

微電子學

問題詳解

上冊

原著者 Millman · Grabel

曉園出版社

世界圖書出版公司

期 阳 三

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 $\frac{1}{2}$

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

TN4-44

3

371527

期 限

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。本书是上册。

微电子学问题详解 下册

· 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 1/32

1992年2月第1次印刷 印张：17.25

印数：0,001—2,000

ISBN7-5062-1179.3/TN.7

定价：12.40 元

世界图书出版公司通过中华版权代理有限公司

购得重印权限国内发行

TN4-44

3.2

371519

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，作一番介紹與鋪路的工作。

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 冊 目 錄

第一章	半導體.....	1
第二章	PN接合面二極體.....	15
第三章	雙極接面電晶體.....	61
第四章	場效電晶體.....	101
第五章	積體電路製造.....	137
第六章	基本邏輯(數位)電路.....	159
第七章	組合數位電路.....	209
第八章	序向電路與系統.....	257
第九章	超大型基本電路系統.....	297

微電子學問題詳解

下 冊 目 錄

第 十 章	低頻下之基本放大級.....	331
第十一章	放大器的頻率響應.....	417
第十二章	反饋放大器.....	497
第十三章	回饋放大器的響應及穩定性.....	557
第十四章	運算放大器的特性.....	631
第十五章	波形產生器及波形整形.....	693
第十六章	訊號調整及資料轉換.....	763
第十七章	動力系統及迴路.....	833

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，且末速為 $9.4 \times 10^6 \text{ m/s}$ ，試求 V 的值。

解： $qV = \frac{1}{2}mv^2$

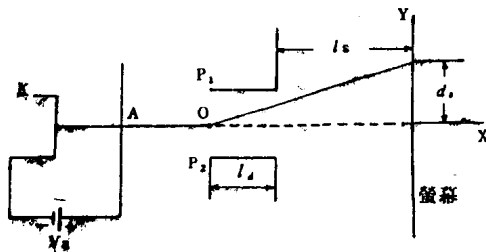
$$V = mv^2 / 2q = \frac{9.11 \times 10^{-31} \times (9.4 \times 10^6)^2}{2 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 251.5 (V)$$

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 ，試求 V 的值使電子到達另一電板時的速度為零。

解： $qV = \frac{1}{2}mv^2 = 10^{-17}$

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

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_k ，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 。



2 微電子學問題詳解

- 將電子經過 A 時的速度 v_x 當作 V_a 的函數求出來。
- 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_a , d , 和 v_x 的函數而求出來。
- 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。
- 當 $V_a = 1.0$ 仟伏, $V_p = 100$ 伏特, $l_a = 1.27$ 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。
- 如果我們希望電子束的偏轉 $d_s = 5$ 厘米, V_a 之值必須為何?

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

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

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

- (c) 電子飛出平板 P_1 , P_2 後, x, y 軸之速度分量皆為常數, 電子跨越 l_s 所需之時間為 $t_1 = l_s / v_x$

在這段時間中, 電子沿 y 軸走了: (V_p 代 b 部份)

$$\Delta y = v_y t_1 = \frac{q}{m} \frac{V_p l_a}{d v_x} \cdot \frac{l_s}{v_x} = \frac{q}{m} \frac{l_a l_s}{d} \frac{V_p}{v_x^2}$$

由(a)將 v_x 值代入得:

$$d_s = \Delta y = \frac{1}{2} \frac{l_a l_s}{d} \frac{V_p}{V_a}$$

- (d) $v_x = \sqrt{2 \times 1.759 \times 10^{-11} \times 10^5} = 1.874 \times 10^7 \text{ m/s}$

$$v_y = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1.27 \times 10^{-2} \times 100}{9.11 \times 10^{-31} \times 0.5 \times 10^{-2} \times 1.874 \times 10^7} \\ = 2.38 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$d_s = \frac{1}{2} \frac{l_a l_s}{d} \frac{V_p}{V_a} = \frac{1}{2} \frac{1.27 \times 20}{0.5} \frac{100}{10^5} = 2.54 \text{ cm}$$

- (e) $5 = \frac{1}{2} \frac{1.27 \times 20}{0.5} \frac{100}{V_a}$

$$V_a = 508 \text{ V}$$

，如流通 50mA 的電流時壓降為何？

$$\text{解： } R = \rho \frac{L}{A} = 3.44 \times 10^{-8} \times \frac{5 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-4} \times 10^{-6}} = 0.86 (\Omega)$$

$$V = IR = 50 \times 0.86 = 43 (\text{mV})$$

1-5 同習題 1-4 的鋁條，如壓降為 30mV 時其上的電流是多少？

$$\text{解： } R = 0.86 \Omega$$

$$I = V/R = \frac{30 \times 10^{-3}}{0.86} = 3.49 \times 10^{-2} (\text{A})$$

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。

$$\text{解： (a) } W = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(\mu E)^2$$

$$E = \left[\frac{2 \times 1.1 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.11 \times 10^{-31} \times (1500 \times 10^{-4})^2} \right]^{1/2} = 41.4 (\text{kv/cm})$$

(b) 不能。

因為在實際上無法產生 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。

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

$$R = \frac{L}{\sigma A} = 230000 \times \frac{5 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-4} \times 10^{-6}} = 5.75 \times 10^{10} (\Omega)$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{30 \times 10^{-3}}{5.75 \times 10^{10}} = 5.22 \times 10^{-13} (\text{A})$$

1-8 已知鋁的密度是 $2.70 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，電阻率是 $3.44 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$ ，假定每個鋁 (Al) 原子有 3 個價電子且原子量為 26.98，試計算鋁中自由電子的移動率。

4 微電子學問題詳解

$$\text{解: } n = 3 \times 6.02 \times 10^{23} \times \frac{2.7 \times 10^3 \times 10^3}{26.98} \text{ (1/m}^3\text{)} = 1.806 \times 10^{28} \text{ (1/m}^3\text{)}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = nq\mu \quad \frac{1}{3.44 \times 10^{-8}} = 1.806 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times \mu$$

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

1-9 (a) 已知矽中摻入的施體原子濃度 $N_D = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 受體原子濃度 $N_A = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 試求此半導體在 300°K 時的自由電子和電洞濃度。

(b) 以上半導體為 p 型或 n 型?

$$\begin{aligned} \text{解: (a)} \quad N_D + p &= N_A + n & 2 \times 10^{14} + p &= 3 \times 10^{14} + n \\ p &= n + 10^{14} & n p &= n_i^2 = 2.1025 \times 10^{20} \\ n^2 + 10^{14}n - 2.1025 \times 10^{20} &= 0 & n &= 2.1 \times 10^6 \\ p &= n_i^2 / n = 1.001 \times 10^{14} \end{aligned}$$

(b) (a) 中所取的樣品是 p 型矽。

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

解: (a) 因為 $N_A = N_D$, 故為本質矽, 電子電洞數相同。

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

(b) 所取的樣品是本質矽。

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

$$\begin{aligned} \text{解: (a)} \quad \because N_D \gg N_A \\ \therefore n \approx N_D = 10^{16} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \\ \therefore p = n_i^2 / n = 2.01 \times 10^4 \text{ (cm}^{-3}\text{)} \end{aligned}$$

(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 $0.02 \Omega \cdot \text{cm}$, 試求其電子和電洞濃度。

(b) 重做(a), 但改為 n 型矽半導體。

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

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = q p \mu_p$$

$$\frac{1}{0.02} = 1.6 \times 10^{-19} \times p \times 475$$

$$p = 6.58 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad p \approx n_i^2$$

$$n = 3.2 \times 10^2 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

$$(b) \quad \frac{1}{0.02} = 1.6 \times 10^{-19} \times n \times 1500$$

$$n = 2.08 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad p = 1.01 \times 10^3 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

1-13 重做習題 1-12，但電阻率改為 $5\Omega\text{-cm}$ 。

解：(a) 因為是 p 型矽，故載子數 $= n + p \approx p$

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = q p \mu_p \quad \frac{1}{5} = 1.6 \times 10^{-19} \times p \times 475$$

$$p = 2.63 \times 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad n = 7.9 \times 10^4 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

$$(b) \quad \frac{1}{5} = 1.6 \times 10^{-19} \times n \times 1500$$

$$n = 8.3 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad p = 2.5 \times 10^5 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

1-14 純矽中加入施體雜質，使電阻率降為 $1\Omega\text{-cm}$ ，試計算每單位體積中施體雜質對 S_i 原子的比例。

$$\text{解：} \quad n = \frac{\sigma}{q\mu} = \frac{1}{\rho q\mu} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 1500} = 4.16 \times 10^{15}$$

$$\text{ratio} = \frac{4.16 \times 10^{15}}{5 \times 10^{22}} = 0.833 \times 10^{-7}$$

1-15 若矽為單價之金屬，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 之傳導係數為

$$\sigma_i = N_i q (\mu_n + \mu_p) = (1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})$$

$$(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1300 + 500) \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$$

$$= 4.32 \times 10^{-6} (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

若矽為單價之金屬，此時其傳導係數

$$\sigma_s = nq\mu_n$$

6 微電子學問題詳解

$$\begin{aligned}
 &= 4.99 \times 10^{22} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1,300 \\
 &= 1.04 \times 10^7 (\Omega - \text{m})^{-1} \\
 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} &= \frac{1.04 \times 10^7}{4.32 \times 10^{-6}} = 2.39 \times 10^{12}
 \end{aligned}$$

1-16 已知某半導體的電子濃度分布如下圖。

- 假定無外加電場，試導出並畫出電子電流密度 $J_n(x)$ 。
- 若淨電子電流為零，試畫出並導出內建電場的關係。
- 試決定點 $x = 0$ 和 $x = W$ 之間的電位，已知 $n(0)/n_o = 10^3$ 。

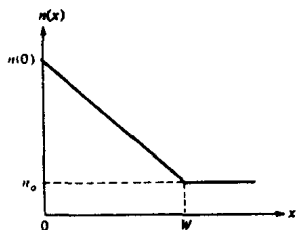
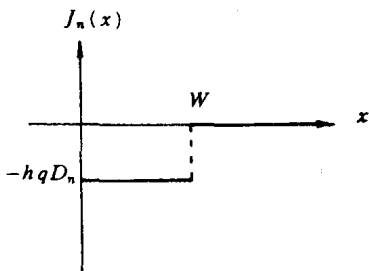


圖 1 - 16

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

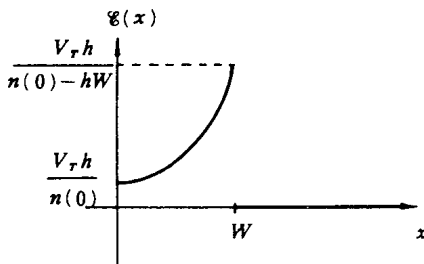
$$= \begin{cases} n(0) - hx & 0 < x < W \\ n_o & x > W \end{cases}$$
其中
$$h = \frac{n(0) - n_o}{W}$$

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



$$(b) \quad J_n = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

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



$$\begin{aligned} (c) \quad V &= \int_0^W \mathcal{E}(x) dx = \int_0^W \frac{V_T h}{n(0) - hx} dx \\ &= -V_T \ln(n(0) - hx) \Big|_0^W \\ &= -V_T \ln(n(0) - hW) + V_T \ln(n(0)) \\ &= -V_T \ln \frac{n_0}{n(0)} = +3 V_T \ln 10 \\ &= +173 \text{ (mV)} \end{aligned}$$

1-17 試對開路非均質半導體證明式(1-40)。

解：設

$$J_n = 0$$

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

由

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{dV}{dx} \Rightarrow dV = V_T \frac{dn}{n}$$

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

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

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

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

而在步級接面， $J_n = 0$

因為 $n_2 = n_{n0}$ ， $n_1 = n_{p0}$

$$\therefore V_o = V_{21} = V_T \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}}$$

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： $N_A = \frac{5 \times 10^{22}}{10^6} = 5 \times 10^{16} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$

$$P_{P0} = N_A \quad P_{n0} = 1.45 \times 10^{10} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

$$V_o = V_{21} = V_T \ln \frac{5 \times 10^{16}}{1.45 \times 10^{10}} = 0.389 \text{ (V)}$$

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： $V_{o1} = V_T \ln \frac{N_{A1} N_{D1}}{n_i^2} \quad V_{o2} = V_T \ln \frac{N_{A2} N_{D2}}{n_i^2}$

$$\therefore N_{D2} = 2500 N_{D1} \quad N_{A2} = N_{A1}$$

$$V = V_{o2} - V_{o1} = V_T \ln \frac{N_{D2}}{N_{D1}} = 0.0259 \ln 2500 = 202.6 \text{ (mV)}$$

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) $V = V_{o2} - V_{o1} = V_T \ln \frac{N_{A2}}{N_{A1}} = 0.0259 \ln 8000 = 232.7 \text{ (mV)}$

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

可知 V_o 之值與 $N_A N_D$ 之乘積有關。

1-22 某步級 S 接面兩側的電阻率分別是 $5\Omega\cdot\text{cm}$ (p 型側) 和 $2.5\Omega\cdot\text{cm}$

(n 型側) 試計算電位障 V_o 。

$$\begin{aligned} \text{解: } \frac{1}{\rho} &= \sigma = nq\mu_n & \frac{1}{2.5} &= n \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1500 \\ n &= 1.67 \times 10^{15} = N_D \\ \frac{1}{\rho} &= \sigma = pq\mu_p & \frac{1}{5} &= p \times 1.6 \times 10^{-19} \times 475 \\ p &= 2.63 \times 10^{15} = N_A \\ V_o &= V_T \ln \frac{1.67 \times 10^{15} \times 2.63 \times 10^{15}}{(1.45 \times 10^{10})^2} = 615 \text{ (mV)} \end{aligned}$$

1-23 重做習題 1-22，但兩側的電阻率大小對換。

$$\begin{aligned} \text{解: } N_A &= 5.26 \times 10^{15} & N_D &= 8.33 \times 10^{14} \\ V_o &= V_T \ln \frac{5.26 \times 10^{15} \times 8.33 \times 10^{14}}{(1.45 \times 10^{10})^2} = 615 \text{ (mV)} \end{aligned}$$

因為 V_o 之值與 $N_A N_D$ 之乘積有關，故 N_A, N_D 之值互換， V_o 值不變。

補充題

1-1 定義電場密度。

解：電場密度 $\vec{\xi}$ ，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 $\vec{F}$ ， $\vec{\xi}$ 均為向量， q 為帶電量。
由上式可知，帶正電粒子受力之方向即電場之方向， $\vec{\xi}$ 即單位電荷所受之力。

1-2 定義位能。

解：位能為電位乘以所考慮的電荷。

$$U \equiv qV$$

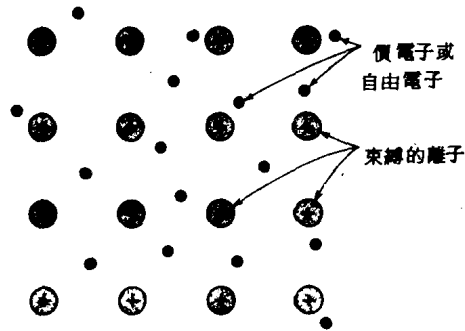
1-3 試定義何謂一個電子伏特。

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

1-4 提出金屬的電子氣體說。

解：金屬為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 為移動率下一定義。

解： 電荷之移動率定義為

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

v 為電荷之速率， ϵ 為外加電場。

1-6 為傳導係數下一定義。

解： 傳導係數為電流密度與電場強度之比值

$$\sigma = \frac{J}{\epsilon} \text{ 或者 } \sigma = n e \mu$$

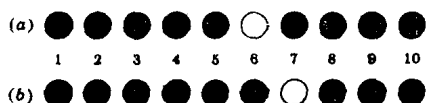
1-7 解釋為何在 0°K 時半導體的作用如同絕緣體？

解： 當 0°K 時半導體內近於圖 1-5 所示的理想狀態，因為沒有自由的載電體，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？電洞為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為電洞。

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為何？

解： (a) 純半導體中，當平衡時的電洞濃度即為本質濃度。

(b) 電洞與電子本質濃度應等於半導體之本質濃度

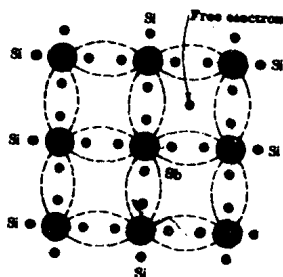
$$p = n = n_i$$

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為非本質半導體。

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 為一個受體雜質原子重做 1-11 題。

解：

