微電子學

問題詳解

上冊

原著者 Millman · Grabel

曉園出版社

世界图书出版公司

内 容 简 介

本书是J. 米尔曼与A.格雷贝尔所著的“Microelectronics”第2版一书的问题、习题详解。内容全面、丰富，解题思路清晰，有助于对该课程的深入理解和掌握。全题解共分上、下两册。本书是下册。

微电子学问题详解　上册

1987年第二版

鞠鸿飞　译著

晓园出版社　出版

世界图书出版公司　北京分公司重印

（北京朝内大街137号）

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

1992年2月重印　850×1168 ⅓₂

1992年2月第1次印刷　印张：10.5

印数：0,001—2,000

ISBN7-5062-1178.5/TN.6

定价：7.70元

世界图书出版公司通过中华版权代理公司

购得重印权限国内发行

前　　言

研習理工的同學，都有一種認識，那就是：一本書的習題往往是該書的精華所在，藉着習題的印證，才能對書中的原理原則澈底的吸收與瞭解。

有鑒於此，曉園出版社特地聘請了許多在本科上具有相當研究與成就的人士，精心出版了一系列的題解叢書，為各該科目的研習，作一番介紹與舖路的工作。

一個問題的解答方法，常因思惟的角度而異。曉園題解叢書，毫無疑問的都是經過一番精微的思考與分析而得。其目的在提供對各該科目研讀時的參考與比較；而對於一般的自修者，則有啓發與提示的作用。希望讀者能藉着這一系列題解叢書的幫助；而在本身的學問進程上有更上層樓的成就。

微電子學問題詳解

上 册 目 錄

第一章 半導體

1-1 某電子由電極射出，受電壓V之加速，若初速可忽略不計，最末速為9.4×10^6 m/s，試求V的值。

解：$qV=\dfrac{1}{2}mv^2$

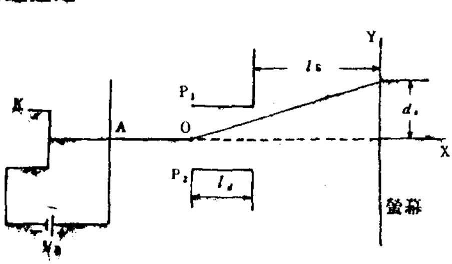
$$V=mv^2/2q=\frac{9.11\times10^{-31}\times(9.4\times10^6)^2}{2\times1.6\times10^{-19}}=251.5(V)$$

1-2 電子自兩平行電板電極的某一電極以$10^{-17}J$的初動能射出，行進方向和電板垂直，且需克服電板間的電壓V_x，試求V_x的值使電子到達另一電板時的速度為零。

解：$qV=\dfrac{1}{2}mv^2=10^{-17}$

$$V=\frac{10^{-17}}{1.6\times10^{-19}}=62.5V$$

1-3 示波器影示管的主要外貌是如附圖所示的。K和A之間的位差是V_a，而P_1和P_2之間的是V_p。這二電場互不影響。電子以零的初速自電極K放出，經過電極A中央的一個小洞。由於P_1和P_2之間的電場的緣故，它們經過這些極片時會改變方向，以後，則以定速向螢幕S進行。該二極片之間的距離是d。



(a) 將電子經過 A 時的速度 v_x 當作 V_a 的函數求出來。

(b) 將電子從 P_1 和 P_2 二極片間的電場中出來時的速度的 Y 分量 v_y 當作 V_p ，l_d ，d ，和 v_x 的函數而求出來。

(c) 將電子到達幕上那點到幕中央的距離（d_s）當作管長和外加電壓的函數而求出來。

(d) 當 $V_a = 1.0$ 仟伏，$V_p = 100$ 伏特，$l_d = 1.27$ 厘米，$d = 0.5$ 厘米，$l_s = 20$ 厘米時，求出 v_x , v_y 和 d_s 的數值來。

(e) 如果我們希望電子束的偏轉 $d_s = 5$ 厘米，V_a 之值必須爲何？

解：(a) 由（1-9）式，且 $v_0 = 0$ ，得 $\frac{1}{2}mv_x^2 = qV_a$

$$v_x = \sqrt{\frac{2q}{m}V_a}$$

(b) $v_y = a_y t$ a_y ：向上加速度

$$ma_y = q\varepsilon_y = q\frac{V_p}{d} \quad \therefore a_y = \frac{q}{m}\frac{V_p}{d}; \quad t = \frac{\ell_d}{v_x}$$

$$\therefore v_y = \frac{q}{m}\cdot\frac{V_p}{d}\cdot\frac{\ell_d}{v_x} = \frac{q}{m}\frac{\ell_d}{d}\frac{V_p}{v_x}$$

(c) 電子飛出平板 P_1 , P_2 後，x , y 軸之速度分量皆爲常數，電子跨越 ℓ_s 所需之時間爲 $t_1 = \ell_s/v_x$

在這段時間中，電子沿 y 軸走了：（ V_y 代 b 部份 ）

$$\Delta y = v_y\, t_1 = \frac{q}{m}\frac{V_p}{d}\frac{\ell_d}{v_x}\cdot\frac{\ell_s}{v_x} = \frac{q}{m}\frac{\ell_d\ell_s}{d}\frac{V_p}{v_x^2}$$

由(a)將 v_x 值代入得：

$$d_s = \Delta y = \frac{1}{2}\frac{\ell_d\ell_s}{d}\frac{V_p}{V_a}$$

(d) $v_x = \sqrt{2\times1.759\times10^{11}\times10^3} = 1.874\times10^7$ m/S

$$v_y = \frac{1.6\times10^{-19}\times1.27\times10^{-2}\times100}{9.11\times10^{-31}\times0.5\times10^{-2}\times1.874\times10^7}$$

$= 2.38\times10^6$ m/S

$$d_s = \frac{1}{2}\frac{\ell_d\ell_s}{d}\frac{V_p}{V_a} = \frac{1}{2}\frac{1.27\times20}{0.5}\frac{100}{10^3} = 2.54\ \text{cm}$$

(e) $5 = \frac{1}{2}\frac{1.27\times20}{0.5}\frac{100}{V_a}$

$V_a = 508$ V

1-4 某扁平鋁條的電阻率爲 $3.44\times10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}$ ，截面積 $2\times10^{-4}\ mm^2$,長 5mm

，如流通 50mA的電流時壓降爲何？

解：$R=\rho\dfrac{L}{A}=3.44\times10^{-8}\times\dfrac{5\times10^{-3}}{2\times10^{-4}\times10^{-6}}=0.86(\Omega)$

$V=IR=50\times0.86=43\,(mV)$

1-5　同習題1-4的鋁條，如壓降爲 30μV 時其上的電流是多少？

解：$R=0.86\,\Omega$

$$I=V/R=\frac{30\times10^{-6}}{0.86}=3.49\times10^{-5}\,(A)$$

1-6　(a)　如欲使矽上電子獲得 1.1eV的平均能量，試計算所需的電場。

(b)　在矽條上外加電壓以產生電子電洞對，這種作法實際嗎？試解釋之。

解：(a)　$W=\dfrac{1}{2}mv^2=\dfrac{1}{2}m(\mu\varepsilon)^2$

$$\epsilon=\left[\frac{2\times1.1\times1.6\times10^{-19}}{9.11\times10^{-31}\times(1500\times10^{-4})^2}\right]^{1/2}=41.4\,(kv/cm)$$

(b)　不能。

因爲在實際上無法產生 41.4kv/cm, 這麼高的電場。

1-7　重做習題 1-5，但鋁條換成 800°K 的純矽條。

解：查表知　$\sigma=\dfrac{1}{230000}(\Omega\text{-cm})^{-1}$

$$R=\frac{L}{\sigma A}=230000\times\frac{5\times10^{-1}}{2\times10^{-4}\times10^{-2}}=5.75\times10^{10}\,(\Omega)$$

$$I=\frac{V}{R}=\frac{30\times10^{-6}}{5.75\times10^{10}}=5.22\times10^{-16}\,(A)$$

1-8　已知鋁的密度是 $2.70\times10^3\,kg/m^2$，電阻率是 $3.44\times10^{-8}\,\Omega\text{-m}$, 假定每個鋁（Al）原子有 3 個價電子且原子量爲 26.98，試計算鋁中自由電子的移動率。

解：$n = 3\times6.02\times10^{23}\times\dfrac{2.7\times10^{3}\times10^{3}}{26.98}$（$1/m^3$）$= 1.806\times10^{29}$（$1/m^3$）

$\sigma = \dfrac{1}{\rho} = nq\mu \qquad \dfrac{1}{3.44\times10^{-8}} = 1.806\times10^{29}\times1.6\times10^{-19}\times\mu$

$\mu = 10^{-3}(m^2/v\cdot s) = 10.0(cm^2/v\cdot s)$

1-9 (a) 已知矽中摻入的施體原子濃度 $N_D = 2\times10^{14}cm^{-3}$，受體原子濃度 $N_A = 3\times10^{14}cm^{-3}$，試求此半導體在 300°K時的自由電子和電洞濃度。

(b) 以上半導體爲 p 型或 n 型？

解：(a) $N_D + p = N_A + n \qquad 2\times10^{14} + p = 3\times10^{14} + n$

$p = n + 10^{14} \qquad np = n_i^2 = 2.1025\times10^{20}$

$n^2 + 10^{14}n - 2.1025\times10^{20} = 0 \qquad n = 2.1\times10^{6}$

$p = n_i^2/n = 1.001\times10^{14}$

(b) (a)中所取的樣品是 p 型矽。

1-10 重做習題1-9，但取 $N_A = N_D = 10^{16}cm^{-3}$.

解：(a) 因爲 $N_A = N_D$，故爲本質矽，電子電洞數相同。

$p = n = n_i = 1.45\times10^{10}(cm^{-3})$

(b) 所取的樣品是本質矽。

1-11 重做習題1-9，但 $N_D = 10^{16}cm^{-3}$，$N_A = 10^{14}cm^{-3}$。

解：(a) $\because N_D \gg N_A$

$\therefore n \approx N_D = 10^{16}(cm^{-3})$

$\therefore p = n_i^2/n = 2.01\times10^{4}(cm^{-3})$

(b) 所取的樣品是 n 型矽。

1-12 (a) 假定某 p 型的半導體在 300 °K 的電阻率是 $0.02\Omega\cdot cm$，試求其電子和電洞濃度。

(b) 重做(a)，但改爲 n 型矽半導體。

解：(a) 因爲是 p 型矽，故載子數 $= n + p \approx p$。

$\dfrac{1}{\rho} = \sigma = qp\mu_P$

$$\frac{1}{0.02}=1.6\times10^{-19}\times p\times475$$

$p=6.58\times10^{17}\ (cm^{-3})$ $pn=n_i^2$

$n=3.2\times10^{2}\ (cm^{-3})$

(b) $\dfrac{1}{0.02}=1.6\times10^{-19}\times n\times1500$

$n=2.08\times10^{17}\ (cm^{-3})$ $p=1.01\times10^{3}\ (cm^{-3})$

1-13 重做習題1-12，但電阻率改爲 5Ω-cm 。

解：(a) 因爲是 p 型矽，故載子數 $=n+p\approx p$

$\dfrac{1}{\rho}=\sigma=q\,p\,\mu_p$ $\dfrac{1}{5}=1.6\times10^{-19}\times p\times475$

$p=2.63\times10^{15}\ (cm^{-3})$ $n=7.9\times10^{4}\ (cm^{-3})$

(b) $\dfrac{1}{5}=1.6\times10^{-19}\times n\times1500$

$n=8.3\times10^{14}\ (cm^{-3})$ $p=2.5\times10^{5}\ (cm^{-3})$

1-14 純矽中加入施體雜質，使電阻率降爲 1Ω-cm，試計算每單位體積中施體雜質對 S_i 原子的比例。

解：$n=\dfrac{\sigma}{q\mu}=\dfrac{1}{\rho q\mu}=\dfrac{1}{1.6\times10^{-19}\times1500}=4.16\times10^{15}$

$$\text{ratio}=\frac{4.16\times10^{15}}{5\times10^{22}}=0.833\times10^{-7}$$

1-15 若矽爲單價之金屬，求其對純矽（本質矽）在 300°K 之傳導係數之比。

解：本質矽在 300°K 之傳導係數爲

$$\sigma_1=N_i q(\mu_n+\mu_p)=(1.5\times10^{10}\,cm^{-3})$$

$$(1.60\times10^{-19}C)(1300+500)\frac{cm^2}{v\cdot s}$$

$$=4.32\times10^{-6}\ (\Omega\text{-}cm)^{-1}$$

若矽爲單價之金屬，此時其傳導係數

$$\sigma_2=nq\mu_n$$

$$= 4.99 \times 10^{22} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1{,}300$$

$$= 1.04 \times 10^{7}\ (\Omega - \mathrm{m})^{-1}$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1.04 \times 10^{7}}{4.32 \times 10^{-6}} = 2.39 \times 10^{12}$$

1-16 已知某半導體的電子濃度分布如下圖。

(a) 假定無外加電場，試導出並畫出電子電流密度 $J_n(x)$。

(b) 若淨電子電流爲零，試畫出並導出內建電場的關係。

(c) 試決定點 $x = 0$ 和 $x = W$ 之間的電位，已知 $n(0)/n_o = 10^3$。

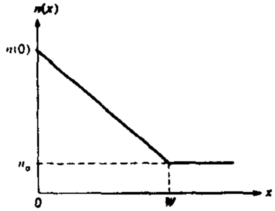
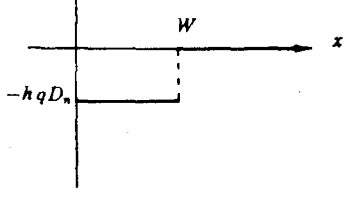


圖1－16

解：(a) $n(x) = \begin{cases} n(0) - \dfrac{n(0) - n_o}{W}\,x & 0 < x < W \\ n_o & x > W \end{cases}$

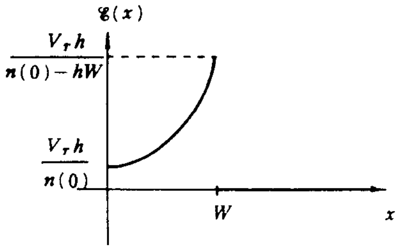
$= \begin{cases} n(0) - hx \\ n_o \end{cases}$ 其中 $h = \dfrac{n(0) - n_o}{W}$

$$J_n(x) = qD_n \frac{dn(x)}{dx} = \begin{cases} -hqD_n & 0 \le x \le W \\ 0 & x > W \end{cases}$$



(b) $J_n = q\mu_n n\mathscr{E} + qD_n \dfrac{dn}{dx} = 0$

$$\mathscr{E} = -\frac{D_n}{\mu_n}\,\frac{1}{n}\,\frac{dn}{dx} = \begin{cases} \dfrac{V_T h}{n(0) - hx} & 0 < x < W \\ 0 & x > W \end{cases}$$



(c) $V = \displaystyle\int_0^W \mathscr{E}(x)\,dx = \int_0^W \frac{V_T h}{n(0) - hx}\,dx$

$$= -V_T \ln\left(n(0) - hx\right)\Big|_0^W$$

$$= -V_T \ln\left(n(0) - hW\right) + V_T \ln(0)$$

$$= -V_T \ln\frac{n_0}{n(0)} = +3V_T \ln 10$$

$$= +173\ (mV)$$

1-17 試對開路非均質半導體證明式（1-40）。

解：設　$J_n = 0$

$$\mathscr{E}(x) = -\frac{V_T}{n}\,\frac{dn}{dx}$$

由　$\mathscr{E}(x) = -\dfrac{dV}{dx} \Rightarrow dV = V_T \dfrac{dn}{n}$

$$V_{21} = V_2 - V_1 = V_T \ln\frac{n_2}{n_1}$$

$$n_2 = n_1\, \mathscr{E}^{V_{21}/V_T}$$

$$n_1 = - n_2\, \mathscr{E}^{-V_{21}/V_T}$$

1-18 試就圖 1-10(b) 的步級接面，在考慮電子電流 $J_n = 0$ 的條件下，證明式（1-42）（即接觸電位V_o的表示式）。

解：由問題 1-17 得 $V_{21} = V_T \ln \dfrac{n_2}{n_1}$

而在步級接面，$J_n = 0$

因為 $n_2 = n_{no}$ ，$n_1 = n_{po}$

$\therefore \quad V_o = V_{21} = V_T \ln \dfrac{n_{no}}{n_{po}}$

1-19 在圖 1-10(b) 的接面中，每 10^6 個矽原子摻入 1 個受體原子，試計算在室溫時的接觸電位V_o 。

解：$N_A = \dfrac{5\times10^{22}}{10^6} = 5\times10^{16}\,(\text{cm}^{-3})$

$P_{po} = N_A \qquad P_{no} = 1.45\times10^{10}\,(\text{cm}^{-3})$

$V_o = V_{21} = V_T \ \ln \dfrac{5\times10^{16}}{1.45\times10^{10}} = 0.389\,(V)$

1-20 假設N_D變化 2500 倍，而N_A維持不變，試計算開路 p_n 接面在 300°K 時接觸電位的變化。

解：$V_{01} = V_T \ln \dfrac{N_{A_1} N_{D_1}}{n_i^{\,2}} \qquad V_{02} = V_T \ln \dfrac{N_{A_2} N_{D_2}}{n_i^{\,2}}$

$\because N_{D_2} = 2500 N_{D_1} \qquad N_{A_2} = N_{A_1}$

$V = V_{02} - V_{01} = V_T \ \ln \dfrac{N_{D_2}}{N_{D_1}} = 0.0259 \ \ln \ 2500 = 202.6\,(mV)$

1-21 (a) 重做習題 1-20，但假定N_D不變而N_A變化 8000 倍。

(b) (a)小題的答案是否受N_A增加或減少的影響？試簡要解釋之。

解：(a) $V = V_{02} - V_{01} = V_T \ \ln \dfrac{N_{A_2}}{N_{A_1}} = 0.0259 \ \ln 8000 = 232.7\,(mV)$

(b) 由 P39（1-43）式知 $V_o = V_T \ \ln \dfrac{N_A N_D}{n_i^{\,2}}$

可知V_o之值與 $N_A N_D$之乘積有關。

1-22 某步級S_i接面兩側的電阻率分別是 5Ω-cm （ p 型側）和 2.5Ω-cm （n 型側）試計算電位障 V_o 。

解：$\dfrac{1}{\rho}=\sigma=nq\mu_n \qquad \dfrac{1}{2.5}=n\times1.6\times10^{-19}\times1500$

$n=1.67\times10^{15}=N_D$

$\dfrac{1}{\rho}=\sigma=pq\mu_P \qquad \dfrac{1}{5}=p\times1.6\times10^{-19}\times475$

$p=2.63\times10^{15}=N_A$

$$V_o=V_T\ \ln\frac{1.67\times10^{15}\times2.63\times10^{15}}{(1.45\times10^{10})^2}=615\ (mV)$$

1-23 重做習題 1-22 ，但兩側的電阻率大小對換。

解：$N_A=5.26\times10^{15} \qquad N_D=8.33\times10^{14}$

$$V_o=V_T\ \ln\frac{5.26\times10^{15}\times8.33\times10^{14}}{(1.45\times10^{10})^2}=615\ (mV)$$

因爲 V_o 之值與 N_AN_D 之乘積有關，故 N_A，N_D 之值互換，V_o 値不變。

補充題

1-1 定義電場密度。

解：電場密度 ξ ，可用以描述帶電粒子在空間中受力作用之情形。
即 $\vec{F}=q\vec{\xi}$，其中 $\vec{F}$，$\vec{\xi}$ 均爲向量，q 爲帶電量。
由上式可知，帶正電粒子受力之方向即電場之方向，ξ 即單位電荷所受之力。

1-2 定義位能。

解：位能爲電位乘以所考慮的電荷。

$U\equiv qV$

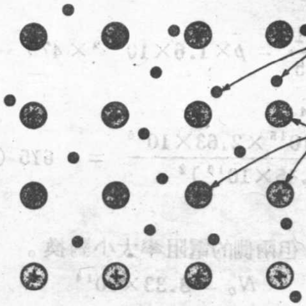
1-3 試定義何謂一個電子伏特。

解：電子伏特爲能量單位，一個電子降下一伏特的位能所增加之動能，電子伏特大小爲 1.60×10^{-19} 焦耳。

1-4 提出金屬的電子氣體說。

解：金屬爲包括甚多且緊密束縛之離子、並且在離子間充滿著能自由運動

之電子區域所構成者，如圖1－2所示，黑影區表原子核之正電荷與被緊束之內層電子，黑點代表可自由運動之價電子。



1-5 爲移動率下一定義。

解： 電荷之移動率定義爲

$$\mu = \frac{v}{\varepsilon}$$

v 爲電荷之速率，ε 爲外加電場。

1-6 爲傳導係數下一定義。

解： 傳導係數爲電流密度與電場強度之比值

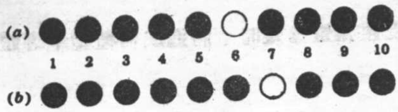
$$\sigma = \frac{J}{\varepsilon} \text{或者} \sigma = ne\mu$$

1-7 解釋爲何在0°K時半導體的作用如同絕緣體？

解： 當0°K時半導體內近於圖1－5所示的理想狀態，因爲沒有自由的載電體，故其性能像個絕緣體，在室溫（300°K）下，由於加於晶體內的熱能會使共價鍵斷裂，故可傳導，因此傳導率隨之增加。

1-8 何謂電洞？電洞爲何能對傳導有所貢獻。

解： 半導體電子游離後，產生不完整之共價鍵空缺稱爲電洞。
當價鍵不完整時，則有電洞存在，此時鄰近原子之價電子極易離開其共價鍵而填滿此洞，當電子由共價鍵離開而填入此洞時，又留下空缺。因此電洞之移動等效於電子之反向移動，如下圖。



1-9　(a)規定電洞的本質濃度。

(b)這密度和電子的本質濃度之間的關係爲何？

解：(a)　純半導體中，當平衡時的電洞濃度即爲本質濃度。

(b)　電洞與電子本質濃度應等於半導體之本質濃度

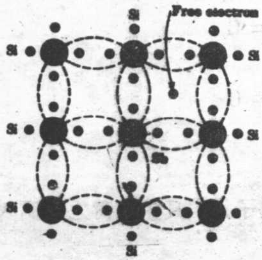
$$p = n = n_i$$

1-10　本質半導體和非本質半導體有何區別？

解：　將本質半導體注入任何雜質即爲非本質半導體。

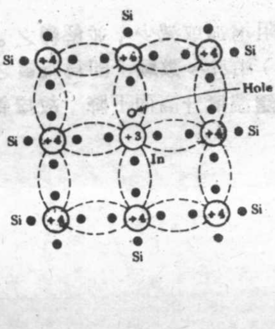
1-11　（在二維內）畫出含有一個施體雜質原子的矽的晶體構造。

解：



1-12　爲一個受體雜質原子重做 1-11 題。

解：



1-13 當矽分別以(a)施體(b)受體雜質摻雜時，將造成何種型半導體？

解：(a) 施體：N型矽

(b) 受體：P型矽

1-14 試敍述質量－作用定律。

解：在熱平衡時，無論所摻入之施體與受體之數目為何，其負電荷濃度與正電荷濃度之乘積均等於定值，即

$$np = n_i^2 = A_0 T^3 e^{-E_{G_0}/KT}$$

1-15 一但半導體分別被摻以濃度為 N_D 和 N_A 的施體與受體雜質。寫出能決定電子與電洞濃度（ n 和 p ）的方程式來。

解：由電荷中性定律

$$N_D + p = N_A + n$$

(a) 由 $pn = n_i^2$ 代入上式得

$$n^2 + (N_A - N_D) n - n_i^2 = 0$$

(b) 由 $pn = n_i^2$ 代入上式消去 n 得

$$p^2 + (N_D - N_A) P - n_i^2 = 0$$

1-16 試描述複合。

解：其物理意義為具負電荷之自由電子掉入具正電荷之電洞內而損失可動載體對。

1-17 規定一個載體的平均壽命期。

解：載體由產生至複合消失前存在之生存時間謂之平均壽命期。

1-18 當溫度升高時，摻雜半導體之電阻增加或減少，並解釋之。

解：溫度升高時，（100°K～600°K）由於多數載子即為雜質之濃度，不受 n_i 變化之影響，而由於可動性隨溫度升高而下降，故摻雜半導體之電阻隨溫度升高而升高。

1-19 就本質半導體重做習題 1-18 。

解：由於 $n_i^2 = A_0 T^3 e^{-E_{G0}/KT}$

而本質半導體之導電性完全由n_i決定，故可動性(mobility)之影響不大⇒本質半導體之電阻隨溫度升高而降低。

1-20 規定溫度的伏特當量。

解： $$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11,600}$$

1-21 擴散發生之狀況爲何？

解： 擴散現象即分子由高濃度處流向低濃度處之現象，故只有在濃度梯度(concentration gradient)不爲零時即$\nabla P \neq 0$（P爲粒子數）才會發生擴散。

1-22 定義下列之擴散常數(a)電洞(b)電子。

解：(a) 定義爲$D_p = \dfrac{\Delta v_p \Delta x_p}{2}$，$\Delta v_p$爲電洞之平均熱速度，$\Delta x_p$爲電洞平均自由路徑。

(b) $D_n = \dfrac{\Delta v_n \Delta x_n}{2}$，$\Delta v_n$及$\Delta x_n$分別爲電子之熱速度及平均自由路徑。

1-23 擴散和漂移是否相關？若是，如何相關？

解： 擴散正比於D（擴散常數）
漂移正比於μ（可動性）
兩者皆爲熱力現象有$\dfrac{D}{\mu} = V_T$之關係，故二者有關。

1-24 (a)寫出半導體中靜電子流的方程式。各項物理意義爲何？
(b)對金屬而言，這方程式當如何修正？

解：(a) 靜電子流爲$J_n = q\mu_n n\varepsilon + qD_n\dfrac{dn}{dx}$，第一項爲漂移電流；第二項爲擴散電流。

(b) 在金屬中並無濃度梯度存在，故僅有漂移電流，無擴散電流存在。

1-25 爲漸變半導體下一定義。