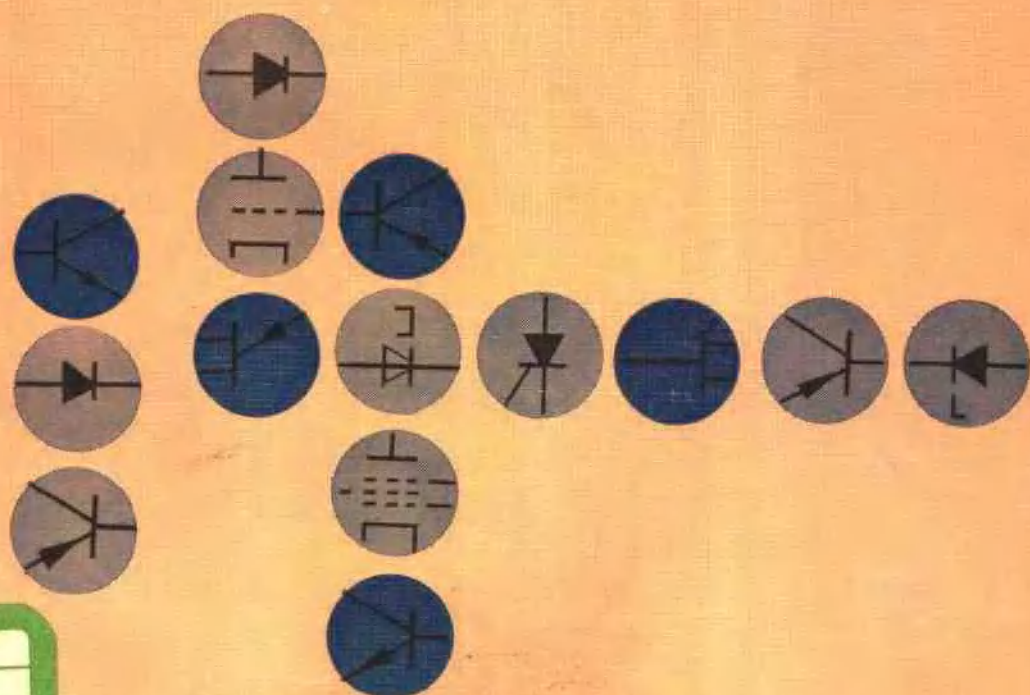


基本電子學

編著者 張 焯



東華書局印行



基本電子學

張 燿 著

國立臺灣大學電機工程學系教授

東華書局印行



版權所有・翻印必究

中華民國六十五年七月初版

基本電子學（全一冊）

定價新臺幣陸拾元整

（外埠酌加運費匯費）

編著者	張	煌
發行人	卓	森
出版者	臺灣東華書局股份有限公司	
	臺北市博愛路一〇五號	
印刷者	坤記印刷有限公司	
	臺北市雅江街七九巷十一號	

內政部登記證 內版臺業字第一〇三一號
(65015)

前 言

- 一、本書旨在培養讀者充份瞭解電子學之基本觀念與發展，養成研究科學之興趣。
- 二、本書內容着重於實用，以淺近之物理觀念，使用簡單數學及有關插圖講解。在應用方面，備有實例，誘導讀者逐漸吸收電子學之基本知識而不覺困難，奠定良好基礎。
- 三、本書共有五章，第一章介紹電子作用，對電子的運動、發射、放電現象，以及電磁波作深入淺出的介紹。第二章專講電子管，第三章討論半導體及半導體製的各種電路元件。第四章講解各種實用電路。最後，第五章談到電子在各方面的應用。
- 四、每章結束，備有實用習題，饒有趣味，更具啓發性。如能仔細練習，對學理之瞭解，觀念之確立均有甚大助益。
- 五、本書所採用之術語及名詞均以教育部公布者為準。
- 六、本書編校力求完善，諸教學同仁如有意見，請隨時來函，至爲感荷。

張 煌

國立臺灣大學電機工程學系
民國六十五年五月

基本電子學

目 錄

第一章 電子作用	1~32
1-1 電子及其運動	1
1-2 電子發射	11
1-3 放電現象	17
1-4 電 磁 波	22
習 題	30
第二章 電 子 管	33~64
2-1 真 空 管	33
2-2 放 電 管	46
2-3 特殊電子管	52
習 題	62
第三章 半 導 體	65~109
3-1 半導體的性質	65
3-2 電 晶 體	73
3-3 特殊半導體	87
習 題	107

2 基 本 電 子 學

第四章 電子電路110~147

- 4-1 整流電路..... 110
- 4-2 放大電路..... 115
- 4-3 振盪電路..... 123
- 4-4 調變電路..... 129
- 4-5 脈衝電路..... 137
- 習 題..... 143

第五章 電子應用148~165

- 5-1 音響方面之應用..... 148
- 5-2 通信方面之應用..... 154
- 5-3 其他控制之應用..... 159
- 習 題..... 164

漢英名詞索引..... 167

英漢名詞索引..... 172

第一章 電子作用

1-1 電子及其運動

所有物質均由原子組成。原子是物質的極小微粒，它的半徑約為 10^{-10} 米。丹麥物理學家波耳 (Bohr) 認為原子由若干帶負電荷的電子 (electron) 和一個帶正電荷的原子核組成，其中電子像行星環繞着太陽一樣，繞原子核而進行，如圖 1-1 所示。這是原子的波耳模型 (Bohr mode)。在原子核中有帶正電荷的質子與不帶電荷的中子，它們的總數目近乎其原子量。質子數目與電子數目相等，而由原子序決定。例如矽原子序為 14，原子量為 28.086，則它有 14 個電子，14 個質子，和 14 個中子。

爲了對電子學能有明晰的瞭解，以及方便和簡化起見，一般都將原

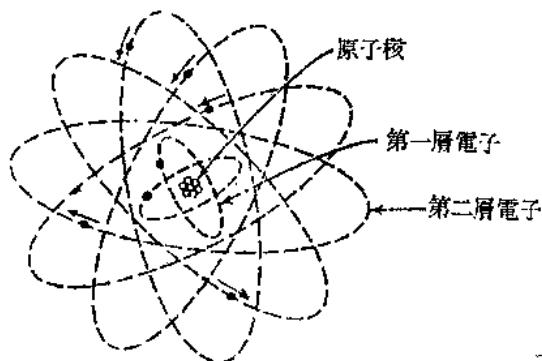


圖 1-1 原子的波耳模型。

2 基本電子學

子波耳模型的三度空間簡化成二度空間的圖形，如圖 1-2 所示。電子環繞原子核而運行，各層軌道的最多電子數量是一定的，如圖 1-2 所示，*K* 層為 2 個，*L* 層為 8 個，*M* 層為 18 個等。由於核內正電荷對電子的吸引，原子外層軌道中的電子對於原子核的引力較內層軌道中的電子為小。其最外層的電子稱為價電子(valence electron)，它們容易脫離其軌道，所以又稱為自由電子(free electron)。其內層的電子由於不容易被迫離開軌道，它們稱為束縛電子 (bound electron)。本書所討論的為自由電子。

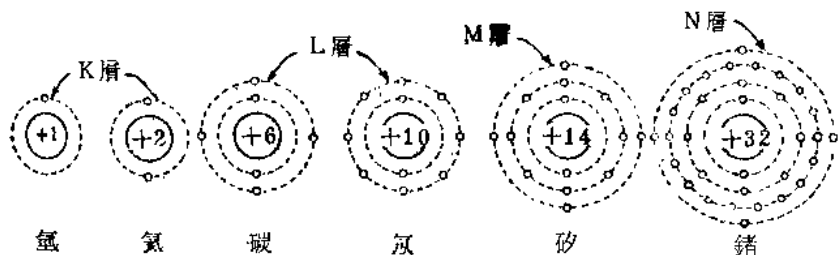


圖 1-2 各種原子的環狀模型。

電子的電荷(或電量)和質量已分別發現為 1.602×10^{-19} 庫侖和 9.109×10^{-31} 仟克。由於每一個電子的電荷是 1.602×10^{-19} 庫侖，每庫侖內的電子數目即約為 6×10^{18} ($= 1/1.602 \times 10^{-19}$) 個電子。由此數目，我們可以得到一般電流大小的概念。所謂電流即為在一定橫截面內每秒鐘所通過的電荷量。1 安培的電流就是 1 庫侖/秒的流動，於是只有 1 微微安 ($= 10^{-12}$ 安培) 的電流差不多就代表了每秒內 6 百萬個電子的流動。

電流為電荷流動的時間率，猶如水力系統中的流體流動率一樣，電流有大小，亦有流動方向。在電子學說未發現前，電已用在電燈、電動機、發電機方面，一般人相信電流的方向是正電荷移動的方向。自從電

子學說確定後，才認為電流係由電子的流動而生的。前者人們稱它為習用的電流方向，與電子流動的方向相反。本書採用習用的電流方向。

電子的半徑被估計為 10^{-15} 米，原子的則為 10^{-10} 米。這些半徑是如此之小，所以在下面各節中所有電荷都被當作質點 (particle) 來處理。

原子內 $K, L, M, \dots$ 各層各有能階 (energy level)，各層中又有固定軌道， K 層有 1 軌道， L 層有 4 軌道， M 層有 9 軌道，依次類推。每一能階的軌道，因電子本身旋轉有順或逆兩種方向，它稱為有兩個能量狀態。根據包立不相容原理 (Pauli's exclusive principle)，沒有兩個電子能佔有同一能量狀態。換句話說，一個能量狀態僅可能有一個電子。因此，一軌道上則最多僅有兩個電子。離開原子核遠的軌道能階較近的為高。任何原子中的電子必定先將低能階軌道填滿，圖 1-2 所示可看出不同原子的原子結構。

現在，察看價電子的情況，在正常時，它在軌道上運行，並不輻射能量，此時可稱電子在一個穩定狀態。若外加能量，使電子自能量 W_1 的穩定狀態跳移至另一高能量 W_2 的穩定狀態。這些可允許的能階是不連續的 (discrete)。反之，電子自高能量 W_2 的穩定狀態轉移至較低能量 W_1 的穩定狀態，則將會發生輻射。以公式表之為

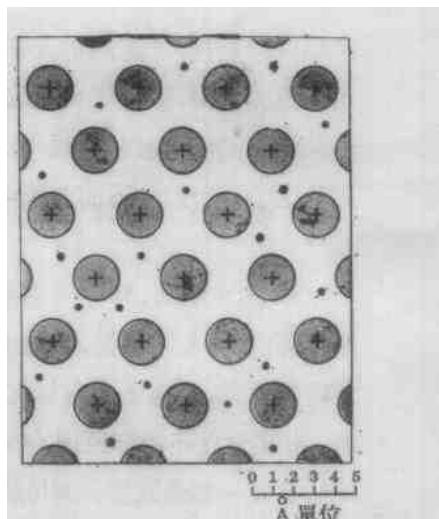
$$hf = W_2 - W_1 \quad (1-1)$$

此處 hf 為每個發射光子 (photon) 能量，其中 h 為蒲郎克常數 (Planck's constant) 6.626×10^{-34} 焦耳·秒， W 用焦耳單位， f 為輻射能量的頻率，用赫芝單位。由公式 (1-1) 可知，能量 W_1 狀態升至較高能量 W_2 狀態時，其電子必須吸取 hf 能量。在第 1-3 節放電現象中將應用此公式。

現在，再看導體中電子的情況。圖 1-3 所示為金屬銅內電荷分布的

4 基本電子學

二度空間概圖。陰影部分代表原子核與束縛電子的淨正電荷，即束縛離子。黑點代表原子外層的價電子，即自由電子。在金屬中一個原子的價電子，受各個正離子的影響，與本身原子間的聯繫幾乎等於零。換句話說，它很容易脫離軌道。這些電子不能說屬於任何一個原子的，它們完全失去了它們的獨立存在性，而可以在金屬中自由地自一個原子處游移至另一個原子處。因此，金屬可以被想像是由許多緊密相連聯的正離子組成的三度空間規則排列，其間摻以一羣羣可以自由運動的電子。這種說法稱為電子氣體(electron gas)學說。



■ 1-3

金屬銅內電荷分佈的平面圖。

【例題】 試說明電子在金屬中何以可視作氣體看待。

【解答】 以古典力學說明，將金屬銅為例，銅的比重為 8.9，即一立方厘米有 8.9 克重。它的原子量為 63.54。其分子由一個原子組成，亦就是一克分子量(摩爾)有 63.54 克重。再根據亞佛加厥(Avogadro)數目一克分子量有 6.02×10^{23} 個分子。因此，一立方米體積的銅共有分子計

$$(6.02 \times 10^{23}) \left(\frac{1}{63.54} \right) (8.9) (100^3) = 8.43 \times 10^{28} \text{ 個}$$

再依據銅分子由一個原子組成，而其原子的價電子為一個。所以，一立方米的銅有 8.43×10^{28} 個原子，其活動的自由電子亦為 8.43×10^{28} 個。

假設將分子視作圓球形，其半徑的數量級為 10^{-10} 米。因為銅為一個原子組成的分子，所以 8.43×10^{28} 個銅原子共有體積計

$$\left(\frac{4}{3} \pi \right) (10^{-10})^3 (8.43 \times 10^{28}) = 0.353 \text{ 立方米}$$

在一立方米體積內除原子佔有位置外，尚有

$$1 - 0.353 = 0.647 \text{ 立方米}$$

供 8.43×10^{28} 個電子活動。每電子半徑的數量級為 10^{-15} 米， 8.43×10^{28} 個電子共有體積

$$\left(\frac{4}{3}\pi\right)(10^{-15})^3(8.43 \times 10^{28}) = 3.53 \times 10^{-14} \text{ 立方米}$$

將此體積與電子活動範圍的體積比較，微乎其微。所以，自由電子在金屬中的活動情形，猶如氧、氮分子在大氣中活動一樣，可視作氣體看待，稱此種自由電子為電子氣體。

依據金屬的電子氣體學說，這些自由電子是不斷地在運動着，而每次和重的（幾乎是穩定的）離子相撞後，即改變它們進行的方向。碰撞距離各個長短不一，其平均距離稱為平均自由路徑（mean free path）。由於這些電子運動是隨意的，在某一指定時間，電子在金屬中經過單位面積，平均地說，與其相反方向而來的電子數目相等。因此，平均電流為零。

現在，倘使金屬上外加一定值電場 $\mathcal{E}$ （單位為伏特/米）時，此電場對電子有加速作用。如不考慮它與離子碰撞，其電子速度將隨時間而無限地增加。可是，每次與離子相撞後，電子將失去些能量，到達穩定情況時，電子的速度稱為漂移速度（drift velocity） v （單位為米/秒）。此漂移速度的方向與電場的方向相反，而其大小與 $\mathcal{E}$ 成正比，是以

$$v = \mu \mathcal{E} \quad (1-2)$$

此處 μ （單位為米²/伏特·秒）稱為電子的移動率（mobility）。

依照以上論述，外加電場後，電子的隨意活動必須加上其穩定漂移速度，方為電子真正的路徑。隨意活動時的電流為零，電子漂移速度的

6 基本電子學

行進才構成電流。倘使自由電子的濃度(concentration)爲 n (每立方米的電子數), 電子的電荷爲 e (庫侖), 則電流密度 (每平方米截面的安培數) J 爲

$$J = nev = ne\mu\mathcal{E} = \sigma\mathcal{E} \quad (1-3)$$

此處

$$\sigma = ne\mu \quad (1-4)$$

爲金屬的導電係數, 亦有以 γ 表示者, 其單位爲(歐姆-米) $^{-1}$ 。公式(1-3)可認作爲歐姆定律, 即導電電流與所加電壓成正比, 前面已經提到, 由於碰撞的緣故, 電子將它由電場得來的能量分給了離子, 所以電子在金屬內消耗功能, 此功率密度爲 $J\mathcal{E} = \sigma\mathcal{E}^2$ (每立方米的瓦特)。

【例題】 設銅的電阻係數爲 0.01724 微歐-米, 其 18 號銅絲直徑爲 1.03×10^{-3} 米。銅的自由電子濃度爲 8.43×10^{28} 個/立方米。試求其(1)導電係數, (2)有 2 安培電流時的漂移速度, 及(3)移動率。

【解答】 (1) 按導電係數爲電阻係數的倒數, 所以, 銅的導電係數 σ 爲

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0.01724 \times 10^{-6}} = 5.8 \times 10^7 (\text{歐姆-米})^{-1}$$

(2) 銅中自由電子在 2 安培電流時的漂移速度, 應用公式(1-3), 爲

$$v = \frac{J}{ne} = \frac{2 / \frac{\pi}{4} (1.03 \times 10^{-3})^2}{(8.43 \times 10^{28})(1.602 \times 10^{-19})} = 2.85 \times 10^{-4} \text{ 米/秒}$$

(3) 應用公式(1-4), 銅的電子移動率爲

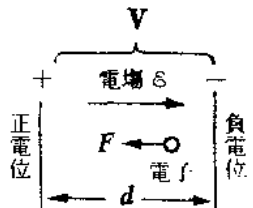
$$\mu = \frac{\sigma}{ne} = \frac{5.8 \times 10^7}{(8.43 \times 10^{28})(1.602 \times 10^{-19})} = 4.29 \times 10^{-3} \text{ 米}^2/\text{伏特-秒}$$

最後，觀察電子在真空中運動的情況。任何正負兩電位間必有電場產生，電場的方向由正電位至負電位。電場的強度在均勻的情況下是其電位差除以其兩者距離。如正負電位相差為 V ，其距離為 d ，則其電場 $\mathcal{E}$ 的強度為

$$\mathcal{E} = -\frac{V}{d} \quad (1-5)$$

此處負符號為電位差由負至正為正值，而電場方向與它相反。

圖 1-4 所示為電子在真空電場中的運動情況，因為電子為負極性，受有力的作用，向正電位方向運動。設電子的電荷為 e ，則電力在這電場中所受的作用力為



■ 1-4
電子在真空電場中運動。

$$F = -e\mathcal{E} \quad (1-6)$$

此處負符號表示作用力的方向與電場的方向相反。

根據牛頓(Newton)力學定律，公式 (1-6) 中的作用力等於電子的質量與其加速度的乘積。如電子的質量為 m ，其加速度為 a ，則其作用力為

$$F = ma \quad (1-7)$$

公式 (1-6) 與 (1-7) 兩者相等，再將公式 (1-5) 代入，則得

$$a = -\frac{e\mathcal{E}}{m} = \frac{eV}{md} \quad (1-8)$$

此處電位差 V 已假定為一恒值。此分析結果表示電子在均勻電場中將以等加速度運行。因此，這電子運動問題十分像落體在定值重力場內的

8 基本電子學

情形。這問題的答案可以由電子的速度 v 及位移 x 二式來表示, 即

$$v = v_0 + at = v_0 + \frac{eV}{md} t \quad (1-9)$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 = x_0 + v_0 t + \frac{eV}{2md} t^2 \quad (1-10)$$

此處 v_0 爲電子的運動平行於電場的初速度, x_0 爲電子進入電場 $t=0$ 時已進行了 x_0 位移。如電子在負電處由靜止開始運動, 則 v_0 及 x_0 均等於零, 公式(1-9)與(1-10)則可化成

$$v = \frac{eV}{md} t \quad (1-11)$$

$$x = \frac{eV}{2md} t^2 \quad (1-12)$$

在此二公式中, 假設電子到達正電位處 ($x=d$) 的速度爲 v , 則將 t 消去, 可得

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV \quad (1-13)$$

此爲能量公式, 左邊爲動能, 右邊爲位能, 電子在負電位處, 電子的動能爲零(即靜止), 位能爲 eV ; 電子到達正電位處, 電子的動能爲 $\frac{1}{2} mv^2$, 位能爲零。公式(1-13)說明: 增加的動能等於失去的位能, 亦就是說總能量不變。

【例題】 設電子進入加速電場時的初速度爲 v_0 , 而與電場相垂直, 如圖 1-5 所示。電場屬於均勻電場, 並行板距離爲 d 。試問電子在並行板間運動的形態爲何?

【解答】 參考公式(1-12), 電子受電場後的運動爲

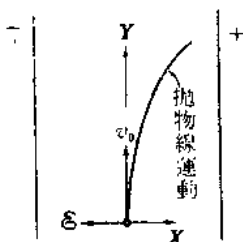


圖 1-5 電子在均勻電場中運動，其初速度 v_0 與電場垂直。

$$x = \frac{eV}{2md} t^2 \quad (1-14)$$

再者，電子經過電場內的時間為 $t = y/v_0$ ，代入公式(1-14)，則得

$$x = \frac{eV}{2md} \left(\frac{y}{v_0} \right)^2 = \frac{eV}{2mdv_0^2} y^2 \quad (1-15)$$

此公式為拋物線。靜電式陰極射線管中，電子在偏轉板間運動即為此種情形。

電子在真空磁場中運動，視它切磁場中的情形而定。如電子在磁場中不動，它就不切磁場，磁場對它沒有影響，電子永遠保持不動。如電子的初速度沿磁場方向行進，它亦不會切磁場，電子就保持原有運動速度繼續向原有方向前進。

如電子進入磁場區域的速度與磁場垂直，根據夫來明左手定則，有一力作用在電子上而與磁場及電子運動速度垂直。如圖 1-6 所示，電子以 v 的速率由垂直方向進入均勻磁場 B （進入紙面方向）中，則力 f 與 B 及 v 垂直。因為 f 在每一瞬間皆與 v 垂直，電子在磁場中沒有功作用在上，電子的動能沒有增加，亦就是

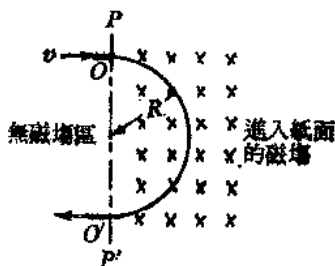


圖 1-6 電子在垂直均勻磁場中作圓周運動。

它的速率不變，只變更電子運動的方向。再者，既然 v 和 B 的大小都是一定， f 的大小亦就固定不變，只是方向隨時垂直於電子運動方向。這一類的作用結果，電子以等速 v 循圓型途徑運動，與 B 垂直。猶如繩子的一端繫住一質點，以另一端為中心作等速繞轉運動。

當電子在磁場中與 B 垂直作等速 v 的圓型運動，設運動的半徑為 R ，電子的質量和電荷分別為 m 和 e ，在磁場 B 中的力 f 等於 evB 。電子作圓型運動，有向心力等於 $\frac{mv^2}{R}$ 。此兩力相等，為

$$\frac{mv^2}{R} = evB$$

或

$$R = \frac{mv}{eB} \quad (1-16)$$

由此可知，磁場愈強或電子的運動速率愈小，則電子循圓型運動的半徑亦愈小。

如電子進入磁場區域的速率並不與磁場垂直，而與磁場成任意角 θ 。在此情形下，電子的運動亦可以用上述的分析而得。如圖 1-7 所示，將電子的原有速率分二部分，其一 $v \sin \theta$ 與磁場垂直，另一 $v \cos \theta$ 與磁場並行。與磁場垂直者作等速 $v \sin \theta$ 圓型運動，運動面與磁場垂直。與磁場平行者作等速 $v \cos \theta$ 直線運動。兩者相加，電子沿磁場作螺旋狀運動。此類運動恒應用於磁型陰極射線管中作集焦用。

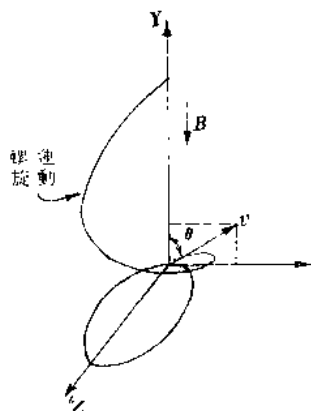


圖 1-7 電子在均勻磁場中運動，其電子速率 v 與磁場 B 成任意角 θ 。

1-2 電子發射

以古典學說淺近的言，一個自由電子在離開物質時，將在物質上引起一個正電荷。於是這個感應電荷與負電子之間就會有吸引力作用，能阻止電子逸出物質。這表面的力量稱為障壁(barrier)，欲使電子由表面發射，電子必須要有外加能量克服這一障壁。

在導體中自由電子的本身能量大小不一，在絕對溫度零度時電子最大含有能量為 E_F ，此稱為費米能階(Fermi energy level)。如果再對電子增加能量，使能到達障壁能量 E_B ，此電子就能由導體發射。此所增加的能階稱為此導體工作函數(work function)。因此，導體的工作函數 E_w 為

$$E_w = E_B - E_F \quad (1-17)$$

亦就是電子由導體發射所需最小的能量。例如鎢金屬的 $E_B = 13.47$ 電子伏特， $E_F = 8.95$ 電子伏特，則它的工作函數 $E_w = 13.47 - 8.95 = 4.52$ 電子伏特。

對物質有許多方法供給其工作函數的能量，而使電子發射。茲分述如下：

一、熱離子發射(thermionic emission)

倘使以熱能型式供給導體能量，導體的溫度就能上升，電子活動的速度增加，如其溫度有足夠的高，則其能量大於其工作函數，電子將貫穿導體表面而發射。這種產生電子的方法稱為熱離子發射。

在真空管中的電子係由熱離子發射而來，通常加熱的金屬稱為燈絲，直接由燈絲發射電子者稱絲極。若間接加熱發射電子，則燈絲稱為加熱器，發射元件稱為陰極(cathode)。無論絲極或陰極，其熱離子