

固態物理 電子學

劉大璋 編著

新興圖書公司

固態物理電子學

劉 大 璋 編著

新興圖書公司

固態物理電子學

劉大璋 編著

出版：新興圖書公司

發行：時代圖書有限公司

香港九龍彌敦道 500 號一樓

3-308884

印刷：慶年柯式印刷公司

版權所有 * 不准翻印 1979年3月版

目 錄

第一章 粒子與波動

| | |
|------------------------------|----|
| 1—1. 物理電子學 | 1 |
| 1—2. 電荷來源 | 3 |
| 1—3. 光的波動性質 | 5 |
| 1—4. 光的粒子特性 | 7 |
| 1—5. Compton 效應 | 9 |
| 1—6. Einstein 之相對方程式 | 12 |
| 1—7. 粒子之波動特性 | 15 |
| 1—8. 波動力學, Heisenberg 之不準確原理 | 19 |

第二章 原子結構

| | |
|------------------------------|----|
| 2—1. Planck 之量子假說 | 24 |
| 2—2. 光譜數據, Bohr 之假定 | 27 |
| 2—3. 氫光譜 | 29 |
| 2—4. Sommerfeld 之橢圓軌道原子模型 | 33 |
| 2—5. 鹼金屬之光譜 | 39 |
| 2—6. X線之吸收光譜與發射光譜 | 43 |
| 2—7. 一般光譜 | 47 |
| 2—8. Zeeman 效應與 Pauli 之不相容原理 | 50 |

第三章 晶體結構

| | |
|------------|----|
| 3—1. 晶系之分類 | 56 |
|------------|----|

| | |
|-----------------|----|
| 3—2. 晶體之密結構 | 59 |
| 3—3. 結晶內力與固體之分類 | 62 |
| 3—4. 晶體內原子能階之分劈 | 65 |
| 3—5. 晶體之區域結構 | 69 |

第四章 幾種重要晶型與固體之電子結構

| | |
|----------------------|-----|
| 4—1. 金屬晶體 | 79 |
| 4—2. 游子晶體 | 86 |
| 4—3. 價晶體 | 97 |
| 4—4. 固體之電子結構與導電性質之關係 | 102 |
| 4—5. 金屬之自由電子理論 | 106 |

第五章 統計力學

| | |
|-------------------------|-----|
| 5—1. 統計力學與分布函數 | 111 |
| 5—2. 古典與半古典統計學 | 115 |
| 5—3. 量子統計學 | 124 |
| 5—4. 自由電子之平均能量及比熱 | 130 |
| 5—5. Sommerfeld 模型之表面現象 | 134 |
| 5—6. 脫出電子之分布函數 | 139 |
| 5—7. 分布函數之衰頹性 | 143 |

第六章 自由電子運動之導電及碰撞性質

| | |
|------------------------------------|-----|
| 6—1. 電子移動率 | 148 |
| 6—2. Boltzmann 之況狀方程式; Lorentz 之解法 | 151 |
| 6—3. 金屬之導電係數 | 157 |

| | | |
|------|----------|-----|
| 6—4. | 格子振動 | 162 |
| 6—5. | 自由電子之熱散射 | 165 |
| 6—6. | 低溫時之導電係數 | 169 |
| 6—7. | 熱振動與熱膨脹 | 172 |
| 6—8. | 金屬之導熱係數 | 175 |
| 6—9. | 接觸面上之熱平衡 | 180 |

第七章 半 導 體

| | | |
|------|--------------------|-----|
| 7—1. | 本質半導體 | 185 |
| 7—2. | 外質半導體 | 187 |
| 7—3. | 兩種典型外質半導體 | 190 |
| 7—4. | 半導體之自由電子理論 | 195 |
| 7—5. | 各種半導體內 Fermi 平面之位置 | 199 |
| 7—6. | 平衡濃度及少數載體之壽命 | 204 |
| 7—7. | 少數載體之擴散 | 208 |
| 7—8. | 電子與電洞之有效質量 | 212 |
| 7—9. | Hall 效應 | 215 |

第八章 熱游子發射與場發射

| | | |
|------|------------------|-----|
| 8—1. | 熱游子發射 | 223 |
| 8—2. | Schottky 效應, 場發射 | 228 |
| 8—3. | 金屬陰極與原子膜陰極 | 234 |
| 8—4. | 塗氧化物陰極 | 237 |
| 8—5. | 熱游子二極真空管之空間電荷 | 242 |
| 8—6. | 熱游子二極真空管之特性 | 247 |

| | | |
|------|------------------|-----|
| 8—7. | 熱游子三極真空管之特性..... | 253 |
| 8—8. | 噪音問題..... | 259 |

第九章 光電發射與二次發射

| | | |
|------|---------------------|-----|
| 3—1. | 光電發射..... | 265 |
| 9—2. | 容積光電效應..... | 269 |
| 9—3. | 高產量光電陰極..... | 274 |
| 9—2. | 二次電子發射..... | 277 |
| 9—5. | 二次電子之脫出機構與產生機構..... | 282 |
| 9—6. | Whiddington定律..... | 287 |
| 9—7. | 高產量二次發射靶子..... | 291 |
| 9—8. | 二次發射對於真空管之影響..... | 294 |
| 9—9. | 光電倍增器..... | 299 |

第十章 障壁層整流

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| 10—1. | 金屬半導體接觸..... | 305 |
| 10—2. | 金屬半導體整流器..... | 311 |
| 10—3. | 金屬半導體接觸整流之特性..... | 317 |
| 10—4. | 若干功率金屬半導體整流器..... | 322 |
| 10—5. | 點觸整流器..... | 326 |
| 10—6. | 金屬半導體整流器之應用..... | 329 |

第十一章 $p-n$ 接合二極體

| | | |
|-------|--------------------|-----|
| 11—1. | $p-n$ 接合二極體..... | 334 |
| 11—2. | $p-n$ 接合之整流特性..... | 340 |

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 11—3. | 接合二極體之等值電路..... | 344 |
| 11—4. | 過渡區域內之破裂現象..... | 350 |
| 11—5. | $p-n$ 接合材料之調製..... | 353 |
| 11—6. | 若干不同 $p-n$ 接合二極體..... | 361 |

第十二章 電 晶 體

| | | |
|-------|------------------------|-----|
| 12—1. | 接合三極體..... | 368 |
| 12—2. | 電晶體之直流特性..... | 372 |
| 12—3. | 電晶體之交流特性..... | 375 |
| 12—4. | 底電阻與收集極電容..... | 383 |
| 12—5. | 底寬度調幅，貫穿效應..... | 386 |
| 12—6. | 底區域內其他若干因素之影響..... | 391 |
| 12—7. | 收集極點觸之電流放大..... | 397 |
| 12—8. | 崩裂性放大與 $p-n$ 鉤形放大..... | 401 |
| 12—9. | 功率放大，較高溫度下電晶體之運用..... | 407 |

第十三章 電晶體電路

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| 13—1. | 電晶體等值電路之幾種模型..... | 412 |
| 13—2. | 底接地聯接..... | 418 |
| 13—3. | 發射極接地聯接..... | 423 |
| 13—4. | 收集極接地聯接..... | 426 |
| 13—5. | 電晶體振盪器..... | 429 |
| 13—6. | 特殊電晶體電路..... | 436 |
| 13—7. | 比量電晶體電路..... | 437 |

第十四章 半導體內之光效應

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 14—1. | $p-n$ 接合與金屬半導體接觸內之光效應..... | 442 |
| 14—2. | 實用光電電池..... | 445 |
| 14—3. | 弱光信號檢波器..... | 449 |
| 14—4. | 日光蓄電池與原子蓄電池..... | 453 |
| 14—5. | 光導電..... | 458 |
| 14—6. | 光導電動力學..... | 464 |
| 14—7. | 實用光電導體..... | 469 |

第十五章 固體之發光

| | | |
|-------|---------------|-----|
| 15—1. | 發光及發光固體..... | 475 |
| 15—2. | 特性發光..... | 479 |
| 15—3. | 非特性發光..... | 481 |
| 15—4. | 發光之效率..... | 487 |
| 15—5. | 光發光與陰極發光..... | 489 |
| 15—6. | 電發光..... | 494 |
| 15—7. | 光放大器..... | 498 |

第十六章 導體與半導體內之熱效應

| | | |
|-------|---|-----|
| 16—1. | 固體之熱性質..... | 507 |
| 16—2. | 白熾光源之發射..... | 510 |
| 16—3. | 熱電阻體..... | 513 |
| 16—4. | 熱體輻射及其溫度之測量..... | 519 |
| 16—5. | Thomson 效應, Peltier 效應及 Seebeck 效應..... | 527 |

| | | |
|-------|---------|-----|
| 16—6. | 熱電電路之計算 | 532 |
| 16—7. | 熱電偶及其應用 | 536 |

第十七章 絕緣體之電性

| | | |
|-------|------------|-----|
| 17—1. | 固體內之格子缺陷 | 539 |
| 17—2. | 固體內格子缺陷之擴散 | 545 |
| 17—3. | 絕緣體之游子導電係數 | 550 |
| 17—4. | 真空容電器之充電 | 556 |
| 17—5. | 介質之極化 | 560 |
| 17—6. | 局部電場之計算 | 565 |
| 17—7. | 介質損失 | 569 |
| 17—8. | 固體介質之電破裂 | 574 |
| 17—9. | 電變阻體 | 578 |

第十八章 電性材料及其應用

| | | |
|--------|------------|-----|
| 18—1. | 強電性 | 581 |
| 18—2. | 強電性材料之分類 | 583 |
| 18—3. | 強電性之理論 | 589 |
| 18—4. | 極化之變遷及晶區理論 | 593 |
| 18—5. | 強電性物質之滯後現象 | 598 |
| 18—6. | 強電性記憶裝置 | 601 |
| 18—7. | 介質放大器 | 604 |
| 18—8. | 雙極擺動與介質吸收 | 608 |
| 18—9. | 對於介質設計之標準 | 615 |
| 18—10. | 介質加熱 | 617 |

第十九章 磁性理論

| | | |
|-------|-----------------|-----|
| 19—1. | 磁性物質之極化..... | 626 |
| 19—2. | 反磁性與順磁性..... | 628 |
| 19—3. | 強磁性..... | 634 |
| 19—4. | 反強磁性與鐵磁性..... | 643 |
| 19—5. | 強磁性晶區理論..... | 653 |
| 19—6. | 強磁性物質之滯後現象..... | 657 |
| 19—7. | 磁變阻體..... | 661 |

第二十章 磁性材料及其應用

| | | |
|-------|--------------|-----|
| 20—1. | 永久磁石..... | 668 |
| 20—2. | 高週率感體..... | 673 |
| 20—3. | 強磁性記憶裝置..... | 676 |
| 20—4. | 磁放大器..... | 681 |
| 20—5. | 自轉諧振..... | 685 |
| 20—6. | 強磁性諧振..... | 691 |
| 20—7. | 迴轉器..... | 694 |
| 20—8. | 激射微波放大器..... | 699 |

第二十一章 金屬之超導電性

| | | |
|-------|--------------------|-----|
| 21—1. | 超導電性..... | 704 |
| 21—2. | 超導電之理論..... | 710 |
| 21—3. | 高週率時之超導電性..... | 717 |
| 21—4. | 球超導電性與粒子大小之影響..... | 719 |

| | | |
|------|----------------|-----|
| 21—5 | 中間況狀與晶區結構..... | 722 |
| 21—6 | 超導電性之應用..... | 725 |

第二十二章 固體內之機械力效應

| | | |
|-------|---------------------------------|-----|
| 22—1. | 晶體內應力與應變之關係..... | 729 |
| 22—2. | 固體應變時之能量關係..... | 734 |
| 22—3. | 壓電效應..... | 741 |
| 22—4. | 片狀壓電物質之特性..... | 749 |
| 22—5. | 壓電物質及其應用..... | 756 |
| 22—6. | 電伸縮效應..... | 760 |
| 22—7. | BaTiO ₃ 內之電伸縮效應..... | 767 |
| 22—8. | 磁伸縮效應..... | 773 |

第一章 粒子與波動

1-1. 物理電子學

由純物理之觀點，電子學 (Electronics) 可定義為專門研究電子性質及運動之學科，但實際上可視作研究一切荷電物質之性質及運動之學科。荷電物質不僅限於帶有負電之電子，帶有正電之質子及不帶電荷之中子或中性粒子均包括在內，荷電物質之運動可能發生於固體、液體、氣體或真空內。理論上，凡不為任何物質所佔之空間謂之真空，因此無論固體、液體、氣體之內部，均應含有局部之真空，但不含任何物質廣大無垠之真空，嚴格以言之，於宇宙內似不應存在。不過如星際空間一般物質密度極小之處所，均近似一真空。宇宙間任何處所均應有電場與磁場存在，此等電場與磁場之強度可能各處不相同。電場與磁場對於荷電物質之運動均將發生力作用，電子於任何處所其運動均須受此等場力之影響，至若某處之電場極弱可加以忽視時，則該處荷電物質之運動可視作僅受磁場之影響；若某處之磁場極弱可加以忽視時，則該處荷電物質之運動可視作僅受電場之影響；若某區域之電場與磁場均極微弱可加以忽視時，則進入於該處之荷電物質當以其既得之速度，近似的依照 Newton 第一運動定律作直線運動。

電場乃由電荷之存在所產生，磁場乃由電荷之運動所引起，一原子包含數多正在運動之荷電物質，原子內某一定點電場磁場隨時間變化之情形至為複雜，須視原子本身之構造及周圍之環境而定。原子構造目前尚未能確知，因此原子內電子之運動無法表以一準確方程式；何況一物體內尚包含極大數值之原子，任一原子內任一電子之運動，除須受其母體原子內各電荷所生之場力影響外，尚須受母體以外各原子內所有電荷所生場力之影響。如此複雜之運動，僅能近似的使用統計法加以討

論，例如金屬內自由電子運動之說明，即係由統計力學着手者。

平行板電容器兩端間加有不變電源時，一不變電場即發生於其兩極板間。感應線圈內通有不變電流時，一不變磁場即發生於線圈內。此等不變電場或磁場謂之靜場 (static fields)。靜場介質內電子之運動，除須受介質本身原子內力之影響外，尚須受此等外加靜場之影響；不過靜場內任意一點場力之大小及方向均係一定，其影響電子運動之情形較為簡單。又於此等靜場內物質密度極為稀薄可視作真空處理時，則其中自由電子之運動可視作僅受外加靜場之影響，此相當於高度真空管內電子運動之情形。

若加於電容器為一交變伏數或通於感應線圈為一交變電流時，則電場或磁場均將隨時間變化，此等電場或磁場則謂之動場 (dynamic field)。電子於動場內運動時受力之情形較為複雜。此等動場之變化可能甚緩，如於 60° 之電力週率；可能較快，如於可聽，發射或電視等電訊週率。若一動場係由一可變電場及一可變磁場所合成時，則此動場謂之輻射場 (radiation field)。輻射場之週率亦可由上述之低週率乃至微波、熱波、光波、 x 線、 γ 線、宇宙線等超高週率。

綜合上述，可知物理電子學 (Physical Electronics) 之範圍包括下示之三種主要觀念：

1. 電子在真空內於電場與磁場之影響下運動之觀念；
2. 電子在物體內於其周圍其他一切電子與原子核之影響下運動之觀念；
3. 輻射場內電子間相互作用之觀念。

至於固態物理電子學 (Solid State Physical Electronics) 所論者，則僅及固體內電子之運動以及固體之表面現象。此等電子運動之狀況及支配固體之結構，物理性質，化學性質，以及其表面接觸與表面發

射等性質。

以物理電子學所論之原理為基礎於工程上之應用，乃電子工程師之任務；一切與應用有關之事項，乃屬於應用電子學或工程電子學論討之範圍。其中發展最早，應用最廣，且正在繼續發展中者即為電訊之領域，包括可聽、輻射、電視及雷達等工程。其次為照明之領域，包括光電管，充氣管蒸氣管及螢光管等裝置。再次為工業電子學之領域，包括整流、反整流、變頻、自動操縱、介質加熱、感應加熱及伺服機構等。最後為電子測量之領域，包括一切測定各電磁數量、力、時間、距離、溫度、光度、顏色等電子儀錶以及電子計算機等原理，構造及測法。

1—2. 電荷來源

近代物理發展至目前為止，認為原子係由帶負電荷之電子環繞帶正電荷之原子核作軌道運動。根據 Millikan 油滴法實驗所得經 1936 年修正之數值，一個電子所帶之負電荷約為 $1.602 \times 10^{-19} \text{c}$ 。一個質子所帶之正電荷，其大小與此相等，符號與之相反，原子之核外電子數與原子核所帶正電荷之個數相等，且各種元素之原子核所帶正電荷之個數適與化學週期表上之原子序相同。於正常況狀下，原子係保持電中性，原子核之正電荷與核外電子之負電荷相平衡；於原子受到外力時，則可能失去或獲得一二個核外電子以形成正負游子。任何化合物均係由成羣之原子密結而成。一電子於此等集合物體之內部，於一定時點有一定位置。因其周圍一切其他正負電荷之引力與斥力而持有一定之位能，同時因其運動之速度而持有一定之動能。一般荷電物質將自動由位能高處向低處運動，此時其速度將漸次增大，一部分位能被變為動能。若兩電子互相碰撞，能量亦可交換於此兩電子間。因此，一物體於未受外力時，其所持各電子係不斷運動於此物體內，一電子之位能與動能可以互相變換，各電子間之能量亦可互相變換，但此物體之總持能於未受外力

時將始終保持不變，於任何時點物體內各運動粒子間成立一動力平衡 (dynamical equilibrium)。由此可知，任何物體均可為荷電粒子之電位來源。若干相異物體互相串接成爲閉路時，其中若干位能較高之電子將自動向位能較低處運動以形成電流，故大多數固體、液體、氣體均可成爲一電子來源。蓄電池供電於充氣管卽爲顯著之一例，蓋整個自閉電路內包含各種不同之固體、液體與氣體，均可供給所需之荷電粒子以載運電流。

如後所述固體金屬爲一種原子晶體，各原子核係分布於均勻之結晶格子上，核外電子則係繞原子核作軌道運動。每原子至少持有一個最外層之軌道電子，其持能最高，軌道突出可能至相鄰原子之範圍。此等電子在常溫下卽可由一原子運動至相鄰之原子，故大多數金屬每原子至少持有一能自由運動於各原子間之電子，此種電子謂之自由電子 (free electron)。其餘僅能環繞其母體原子核作軌道運動之電子，則謂之束縛電子 (bound electrons)。外加一電位差於一金屬線之兩端時，此等自由電子卽將爲導線內之電場所加速，發生由電源負端向正端經由導線之運動而形成電流，故金屬爲一種極豐富之導電電子之來源。

液體導電則有賴於溶液內中性分子之游離，一個液體分子爲其他高速運動之粒子所碰撞，可能被分解爲正負游子，此等游子被分解後隨液體之分子作熱運動，若於液體內插入兩電極並外加一電源時，則正負游子爲電場所加速各向其異名電極漂移而形成電流，故液體乃爲一導電荷電粒子之來源。

氣體導電亦有賴於中性分子或原子之碰撞游離，一氣體原子爲外來高速之微粒子擊中其外層之一軌道電子時，若外來粒子之動能足以將被擊之軌道電子衝出其原子母體，則被擊之原子將喪失一電子成爲一單價正游子，被衝出之軌道電子乃成爲一自由電子，此等正游子與電

子亦將各向外加電源之異名電極運動以形成電流，使氣體分子發生碰撞游離之外來粒子，可能爲一自由電子，爲一光子 (photon)，爲一游離子，亦可能爲一中性分子。

電流通過液體、氣體或真空時，必須有兩固體電極以便與電源之兩端相連接，大多數電極材料均係採用金屬；通有電流時，金屬內之自由電子必須由陰極脫出金屬表面，進入於兩極間之液體、氣體或真空內運動，而至陽極進入於另一金屬返回電源，此相當於電極與液體、氣體或真空境界面上電子運動之情形。若兩極間爲高度真空，則於一電子脫出陰極之金屬表面進入於真空運動時，其母體原子將因喪失一電子而帶正電荷，由於此原子之正電荷與脫出電子之負電荷間之電像力，有將電子吸回金屬表面之趨向，此乃金屬對自由電子之表面束縛；此電子必須由外界吸收充分能量以增高其動能，直至能克服電像引力，電子始可由表面脫出，此種事項謂之金屬表面之電子發射。水銀爲唯一之液態金屬，亦可用作電子之發射表面。

若干固體、液體或氣體所持之自由電子或可以自由運動之正負電荷極爲微少，此等物體不能用作導電電荷來源；不過於其內部加有極強之電場時，亦可通過相當大量之電流。

由金屬表面脫出於真空內單個電子之運動，其粒子之性質甚爲明顯，至於大量脫出電子之集體運動，金屬內自由電子之運動，以及其他各種粒子之運動，是否持有波動之性質，乃爲本章主要討論之問題。

1—3. 光的波動性質

1912年 Friedrich 與 Knipping 試以 X 線之光束透射金屬薄片攝影成功* 乃發現晶體對 X 線之繞射，目前成爲研究固體結構之一重要手段。X 線透過晶體打擊其後面所置之感光板，露光若干小時經顯像

* Friedrich, Knipping, Laue: Bayer Akad. Wiss., 1912.