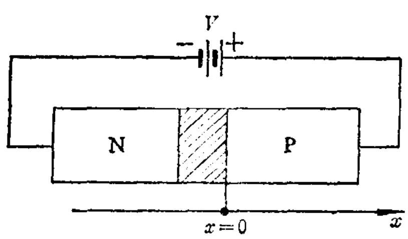

图 S1-6-1

故

$$V=\frac{1}{40}\ln\frac{n_p(0)}{n_{po}}=\frac{1}{40}\ln\frac{10^{23}}{10^{11}}=\underline{0.69\ \text{V}}$$

(*b*) $p_p(x)-p_{po}=n_p(x)-n_{po}$

或 $$p_p(x)=n_p(x)-n_{po}+p_{po}$$

$$\underline{p_p(x)=10^{23}\text{e}^{-20000x}+10^{21}}$$

(由于 $p_{po}=n_i^2/n_{no}=10^{32}/10^{11}=10^{21}$)

(*c*) 在$x=0$处，$p_p(0)=10^{23}+10^{21}=1.01\times10^{23}$

和 $n_p(0)=10^{23}+10^{11}=10^{23}$

比值 $p_p(0)/n_p(0)=\underline{1.01}$

(*d*) 在$x=0$处，多数载流子密度仅比少数载流子密度高1%，故注入为<u>高量级</u>。