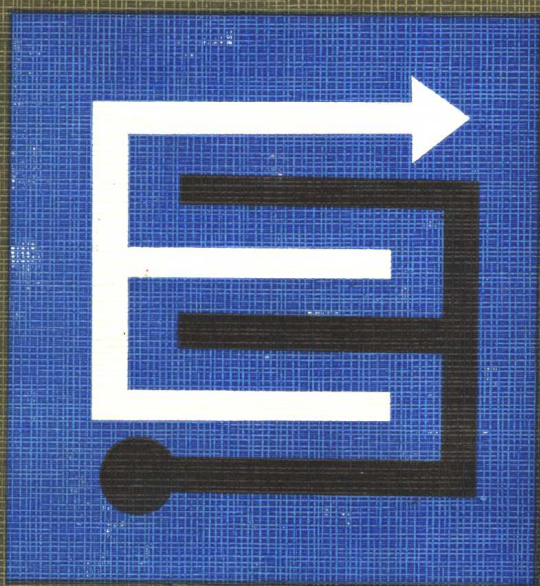


PHYSICAL AND
SOLID STATE ELECTRONICS

KANAAN KANO

物理及固態電子學

張 煜 譯



國立編譯館出版
東華書局印行

物理及固態電子學

Kanaan Kano 原著

張 焯 譯

國立編譯館出版
東華書局印行



版權所有・翻印必究

中華民國六十六年一月初版

大學
用書 物理及固態電子學

基本定價 五元

(外埠酌加運費滙費)

著作權 所有人	國 立 編 譯 館
補助機關	國 家 科 學 委 員 會
著 者	Kanaan Kano
譯 者	張 焯 焜
發行人	卓 鑫 森
印刷者	合 興 印 刷 廠

臺北市大理街 103 巷 2 弄 1 號

內政部登記證內版臺業字第一〇三一號
(66001)

序 言

很多書籍曾以固態及物理電子學為主題寫作過。有許多可作應用工程師的有益參考之用。有些書籍包羅廣博，但對某些材料太不夠充實。有些書籍極有深度地論及某種領域的專門觀點，因此它們對元件設計者及研究人員為有用；但還有些書籍論述較為普遍，專是為教書目的而編寫的。

本書可列入第三類。它以學生心意而寫的，預定為物理及固態電子學的一門課，能作大學部或研究生階層的工程與科學學生應用。當作任何一本教科書後，主要的問題為：這科題應如何廣泛地及如何深度地論述？這一問題在實際上不可能回答而使每一位滿意。我的一般答覆是這樣的：應提供足夠的材料，使學生能對一切現有元件的理論與工作切實瞭解，並且使他有能力去追求更精良的方法，瞭解更新的元件。研讀此書後，他可能不會自己設計元件——我相信那種能力不是從書本上能學到的——但是他一定可以徹底的熟習元件的運用和合成。

所以，這本書的目的有二點：第一、以電子元件的基本物理理論為基礎，供應學生一學期的課程，第二、使他熟習新近出品元件的基本工作原理和特性。

這些都是我努力想獲致的。我是否已經接近這目標，這是由此書的讀者——學生們和他們的教師——來決定。

本書以十五年的教學經驗為基礎，其中較重要的部分在致力於教導半導體和真空管電路元件工作的物理原理，以及這些元件在電路上的用途。我曾經發現學生很難把握某些概念，以我在這領域的研究事

宜，已使我相信這些概念正是如此地需要，應該特別努力而使學生領悟它們確實的意義。當他在實際電路上使用這些元件時，這對學生澈底瞭解元件的等效電路亦很有幫助，以及充分知道這些元件和其等效電路的限制。

各章多數包括有練習，例題，和學生要做的習題。習題附在每章的末後，作更進一步的教導，以及給學生有關在度量 and 數值上的一些概念。

我要向我的同事 Nassir Sabah 博士致上忠誠的感激，他詳細地覆閱原稿，提出了廣博而深入的評論和建議。我亦要向我的學生致最大感激，他們需要一本書，由於這一挑戰，我寫了它，在教室和個別討論中他們曾有明顯的貢獻，尤其是我以前的兩個學生 Marwan Simaan 和 Raweh Kulsahagian 更要特別謝謝他們幫忙起草。

這原稿的打字在不同時期分別由 Suad Inaty 小姐和 Patricia Wese-sky Walsh 太太工作，我亦要向她們不倦地努力和盡職而致意。

兩家公司——RCA 和 Motorola——曾使這本書較其他可能的方法對學生更有較大的實際應用。附錄 C 是電子管的定額和特性，是由 RCA 電子管手冊中複印的。附錄 D 是半導體元件定額和特性，則由 Motorola 半導體資料書中複印的。我確相信，用過這本書的任何人都會同我一起感謝這兩個機構的好意合作。

黎巴嫩，貝魯特

1971 年 8 月

卡南卡諾 (k.k.)

目 錄

第一章 波動力學和能量分布.....	1
1.0 概 論.....	1
1.1 原子理論和波動力學.....	2
1.2 水丁格方程式.....	10
1.3 水丁格方程式對氫原子的應用.....	18
1.4 能帶形成.....	23
1.5 禁區和能帶.....	26
1.6 固體分類：晶體結合.....	29
1.7 能量分布.....	30
1.8 費米-狄悅克分布定律.....	36
第二章 金屬的電子發射.....	44
2.0 概 論.....	44
2.1 工作函數.....	45
2.2 熱離子發射.....	46
2.3 陰極材料和幾何圖形.....	51
2.4 光電發射.....	53
2.5 二次發射.....	53
2.6 場發射.....	54
第三章 真空管元件.....	57
3.0 概 論.....	57

3.1	二極管	57
3.2	三極管	63
3.3	四極管	74
3.4	五極管	76
3.5	束射功率管	79
3.6	光電管和光電倍增器	81
第四章 半導體和載子處理		88
4.0	概 論	88
4.1	金屬和半導體的電阻	89
4.2	移動率和電導係數	92
4.3	有效質量和電洞	95
4.4	本質半導體	101
4.5	移動率和電阻係數的測量	108
4.6	外質半導體	113
4.7	漂移和擴散	125
4.8	產生、復合、和活期	126
第五章 PN接面二極體		134
5.0	二極體構造	134
5.1	平衡情況	137
5.2	偏壓效應	142
5.3	材料整體中的電流	143
5.4	二極體物理模型和方程式	146
5.5	電流 - 電壓關係	151
第六章 半導體二極體的性質		170
6.1	低階關係的正確性	171

6.2	基體中的電場	175
6.3	二極體直流和交流等效電路	179
6.4	可變電容二極體	193
6.5	半導體二極體的限制及定額	196
6.6	衝渡二極體	202
6.7	導電材料間的邊界條件	207
6.8	金屬-半導體二極體	216
6.9	雜訊	219
第七章	雙極接面電晶體	228
7.1	電晶體構造和工作	229
7.2	電晶體電流的完整表示式	233
7.3	電晶體的 α	239
7.4	衣伯-莫耳模式	242
7.5	電晶體圖說特性	246
7.6	電流增益	251
7.7	電流增益對 V_{CB} 和 I_C 的從屬	256
7.8	電晶體的定額	259
第八章	雙極電晶體的等效電路	268
8.1	電晶體作電壓放大器	269
8.2	V_{EB} 變化的效應	271
8.3	基極-寬度調變的效應	278
8.4	二埠參數	285
第九章	二極體和電晶體的動態響應	302
9.1	低注入前向暫態行爲	303
9.2	逆向暫態行爲	310

9.3	高階前向暫態行爲	316
9.4	PNP 型電晶體的脈衝響應	321
9.5	動態響應對頻率響應的關係	328
第十章 接面場效電晶體		333
10.1	構造和工作原理	334
10.2	場效電晶體的特性	336
10.3	特性方程式	338
10.4	夾止區域	342
10.5	實用場效電晶體	344
10.6	接面場效電晶體的等效電路	345
10.7	高頻率限制	349
10.8	場效電晶體作可變電阻器	350
10.9	電晶體的定額和限制	350
第十一章 絕緣閘場效電晶體		355
11.1	金氧半場效電晶體構造和工作	357
11.2	金氧半場效電晶體的特性	362
11.3	金氧半場效電晶體等效電路	370
11.4	薄膜電晶體	374
11.5	電晶體的定額和限制	375
11.6	半導體三五價化合物	377
第十二章 氣體處理和元件		385
12.1	電子管中的氣體	386
12.2	碰撞效應	387
12.3	湯生放電	388
12.4	輝光放電	389

12.5 電壓調整管	391
12.6 含氣發光燈	391
12.7 閘流管	392
12.8 含氣光電管	393
12.9 輻射計數器	394
第十三章 其他半導體元件	396
13.1 PNP 開關	397
13.2 隧道二極體	411
13.3 單接面電晶體	423
13.4 甘恩效應元件	424
13.5 積體電路	436
第十四章 雷射	453
14.1 雷射的性質	454
14.2 雷射作用	455
14.3 固態紅寶石和玻璃性雷射	458
14.4 氣體雷射	460
14.5 半導體和 PN 接面雷射	461
14.6 各型雷射的比較	467
14.7 雷射應用	468
附 錄	471
精選習題解答	518
索 引	522

第一章

波動力學和能量分布

- 1.0 概論
 - 1.1 原子理論和波動力學
 - 1.2 水丁格方程式
 - 1.3 水丁格方程式對氫原子的應用
 - 1.4 能帶形成
 - 1.5 禁區和能帶
 - 1.6 固體分類：晶體結合
 - 1.7 能量分布
 - 1.8 費米－狄悅克分布定律
- 摘要

1.0 概 論

爲了介紹量子力學並解釋其中的能帶形成，首先我們將提出原子理論在發展沿革史上的簡短回顧。

我們以複習有關電子軌道運動的波耳觀念 (Bohr concepts) 與它們相關的量子力學理論 (quantum-mechanical theory) 開始。其次，我們研習水丁格方程式 (Schrödinger's wave equation) 及德布各利假說 (de Broglie's hypothesis)，並用它們來解釋在電子運動中所觀察到有類似波動的現象。利用水丁格方程式的解答，我們將介紹量子數 (quantum-number) 的觀念，由此即可導出能階。在性質上，物質的能帶圖亦可導出。

然後，我們將再用由波方程式解得的能量關係，來導出相當於能

階的狀態密度公式，應用狀態密度公式和費米-狄悅克分布定律 (Fermi-Dirac distribution law)，我們將獲得自由電子的密度。圖 1.0.1 所示為本章資訊的流程圖。

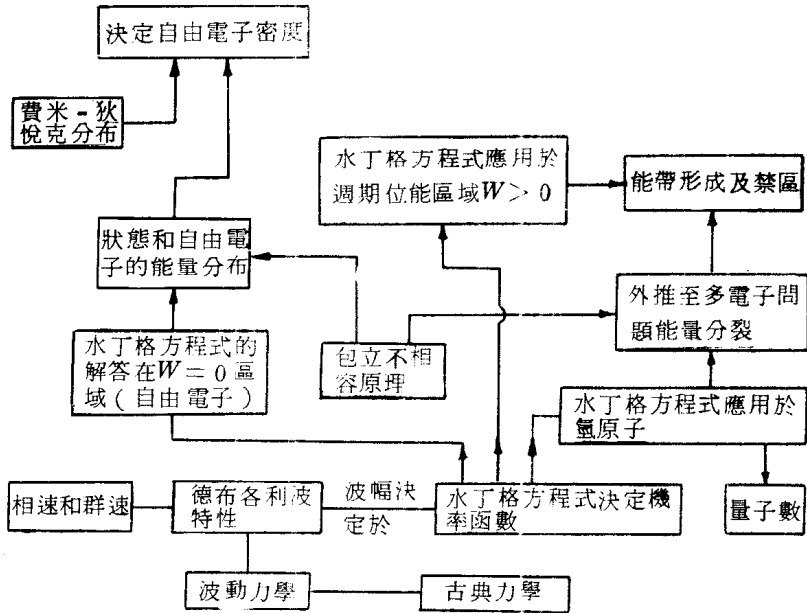


圖 1.0.1 第一章資訊流程圖。

1.1 原子理論和波動力學

氫原子的古典理論

因為氫原子 (hydrogen atom) 是一個簡單的原子，以一個電子繞着原子核旋轉，它將作為我們許多基本研究的中心。為了決定這電子的總能量與其軌道半徑間的關係，我們以平衡靜電力與向心力開始：

$$\frac{mv^2}{a} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a^2} \quad (1.1.1)$$

此處 m 為電子質量，單位用仟克， q^* 為它的電荷，單位用庫倫， v 為它的軌道速度，單位用米/秒， a 為軌道半徑，單位用米， ϵ 為相對介電常數，而 ϵ_0 為自由空間的介電常數，以上的公式應用於一孤立氫原子，而其原子核為假設固定於空間。

電子由於所處位置而將具有位能，動能為 $\frac{1}{2}mv^2$ 。位能 W 求出為

$$W = \int_{\infty}^a \frac{q^2 da}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a^2} = \frac{-q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a} \quad (1.1.2)$$

此處零位能為假設在無窮遠處。由公式 (1.1.1) 及 (1.1.2)，則總能量 E 可求得，

$$E = KE + W = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a} = -\frac{q^2}{8\pi\epsilon\epsilon_0 a} - \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a} = -\frac{q^2}{8\pi\epsilon\epsilon_0 a} \quad (1.1.3)$$

圖 1.1.1 所示為金屬內部在一度空間情況下對一連串原子的位

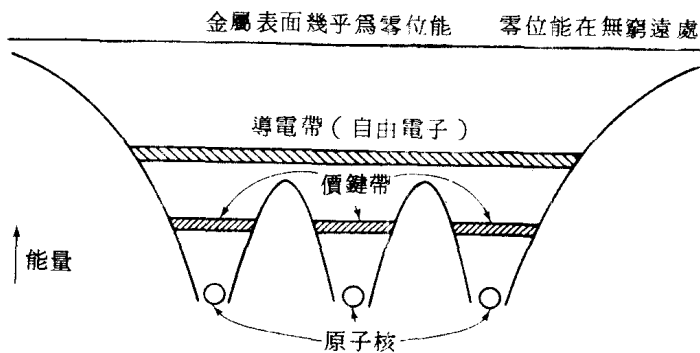


圖 1.1.1 一度空間位能模型，表示溫度在零度以上時原子間的能量分布。注意，這是位能對經過原子中心在同一條線上的距離；縱坐標代表能量，而不是距離。

* 在本教課書中， q (等於 1.6×10^{-19} 庫倫) 將常代表一個電子上的電荷量，一個電子將帶有 $-q$ 的電荷。

能分布（見習題 1.6）。在這概圖中，位能是由於諸原子各個所提供者相加的，零位能已被設在無窮遠處。我們注意，在金屬的表面上有一個位能山 (potential energy hill)，電子必須克服這山坡，才能脫離金屬。在原子核之間，我們亦可觀察有位能峰 (potential energy humps)，位於原子間的電子必須克服此山峰，才能由一個原子移動到另一原子。位於山峰之上的電子，約在恆值位能區域，它們能夠很自由地在原子間移動。這些電子稱為自由電子 (free electrons)。

這理論指出電子軌道的半徑愈大，電子的能量就愈高。雖然，這古典理論的一般結論仍然十分有效，但它有二點缺點：(1)它不能解釋明顯分開的光譜線所形成的理由，與(2)它不能說明原子的穩定性。若電子在這樣的一個軌道上運動，所有的時間內都在加速，則它將連續地輻射，而要向原子核碰撞。

波耳理論

波耳作最先的嘗試來解決這些困難，他創立下列二個假說：

1. 電子在一些特定的軌道上繞原子核旋轉，每個軌道相當於一定的能階。將一個電子由低能量軌道轉移到較高能量軌道，原子需要吸收輻射，當由高能量軌道跳到低能量軌道時，造成發射輻射。不論是吸收或發射，這能量可由愛因斯坦關係 (Einstein's relation) 表示：

$$E_2 - E_1 = hf \quad (1.1.4)$$

此處 E_2 及 E_1 分別為二個能態，單位為焦耳， h 為蒲郎克常數 (Planck's constant)，單位為焦耳·秒， f 為輻射的頻率，單位為赫芝。

2. 電子的唯一穩定態，就是在角動量為 $h/2\pi$ 的整倍數時，它們才是穩定。這是量子數被提出的最先事例；倘使我們假設為一圓形軌道，這角動量將為

$$mva = \frac{nh}{2\pi} \quad (1.1.5)$$

這結果指出速度與軌道半徑的乘積僅能接受量子化不連續的值。由於我們仍提及一些圓形軌道，就可求出公式(1.1.1)中的 v 值，將結果代入公式(1.1.5)中，得

$$a = \frac{n^2 h^2 \epsilon \epsilon_0}{m \pi q^2} \quad (1.1.6)$$

及

$$v = \frac{q^2}{2 \epsilon \epsilon_0 n h} \quad (1.1.7)$$

將 a 值代入公式(1.1.3)中，我們得

$$E = \frac{-q^4 m}{8 n^2 h^2 \epsilon^2 \epsilon_0^2} \quad (1.1.8)$$

依照波耳的第二個假設，不僅是軌道半徑被量子化，同樣地，速度和能量亦被量子化。因此， a ， v 及 E 僅能接受不連續的定值，這些不連續的值由整數 n 來決定。

由於軌道被量子化以及當電子由一個軌道移動至另一軌道時有能量發射或輻射，這二個假說的總合可以回答光譜線的疑問。因此，連續性軌道的觀念被摒棄，而代之以不連續的軌道。

雖然波耳理論是向前邁進了一大步，但它沒有給予一個完善的答案，尤其關於古典力學和量子假說之間的關係。德布各利和水丁格作了一個更為完善的解說，他們提出了波動力學的新科學基礎。

波動力學

爲了試圖以波動來解釋電子運動，激起了德維生 (Davisson)，革末 (Germer)和湯木生 (Thomson) 的實驗觀察，他們研究當一束電子注穿過晶體時，有繞射圖型可看到，亦可用照相底片加以記錄。這結果指出電子通常具有波相關的特性，因此電子應當遵照波動方程式。這

就是德布各利創立波動力學的根據。他證實了波耳的結論，即一個波的能量對其頻率的比值為一常數，並假設電子的動量與其波長的乘積亦等於此一常數。這常數稱為蒲郎克常數。這電子的動態性質（例如動量）與波性質間的關係形成波動力學的基礎。是以質點 (particle) 就和波的性質具有關聯。德布各利的兩個結論，用方程式形式敘述，即

$$\frac{E}{f} = \lambda mv = h \quad (1.1.9)$$

此處 h 為蒲郎克常數，而 λ 為德布各利波長。

強調德布各利假說的一般性是很有用的。這假說是他從相對論中預測出來的。依照他的理論，與任何質點有關的假想波，對公式 (1.1.9) 均有效。在任意點的德布各利波的強度為測量該質點在此點上出現的機率，所以，在本質上看，質點的運動用機率敘述更較用古典力學的決定法則為合理。此機率的含義以及伴隨而來的不準度，立即連結於海森堡測不準原理 (Heisenberg's Uncertainty Principle)。

公式 (1.1.9) 的“似合理性”可以確立如下：

1. $E = fh$ 的關係為蒲郎克量子假說之一公式，即能量是以量子吸收或發射，量子的大小為 fh 。
2. 一個光量子為光子 (photon)，所以光頻率 f 的光子能量為 fh 。
3. 依照愛因斯坦理論，質量和能量的關係為 $E = mc^2$ ；因此一光子應具有 fh/c^2 的質量及動量 $fh/c = h/\lambda$ 或 $h = p\lambda$ ，就如公式 (1.1.9) 所列，此處 p 為動量。

此時，我們要強調的，我們並不暗示有電子波的實體存在。更合理的，我們想像一個運動的質點具有似波動的性質結合一起。由電子繞射實驗，知道那樣的一個質點的確具有波樣的性質，即證明了電子注行為與光注一樣，是以電子應同光一樣要遵照同樣波的論述。在更進一步採取類似處之前，讓我們把光已被接受的雙重理論加以摘要：

- a) 光同時具有質點似的及波似的性質。
- b) 光由光子組成。於是光線由質點組成，此質點即光子，每一光子具有能量 hf ，此處 f 為光的頻率。
- c) 在某一位置光的強度即是在那位置上光子的密度。為計算此強度，我們用波方程式。波的振幅即放置一光子在那裡的機率，且振幅的平方是與光的強度成正比。

我們希望再度強調，實際上，光不是由實體的波所組成，但是如在(c)中我們使用波來計算光的強度的。光注和電子注間的類似處，延伸至一光波在可變折射率的媒介物中的行程與繞射，以及電子注經過一可變力場的情形。這兩種現象在數學上是類似的。在光學情形中，發現折射率隨波長大小同等的階次而變更，古典理論無法解釋這種所發生的奇怪現象。同樣地，在一物質中力場隨德布各利波長階次的距離而變更，古典力學即為失效。我們以後將會明白，這力場是由於原子間的互力造成的。對解釋原子距離中所發生的現象，我們必需注意波動理論的理由，即為海森堡測不準原理的結果。

海森堡測不準原理

海森堡測不準原理是從嚴密的數學物理中導出，它敘述兩個量之值中其不準度乘積的最小值，為蒲郎克常數 h ，它們的乘積有 ML^2/T 的因次。如此，動量和位置不準度的乘積為

$$\Delta p \Delta x \geq h$$

此處 h 為 6.63×10^{-34} 焦耳·秒。一個有數據的例題將使此結果容易瞭解。

對一恆定質量而言，此原理變成 $m \Delta x \Delta v \geq h$ 。於是一顆質量20克的子彈具有速度不準量 $\Delta v = 10$ 厘米/秒，它的位置將會有不準量 $\Delta x \geq 3.3 \times 10^{-29}$ 厘米。

如一電子有速度不準量 $\Delta v = 10^3$ 厘米/秒，則 Δx 計算出為