

INTEGRATED ELECTRONICS

積體電子學題解

MILLMAN
HALKIAS

原著

薛興國
謝祖望 合譯

啟學科技系列

7.70

- 周賢溪編著
實用自動控制入門..... 6.00
- 陳憲雄編著
圖解自動控制一入門篇..... 10.00
- 陳憲雄編著
圖解自動控制一實用篇..... 10.00
- 陳憲雄編著
工業電氣與自動控制實務..... 24.00
- 陳憲雄編著
實用順序控制回路解說..... 10.00
- 黃博治編著
自動化・省力化實用圖集..... 10.00
- 謝賢仁、簡輝龍編著
電氣接線圖入門..... 8.00
- 陳憲雄、謝賢仁編著
產業控制系統接線圖..... 18.00
- 陳憲雄編著
電力控制系統接線圖..... 18.00
- 周賢溪、施成惠編著
鑽模與夾具實例要覽..... 10.00
- 曾金龍編著
Hi-Fi 擴大器..... 8.00
- 黃政協編著
錄音機原理..... 8.00
- 簡章華、林昆龍編譯
音響技術..... 16.00
- 黃政協編譯
AM-FM 收音機原理..... 15.00
- 陳逢春編著
實用電晶體電路設計..... 14.00
- 林昆龍編譯
電晶體迴路設計與分析..... 18.00
- 洪添進編譯
電子計算器..... 8.00
- 崔承慰編著
空調原理與維修..... 14.00
- 陳文華編著
實用揚聲器技術..... 10.00
- 簡世源編譯
微型電腦..... 20.00

啟學科技系列

香港彌敦道榮德商業大廈808室

出版者：啟學出版社

九龍官塘鴻圖道偉強工業大廈二樓

承印者：美都印刷公司

版權所有 請勿翻印

PUBLISHED & PRINTED IN HONG KONG

H. K. \$16.00

積體電子學習題詳解

目次

第一章	固體中之能帶	1
第二章	半導體中之傳導現象	17
第三章	雙極半導體之特性	29
第四章	雙極體電路	50
第五章	電晶體特性	75
第六章	數位電路	96
第七章	積體電路：製造與特性	131
第八章	低頻電晶體	143
第九章	電晶體偏壓與熱穩定	197
第十章	場效電晶體	221

目錄

Ch.11	The transistor at High Freq.	P 255
Ch.12	Multistage Amp.	P 267
Ch.13	Feedback Amp.	P 279
Ch.14	Stability and Oscillators	P 294
Ch.15	Operational Amp.	P 315
Ch.16	<u>Integrated Ckts as Analog Sys. Building Blocks</u>	<u>P 332</u>
Ch.17	<u>Integrated Ckts as Digital Sys. Building Blocks</u>	<u>P 353</u>
Ch.18	Power Ckts and Systems	P 380
Ch.19	Semiconductor-device Physics	P 394

第一章 固體中之能帶

- 1-1. (a) 平面平行電容器二極板之間的距離為1厘米，一電子由負極從靜止出發，若加一直流1,000伏則電子需若干時間到達正極？
- (b) 在路徑之始初末作用於電子的力的大小為何？
- (c) 末速度為何？
- (d) 若一峰值1,000伏且60赫之正弦電壓加上，則需時若干？假設當加電壓通過零時，電子以零之初速被擊出。(提示：將正弦波展為級數，即 $\sin \theta = \theta - \theta^3/3! + \theta^5/5! - \dots$)

(解)：(a) 由運動公式知 $x = \frac{1}{2}at^2$ (初速度為零)，其中加速度 a ，

$$a = \frac{F_{\text{電}}}{m} = \left(\frac{e}{m}\right) \left(\frac{V}{d}\right) \text{ 代入，則}$$

$$t = \left(\frac{2x}{a}\right)^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2x}{\left(\frac{e}{m}\right)\left(\frac{V}{d}\right)}\right]^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2 \times 10^{-2}}{\sqrt{6} \times 10^{18} \times 10^3 / 10^{-2}}\right)^{\frac{1}{2}} = 1.065 \times 10^{-9} \text{ 秒}$$

(b) 初作用力等於 末作用力：

$$f = e \frac{V}{d} = \frac{1.602 \times 10^{-19} \times 10^3}{10^{-2}} = 1.602 \times 10^{-14} \text{ 牛頓}$$

(c) 末速度 $v_f = at = \left(\frac{f}{m}\right) \cdot t$

$$= \left(\frac{1.602 \times 10^{-14}}{9.10 \times 10^{-31}}\right) \times 1.065 \times 10^{-9} = 1.87 \times 10^7 \text{ 米/秒}$$

(d) 加速度 $a = \left(\frac{e}{m}\right) E = 1.76 \times 10^{11} \times \frac{10^3}{10^{-2}} \sin 377\pi t$

$$= 1.76 \times 10^{16} \sin 377\pi t \quad (377 = 2\pi f = 2\pi \times 60)$$

$$\text{瞬時速度 } v = \int_0^t a dt = \left(\frac{1.76 \times 10^{16}}{377}\right) [1 - \cos 377\pi t]$$

$$= 4.67 \times 10^{13} (1 - \cos 377\pi t)$$

$$\text{距離 } x = \int_0^t v dt = 4.67 \times 10^{13} \left(t - \frac{1}{377} \sin 377\pi t\right)$$

$$= 1.24 \times 10^{-11} (0 - \sin 0) \quad (\text{令 } 0 = 377\pi t \text{ 代入})$$

1-1. (Cont)

$x_{max} = 0.01$ 米, 由(a)知 $\theta \ll 1$, 將 $\sin \theta$ 展開取前二項,

$$\text{得 } 0.01 = 1.24 \times 10^{-10} \left[\theta - (\theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \dots) \right]$$

$$0.01 \approx 2.07 \times 10^{-10} \theta^3$$

$$\theta \approx 7.85 \times 10^{-5} \quad \text{即 } x = \frac{\theta}{2\pi} \approx \frac{7.85 \times 10^{-5}}{2\pi} \approx 2.08 \times 10^{-7} \text{ 米}$$

1-2. 平行板電容器的板間距離為 d 米, 今一電子在 $t=0$ 以初速 v_0 (米/秒) 垂直底板射出, 頂板與底板之相對電位為 $-V_m \sin \omega t$

(a) 求在任一時間 t , 電子的位置.

(b) 求當電子速度為 0 之瞬時電場強度.

(解): (a) 加速度 $a = -(\frac{e}{m})(\frac{V_m}{d}) \sin \omega t$

$$\text{瞬時速度 } v = v_0 + \int_0^t a dt = v_0 + (\frac{e}{m})(\frac{V_m}{\omega d})(\cos \omega t - 1)$$

$$x = x_0 + \int_0^t v dt = (v_0 - \frac{e}{m} \cdot \frac{V_m}{\omega d})t + (\frac{e}{m})(\frac{V_m}{\omega^2 d}) \sin \omega t$$

(b) 當 $v=0$, 即 $\cos \omega t = 1 - v_0 \cdot (\frac{m}{e})(\frac{\omega d}{V_m})$

$$\text{電場強度 } E = \frac{V_m \sin \omega t}{d}$$

$$= \frac{V_m}{d} [1 - \cos^2 \omega t]^{\frac{1}{2}} = \frac{V_m}{d} [1 - (1 - \frac{v_0 m \omega d}{e V_m})^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{V_m}{d} [\frac{2 v_0 m \omega d}{e V_m} - (\frac{v_0 m \omega d}{e V_m})^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$= (\frac{V_m k m \omega}{e d}) [2 - \frac{v_0 m \omega d}{e V_m}]^{\frac{1}{2}}$$

1-3. 一電子以 0 之初速由一對水平極片之底片射出, (距離 3 厘米), 兩極片之加速電壓為由 0 增加, 其線性增加率為 10 伏/微秒, 當電子離開底片 2.8 厘米時, 反向電壓改為 50 伏,

(a) 電子反向之瞬間, 二片間之瞬時電壓為若干?

(b) 電子會撞到那一極片?

1-3. (Cont)

(c) 电子在极间之飞行时间为若干?

(d) 电子之碰撞速度为若干?

(解): (a) 由题知, 加速度为

$$a = \left(\frac{e}{m} \right) \left(\frac{V}{d} \right) = (1.76 \times 10^{11}) \times \left(\frac{10^3}{3 \times 10^{-2}} \right) = 5.86 \times 10^{19} \text{ m/sec}^2$$

瞬时速度 $v = \int_0^t a dt = 2.93 \times 10^{19} t^2$

距離 $x = \int_0^t v \cdot dt = 9.77 \times 10^{18} t^3$

当 $x = 2.8 \times 10^{-2}$ 吋

$$t = t_1 = (2.8 \times 10^{-2} / 9.77 \times 10^{18})^{1/3} = 1.42 \times 10^{-7} \text{ 秒}$$

此时瞬息电压为 $V = 10^3 t = 10^3 \times 1.42 \times 10^{-7} = 1.42 \text{ 伏}$

(b) 在反向瞬间 t_1 , 其速度为

$$v_{t_1} = (2.93 \times 10^{19}) \times (1.42 \times 10^{-7})^2 = 5.88 \times 10^5 \text{ 米/秒}$$

反向後之加速度 $a_2 = \left(\frac{e}{m} \right) \left(\frac{V}{d} \right) = (1.76 \times 10^{11}) \times \left(\frac{50}{3 \times 10^{-2}} \right) = 2.93 \times 10^{14} \text{ m/sec}^2$

若假设电压反向後, 电子仍撞及上板, 所需时间 t_2

则 $x = 0.03 = 0.028 + v_{t_1} t_2 - \frac{1}{2} a_2 t_2^2$

$$0.03 = 0.028 + (5.88 \times 10^5) t_2 - 1.465 \times 10^{14} t_2^2$$

因共解为虚数, 即表示电子无法撞及上板

(c) 由 (b), 令 $x = 0 = 0.028 + v_{t_1} t_2 - \frac{1}{2} a_2 t_2^2$

$$0 = 0.028 + 5.88 \times 10^5 t_2 - 1.465 \times 10^{14} t_2^2 \quad \text{求 } t_2$$

得 $t_2 = 1.6 \times 10^{-8} \text{ 秒}$

故电子在极间飞行时间共计 $t_1 + t_2 = 1.58 \times 10^{-7} \text{ 秒}$

(d) $v = v_{t_1} - a_2 t_2$

$$= 5.88 \times 10^5 - (2.93 \times 10^{14}) \times (1.6 \times 10^{-8}) = -4.09 \times 10^6 \text{ 米/秒}$$

1-4. 一個100 eV的電子在二極板中間飛出，如圖所示，極板間電壓在 10^{-7} 秒內由0線性增加到50V後立刻降為0並停在0，極板間距離為2厘米，若電子於 $t=0$ 時進入二極板間，當離開極板時其軌道之偏移若干？

(解)：由題意，電場強度 $E = \frac{50t}{2 \times 10^{-2} \times 10^9} = 2.5 \times 10^{10} t$

$$\text{則 } a_y = \frac{e}{m} E = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 2.5 \times 10^{10} t}{1.65 \times 10^{-27}} \\ = 2.42 \times 10^{18} t \quad \text{m/sec}^2$$

$$v_y = \int_0^t a_y dt = 1.21 \times 10^{18} t^2 \quad \text{m/sec}$$

$$y = \int_0^t v_y dt = 0.4 \times 10^{18} t^3 \quad \text{m}$$

初速度 v_{0x} 可由初能100 eV 求出

$$\frac{1}{2} m v_{0x}^2 = \frac{1}{2} (1.65 \times 10^{-27}) v_{0x}^2 = 100 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$\therefore v_{0x} = 1.39 \times 10^5 \quad \text{m/sec}$$

當 $t = \frac{50 \times 10^{-2}}{1.39 \times 10^5} = 3.59 \times 10^{-7}$ 秒時電子離開極板，

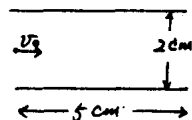
但當 10^{-7} 時，電子位移 $y_1 = 0.4 \times 10^{18} \times (10^{-7})^3 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$

由 10^{-7} 至 3.59×10^{-7} 秒間，加速度為0， v_y 為一常數

$$v_y = 1.21 \times 10^{18} \times (10^{-7})^2 = 1.21 \times 10^4 \quad \text{m/sec}$$

$$\text{故最後電子之位移 } y_2 = 1.21 \times 10^4 \times (3.59 - 1) \times 10^{-7} \\ = 3.14 \times 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$\text{故全部位移 } y_1 + y_2 = (0.4 + 3.14) \times 10^{-3} = 3.54 \times 10^{-3} \quad \text{m}$$



1-5. 電子被射入 5×10^3 伏/米電場強度之區域中，電子與水平成 30° ，電子的能量為100 eV，

(a) 假設電場朝下，如圖，電子離開電子鎗後多久才會通過經過一與電子鎗有3厘米水平距離之圓H？

1-5. (cont)

(b). 电子要穿过 H, 则 d 需若干?

(c). 若电场朝上, (a). (b) 之解若何?

(解): (a) 加速度 $a_y = \frac{e}{m} \cdot E = 1.76 \times 10^{11} \times 5 \times 10^3$
 $= 8.8 \times 10^{14} \text{ m/sec}^2$

由动能 100 eV 则 v_0 可求

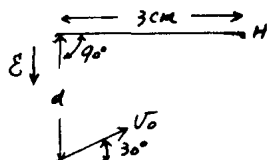
$$\frac{1}{2} m v_0^2 = 100 \text{ eV} \quad \text{得}$$

$$v_0 = \left[200 \times \left(\frac{e}{m} \right) \right]^{1/2} = 5.93 \times 10^6 \text{ m/sec}$$

$$v_{0x} = v_0 \cos 30^\circ = 5.93 \times 10^6 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 5.13 \times 10^6 \text{ m/sec}$$

$$v_{0y} = 5.93 \times 10^6 \times \sin 30^\circ = 2.97 \times 10^6 \text{ m/sec}$$

$$\text{则所需时间 } t = \frac{3 \times 10^{-2}}{v_{0x}} = \frac{3 \times 10^{-2}}{5.13 \times 10^6} = 5.84 \times 10^{-9} \text{ sec}$$



(b) $d = v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2$
 $= (2.97 \times 10^6)(5.84 \times 10^{-9}) + \frac{1}{2} (8.8 \times 10^{14})(5.84 \times 10^{-9})^2$
 $= 3.24 \text{ cm}$

(c) 若电场朝上, 但 v_{0x} 不变, 故 $t = 5.84 \times 10^{-9} \text{ sec}$,

但 $d = v_{0y} t - \frac{1}{2} a_y t^2$
 $= (2.97 \times 10^6)(5.84 \times 10^{-9}) - \frac{1}{2} (8.8 \times 10^{14})(5.84 \times 10^{-9})^2$
 $= 0.235 \text{ cm}$

1-6 (a). 一电子以可略去之初速由阴极, 而被 1000 V 之电压加速, 计算其末速为若干?

(b). 若以重氢离子 (原子量 2.01) 取代电子, 且初速为 10^5 米/秒, 末速若干?

(解): (a) 动能为 1000 eV, 故

$$\frac{1}{2} m v_f^2 = 1000 \text{ eV}$$

1-6. (Cont.)

$$U_f^2 = \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.11 \times 10^{-31}} \times 10^3 = 3.52 \times 10^{14}$$

$$U_f = (3.52 \times 10^{14})^{1/2} = 1.88 \times 10^7 \text{ m/sec.}$$

1b) 動能之改變 = 1000 eV

$$\frac{1}{2} m (U_f^2 - U_0^2) = 1000 \text{ eV}$$

$$U_f^2 = U_0^2 + \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^3}{2.0 \times 1.67 \times 10^{-27}} = 1.06 \times 10^{11}$$

$$\text{故 } U_f = (1.06 \times 10^{11})^{1/2} = 3.26 \times 10^5 \text{ m/sec.}$$

1-7. 在平行電極之一個表面上有一動能為 10^{-16} 焦耳之電子，垂直於表面進行，且受到加於二電極間之 400 伏電位之作用而減速。

(a) 電子能否到達第二極板？

(b) 需多大的阻擋電場使電子到達第二極板時之速度為 0？

(解): (a) 因 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳，故電子之能量為 $\frac{10^{-16}}{1.6 \times 10^{-19}} = 625 \text{ eV}$

因為電位為 400 V，故知電子擁有的能量足使電子到達第二極板。

(b) 若電位為 625 V，則電子到達時其動能，其速度為 0。

1-8. 在平行二極板中，二極板中之電位與距離之關係為 $V = kx^2$ ，其中 k 是常數。

(a) 電子離低電位極板之初速為 0，到達距 d 遠之高電位極板，需時若干？

(b) 並求其速度之方程式

(解): (a) $V = kx^2$ ，由動能之式子得

$$\frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = e k x^2 \quad \text{即} \quad \frac{dx}{dt} = \left(\frac{2ek}{m} \right)^{1/2} x$$

$$\text{積分} \quad \left(\frac{2ek}{m} \right)^{1/2} \int_0^d dt = \int_0^d x^{-1/2} dx.$$

$$1-0 (\text{const}) \left(\frac{2eK}{m} \right)^{1/2} x = 3x \text{ 为}$$

$$\text{当 } x=x \text{ 时, 需时 } t = \left(\frac{2eK}{m} \right)^{-1/2} x \text{ 为}$$

$$(b) \text{ 由 (a) } v = \frac{dx}{dt} = \left(\frac{2eK}{m} \right)^{1/2} x \text{ 为}$$

$$\text{但 } x \text{ 为 } \left(\frac{2eK}{m} \right)^{1/2} \cdot \frac{t}{3} \text{ 代入}$$

$$\text{得 } v = \left(\frac{2eK}{m} \right)^{1/2} \left[\left(\frac{2eK}{m} \right)^{1/2} \cdot \frac{t}{3} \right]^2 = \left(\frac{2eK}{m} \right)^{3/2} \cdot \frac{t^2}{9}$$

1-9 示波器阴极管之结构如下图所示。K与A间之电压 V_a , P_1 与 P_2 间为 V_p , 彼此无相互关系。电子以零初速度从K射出, 当通过 P_1, P_2 间同时由场作用改变其方向, 最终以恒速率向荧光幕S, P_1, P_2 相距 d 。

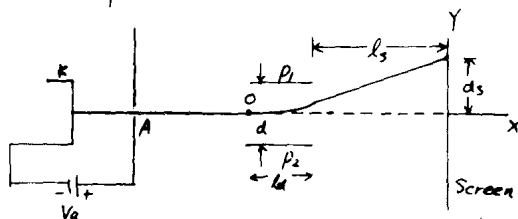
(a) 求电子通过A点时速度 U_x (V_a 之函数),

(b) 当电子穿过 P_1, P_2 极板后之Y向速度 U_y 若干 (V_p, d, U_x 之函数)

(c) 当电子到荧光幕时其中心相距 d_s 为若干 (l_s 及 V_a, V_p 之函数)

(d) 若 $V_a = 1.0 \text{ 伏}$, $V_p = 10 \text{ 伏}$, $d = 1.27 \text{ cm}$, $d = 0.475 \text{ 厘米}$, $l_s = 19.4 \text{ 厘米}$, 求 U_x, U_y 及 d_s

(e) 若需偏向10厘米, 则 V_a 需若干?



(解): (a) 电子间之能量改变为动能

$$\frac{1}{2} m U_x^2 = e V_a \quad \text{得} \quad U_x = \left(\frac{2e V_a}{m} \right)^{1/2}$$

$$(b) \text{ 通过极板之时间为 } t_1 = \frac{l_3 d}{U_x} = \frac{l_3 d}{\left(\frac{2e V_a}{m} \right)^{1/2}}$$

1-9 (cont) Y-向加速度 $a_y = (\frac{e}{m}) (\frac{V_p}{d})$

$$v_y = \int_0^t a_y dt = a_y t$$

$$\text{離開阴极之 } v_y = a_y \cdot t_1 = (\frac{eV_p}{md}) (\frac{ld}{(2eVa)^{1/2}})^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\frac{e}{m})^{1/2} (\frac{V_p ld}{d \sqrt{Va}})$$

(c) $\frac{v_x}{l_s} = \frac{v_y}{d_s}$ 即位移与速度成比例。

$$\text{得 } d_s = \frac{v_y}{v_x} \cdot l_s = l_s \cdot \frac{(\frac{e}{m})^{1/2} (\frac{V_p ld}{d \sqrt{Va}})^{1/2}}{(\frac{2eVa}{m})^{1/2}} = \frac{V_p l d l_s}{2 Va d}$$

$$(d). Va = 10^3; V_p = 10, ld = 1.27 \times 10^{-2}, d = 4.75 \times 10^{-3}, l_s = 1.94 \times 10^{-1}$$

代入得

$$v_x = (\frac{2eVa}{m})^{1/2} = 1.88 \times 10^7 \text{ m/sec}$$

$$v_y = (\frac{e}{2mVa})^{1/2} (\frac{V_p ld}{d}) = (\frac{1.76 \times 10^4}{2 \times 10^3})^{1/2} (\frac{10 \times 1.27 \times 10^{-2}}{4.75 \times 10^{-3}}) = 251 \times 10^5 \text{ m/sec}$$

$$d_s = \frac{V_p l d l_s}{2 Va d} = \frac{10 \times 1.27 \times 10^{-2} \times 1.94 \times 10^{-1}}{2 \times 10^3 \times 4.75 \times 10^{-3}} = 0.26 \text{ cm}$$

(e) 由 (d) $d_s = \frac{V_p l d l_s}{2 Va d}$ 知 Va 大则 d_s 大。

$$d_s Va = 2.6 \times 10^{-3} \times 10^3 = 2.6$$

$$\text{若 } d_s = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m} \text{ 则 } Va \text{ 需 } Va = \frac{2.6}{10^{-1}} = 26 \text{ 伏}$$

1-10. 一阴极射线枪的正极相距 0.5 厘米, 正极电位相对于负极为 10 伏,

(a) 若电子以 10^6 米/秒之初速离开阴极而射向阳极, 则电子可行多远?

(b) 需何种初速电子始得到达正极?

$$(\text{解}) (a) \text{ 电场 } \mathcal{E} = V/d = 10/5 \times 10^{-3} = 2 \times 10^3 \text{ 伏/米}$$

$$\text{由动能转换为位能之式 } \frac{1}{2} m v_0^2 = e \mathcal{E} x$$

$$x = \frac{m v_0^2}{2e\mathcal{E}} = \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 10^{12}}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^3} = 0.142 \text{ cm}$$

1-10 (cont)

(b) 若需電子到達正極，其動能至少要能克服電場，故

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = 10 \text{ eV}$$

$$\text{即 } v_0^2 = \frac{20 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.11 \times 10^{-31}} = 3.52 \times 10^2$$

$$\therefore v_0 = 1.88 \times 10^6 \text{ 米/秒}$$

此為電子能到達正極之最小初速。

1-11. 一物作由其平衡位置作位移 x ，所受之力 $f = -kx$ ，由能量之方法，試證，物作週期運動，其最大位移與其總能量之平方根成正比。

(解)：作用力 $f = -kx = m(\frac{d^2x}{dt^2})$ 即 $m\ddot{x} + kx = 0$

其解之形式為 $x = A \cos \omega t + B \sin \omega t$ ， $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

因 $t=0$ ， $x=0$ 得 $A=0$ ， $\therefore x = B \sin \omega t$ 為週期運動，

其速度 $v = \frac{dx}{dt} = B\omega \cos \omega t$

在任一瞬間，總能量 $= \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2$

$$\begin{aligned} T.E. &= \frac{1}{2} m B^2 \omega^2 \cos^2 \omega t + \frac{1}{2} k B^2 \sin^2 \omega t \\ &= k B^2 \end{aligned}$$

故 $B = (\frac{T.E.}{k})^{1/2}$ 即振幅與總能量平方根成正比。

1-12. 在地球重力場中，有一物作質量為 m ，以 v_0 之速度向上拋射。

(a) 證明當物作高度為 $v_0^2/2g$ 時，其速度會改變方向，

其中 g 為重力加速度

(b) 證明此轉向與相對應於位能棚之碰撞。

(解)：(a) 總能量 $w = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} m v^2 + mgh$

當 $v=0$ 時，物作高度為 $h = v_0^2/2g$ ，

之後，物作下降，故其方向改變。

1-12 (Cont)

(b) 在電力場中 加速度 $a = 8 \text{ E/m}$

$$\text{總能量 } W = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m v^2 + qEd$$

$$\text{當速度 } v=0 \text{ 時, 其飛行距離 } d = \frac{m}{2qE} v_0^2 = \frac{v_0^2}{2a}$$

1-13. (a) 試求 (1-13)

(b) 試求氦原子之可能半徑為

$$r = \frac{h^2 \epsilon_0 n^2}{\pi m q^2}$$

其中 n 為不為 0 之整數, 對於 $n=1$ 時, 此半徑為 $0.53 \text{ \AA}$

(解): (a) 由方程式 (1-12) $m v r = \frac{n h}{2\pi}$; n 為整數

由式 (1-8) $v = \left(\frac{q^2}{4\pi m \epsilon_0 r} \right)^{1/2}$ 代入上式得

$$\frac{n h}{2\pi} = \frac{m q r}{(4\pi m \epsilon_0 r)^{1/2}} \quad \text{故 } r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 q^2} \cdot \frac{4\pi \epsilon_0 m}{r} = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m q^2}$$

(b) 由 (a) $r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m q^2}$

$$\text{當 } n=1: r = \frac{(6.625 \times 10^{-34})^2 \times 10^{-9}}{\pi (9.11 \times 10^{-31})(1.6 \times 10^{-19})^2} = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m} = 0.53 \text{ \AA} \quad (A = 10^{-8} \text{ cm})$$

1-14. 試求氦原子中之電子環繞原子核一週需時

$$T = \frac{m h q^2}{4 \sqrt{2} \epsilon_0 (-W)^{3/2}}$$

其中所用符號見 1-4 節。

(解): 由 1-13 題

$$W_n = -\frac{q^2}{8\pi \epsilon_0 r} = -\frac{8^2 (\pi m q^2)}{8\pi \epsilon_0^2 n^2 A^2} = -\frac{m q^4}{8 n^2 A^2 \epsilon_0^2}$$

由式 (1-8) $v = \left(\frac{8^2}{4\pi m \epsilon_0 r} \right)^{1/2}$

1-14 (cont) 通共 $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r^{\frac{1}{2}}}{8} (4\pi m \epsilon_0)^{\frac{1}{2}}$

由式 (1-10) $r = \frac{8^2}{8\pi \epsilon_0 (-W)} \quad 14\lambda$

得 $T = \frac{2\pi}{8} (4\pi m \epsilon_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{8^3}{[8\pi \epsilon_0 (-W)]^{\frac{1}{2}}} = \frac{m^{\frac{1}{2}} 8^2}{4\sqrt{\epsilon_0 (-W)}}^{\frac{1}{2}}$

1-15. 試證對氫原子, 其波長倒數 (即波數) 為

$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$

其中 n_1, n_2 均為正整數, 且 $n_1 > n_2$, $R = m^4 / 8 \epsilon_0^2 h^3 c = 1.1 \times 10^7$ / 每米, 為黎德堡常數。

(解): 由方程式 $\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{W_2 - W_1}{hc}$, 但由式 (1-13) $W_1 = -\frac{m g^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n_1^2}$

$\therefore \frac{1}{\lambda} = \frac{m g^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$

$R = \frac{m g^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} = 1.1 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

1-16 試證 (1-14) 及 (1-15) 兩式等值。

(解): $f = \frac{W_2 - W_1}{h}$ 但 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{W_2 - W_1}$

而 $hc = (6.625 \times 10^{-34}) (2.998 \times 10^8)$

$= 1.99 \times 10^{-25} \text{ J-m} = 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV-m} = 12400 \text{ eV-Å}$

故 $\lambda = \frac{12400}{E_2 - E_1}$ (λ in Å, E in eV.) 故兩式等值。

1-17. (a) 一波長為 1026 Å 之光子被氫原子吸收, 而另射出兩個光子, 若其一為 1216 Å, 則另一光子之波長為若干?

(b) 若氫原子碰撞後出現 18751 Å 及 1026 Å 之光譜, 則其碰撞時吸收之光子波長若干?

1-17 (cont)

(a) 吸收能量 $\Delta E = \frac{12400}{\lambda} = \frac{12400}{1026} \approx 12.09 \text{ eV}$

其一光子放出能量 $\Delta E_1 = \frac{12400}{\lambda_1} = \frac{12400}{1216} = 10.20 \text{ eV}$

其另一光子之能量 $\Delta E_2 = \Delta E - \Delta E_1 = 1.89 \text{ eV}$

波長 $\lambda = \frac{12400}{\Delta E_2} = \frac{12400}{1.89} = 6550 \text{ \AA}$

(b) 18751 \AA 所有之能量 $\Delta E_3 = \frac{12400}{18751} = 0.66 \text{ eV}$

1026 \AA 之能量由 (a) 知 12.09 eV

總能量 $\Delta E = 12.09 + 0.66 = 12.75 \text{ eV}$ 即吸收光子之能量,

其吸收光子之波長 $\lambda = \frac{12400}{\Delta E} = \frac{12400}{12.75} = 974 \text{ \AA}$

1-18. 鈉氣之最低七能階皆為 0, 2.10, 3.19, 3.60, 3.75, 4.10 及 4.26 eV

一波長為 3300 \AA 之光子被其吸收,

(a) 其所產生之所有光線為何?

(b) 若其後三個光子被射出, 其一為 11380 \AA, 則其他二光子之波長為何?

(c) 要產生此種光譜線, 那些能階間發生遷徙?

(解): (a) 光子所帶能量為 $E = \frac{12400}{3300} = 3.75 \text{ eV}$ 為第五能階

其所吸收之能量共可發生四種能階之遷徙, 故有四條光線 (略)

(b) 波長為 11380 \AA 時應為 $\Delta E = \frac{12400}{11380} = 1.09 \text{ eV}$.

即能階遷徙由 3.19 eV 到 2.10 eV.

其他兩光子之能階遷徙必為 3.75 eV 到 3.19 eV 及 2.10 eV 到 0 eV

故 $\lambda_1 (3.75 \rightarrow 3.19 \text{ eV}) = \frac{12400}{0.56} = 22500 \text{ \AA}$

$\lambda_2 (2.10 \rightarrow 0 \text{ eV}) = \frac{12400}{2.1} = 5900 \text{ \AA}$

(c) 能階遷徙發生於 3.75 eV 和 3.19 eV 和 2.10 eV 和 0 eV 之間.

1-19. (a) 電子在鈉氣燈中必須以何種速度進行方得產生波長為 5893 Å 之黃線光譜？

(b) 若為光子，其頻率須為若干？

(c) 若光子之頻率為 530 或 490 兆赫 (THz)，則結果為何？

(d) 若欲使一束激發態下之鈉原子游離，光子之最低頻率為何？

(e) 若欲使一束激發態下之鈉原子游離，電子之最低速度若干？鈉之游離能為 5.12 eV。

(解)：(a) 電子之能量需為 $\frac{12400}{5893} = 2.11 \text{ eV}$

$$\text{其速度 } v = \left(\frac{2.11 \text{ eV}}{2m} \right)^{1/2} = 8.6 \times 10^5 \text{ m/sec.}$$

$$(b) \text{ 頻率 } f = \frac{E}{h} = \frac{2.11 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.625 \times 10^{-34}} = 5.07 \times 10^{14} \text{ 赫}$$

= 507 兆赫

(c) 若頻率為 530 或 490 兆赫，則無法被鈉原子吸收。

(d) 游離能為 5.12 eV

$$f = \frac{5.12 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.625 \times 10^{-34}} = 1.235 \times 10^{15} = 1235 \text{ THz}$$

(e) $\frac{1}{2} mv^2 = 5.12 \text{ eV}$

$$v^2 = \frac{5.12 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2}{9.11 \times 10^{-31}} = 1.8 \times 10^{12}$$

$$v = 1.34 \times 10^6 \text{ m/sec}$$

1-20. 一個 X 光管即為一高壓雙極管，從熱燈絲射出之電子被極間電位加速，以改以相當之能量撞及正極，使正極固體原子產生有效的能階遷徙。

(a) 若要產生 0.5 Å 之 X 光波，則二極間電壓最少為多少？

(b) 若一 X 光管兩端電壓為 6 萬伏，則最小之波長為若干？

(解)：(a) 由方程式 (1-14) $\Delta E = \frac{12400}{0.5} = 24800 \text{ eV}$

故需電壓 24800 伏