

15.1010/171
科學圖書大庫

電子工程學及其應用

譯者 沈錫祥

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

電子工程學及其應用

譯者 沈錫祥

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會
監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有



不許翻印

中華民國六十七年十一月八日初版

電子工程學及其應用

基本定價 4.80

譯者 沈錫祥

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

版者 財團法人 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號
發行者 財團法人 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 15795 號
承印者 福村彩色印刷廠有限公司 台北市長安東路二段 66 號

我們的工作目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成爲事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，允爲社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啓發，始能爲蔚爲大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啓導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尚有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏爲監修人，編譯委員王洪鎰氏爲編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分爲叢書，合則大庫。爲欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特掬誠呼籲：

自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；

大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

譯者序

本書是從美國哥倫比亞大學教授 Jacob Millman 及 Christos C. Halkias 兩位先生，1976年出版的“Electronic Fundamentals and Applications: For engineer and scientists”翻譯而成，據作者在序言中說：這書是從他們1972年所出版的“Integrated Electronics: analog and digital circuits and systems”摘錄而成，適合作大專院校各理工科系及技術人員電子學教科書之用。

查 Integrated Electronics 一書在國內，已有很多大專院校採用，並已有二種以上的中文譯本出版，是一本完整的現代電子學教科書，惟內容偏重於理論、設計及數學計算及演證，對將來從事於電子裝備系統使用與維護的學生而言，稍嫌艱深，亦且無此必要。

本書與 Integrated Electronics 一書相比，內容雖大致相同，但就因材施教的目的而言，至少有下列三點改進。

第一，他們把大部份的數學計算及演證刪除了，不但節省很多篇幅，亦使讀者容易吸收和進修。

第二，他們把一般基本電路分析的定律定理，歸納於附錄三之內，讀者在研讀本文，而有必要時，可同時翻閱它的相關部份，參考引證，當然更容易瞭解。

第三，在編排方面，亦作了部份合理的調整，更顯得條理分明。

承徐氏基金會之囑，翻譯本書，深感才學不足，難獲預期效果，除力求文句通順，切合原書內容外，倉卒付印謬誤必多，尚望專家學者，及使用本書進修之同學，不吝指正及建議，當於再版時，加以修正。

沈錫祥 識於台北

66年12月30日

Enc 19/03

作者序

現代電子系統中，無論是類比的，或是數位的，主要包含固態積體電路組件（如體積電路切片，體積電路包裝，或簡稱積體電路），電及機械的裝配，以及輸入及輸出轉換器（如磁帶、帶、陰極射線管、錄音機、微音器及揚聲器等等）。如計算、控制、通信、資料處理、儀器及研究發展實驗等的系統，在所有工程及科學的方法中，都已經非常普遍的用積體電子學了，所以從事於這種工作的人們，對這種市面上可以買到的電子零件，所擔任的任務、用途及限制等等知識，一定要弄得很清楚，並且要具備它的工作知識。本書的目的，就是為工程學者，科學家及技術人員，提供這些資料。尤其為化學、工業、材料、機械、核子、土木、太空工程師，以及主修生物醫學者、化學家、計算機使用者，地質學家、冶金學家、物理學家，有經驗的心理學家等而設計，它對工程助理、技術員及系統管理者，亦都很有助益。

讀者應具有大學一年級，物理課程電磁學內所介紹的簡單電路觀念。網路定理第一課內所提資料是有帮助的，但並不是一定要具備的。重要定理如克希荷夫電流電壓定律，戴維寧定理等，在電路分析時所需要的知識，都已在本書附錄三內，加以摘要寫出。這附錄內的各節，如認為必要時，可與課文同時學習。我們假定讀者已經學過初級微積分，但並不一定要求真正能把書內的計算完全弄清楚。固態物理的知識並不要求事先知道。總之本書可作大學二三年級電子專門科系以外、工科、理科及技術有關科系一學期課程之用。

作者在1972年，由紐約 McGraw-Hill 圖書公司所出版的“Integrated Electronics: Analog and Digital Circuit and System（以後簡寫為 IE）是為電子工程學生作三學期教科書所寫的，——據譯者所知，該書在台灣已有很多大專電子工程科系所採用，而且已有中文譯本出版。——本書即從上述書中資料，加以簡化、濃縮，並重新編排而成，為電子設計專家以外，應用電子學者很完整的讀物。本書重點在介紹儀表及電子系統內，積體電路之使用。至於電子工程專家，所要更深入，更寬廣的裝置物理學，精確

的網路，硬體的細節，以及設計的有關知識，則仍請閱讀 IE。

本書的內容，即符合上述精神。第一第二章把半導體的物理性能，作一簡單而清晰的介紹，並說明兩個半導體的接面為什麼可以整流。第三章說明二極體的功用，並指出這些電路的如何分析。第四章利用已發展的物理觀念，以說明雙極接面電晶體的特性，第五章說明如何一次製作幾百、幾千個二極體、電晶體、電阻，及電容器於一個切片上，而成所謂積體電路。第六章至第九章研究數位電路之細節及數位系統之使用，它們包括組合的、順序的，以及場效電晶體的大型積體數位系統。在本書內，從第十章開始，研究類比資料（除第二章二極體的使用）。在第十章內介紹電晶體的小信號模型，並分析低頻放大器。放大器之高頻響應，則在第十一章內說明。第十二章內討論反饋放大器，第十三章內討論運算放大器之特性，及基本類比積體電路。使用運算放大器所構成之類比系統，分兩章討論，用於線性放大時，在第十三章內討論；用於非線性放大時，則在第十四章內討論。

電子工程的使用非常廣闊，如整流器（含電容濾波器）、截波器、電壓調整器、邏輯閘（及閘，或閘，非或閘，非及閘，二極體電晶體邏輯，電晶體電晶體邏輯，射及藕合邏輯等），二進位加法器，解碼／解多工器，資料選擇／多工器，編碼器，祇讀記憶器（ROM），數位比較器，同位核對器，轉移記錄器，計數器，隨意出入記憶器（RAM），低頻放大器，高頻放大器，反饋放大器，差訊放大器，運算放大器，電壓至電流，及電流至電壓變換器，類比計算機，主動濾波器，方波產生器，脈衝產生器，三角產生器，再生比較器，數位至類比（D/A），及類比至數位（A/D）變換器等等都是電子的設備。

幾乎所有部份，都使用實際的裝置特性（廠商供應），這樣能使讀者，在不知不覺中記得裝置各參數正常狀況下之大小；某已知程式，在溫度變化時，這些參數的變化，電路內無法避免並聯電容量的效果；輸入及輸出電阻之效應；及荷負對電路工作之影響，凡此種種，對同學們，或實地工作的工程師們，都是非常重要的。因為所設計的電路，並不能專靠理想假設，而必須能在實際狀況下，工作正常、可靠才能滿意。

在本書後面附錄四內，有習題約 350 個，每章後都有複習問題，共約 340 個。這些題目可以測試讀者對本書內容基本觀念的瞭解。並由此可使讀者增加一些電子電路及系統分析的經驗，及其使用。幾乎所有數字的問題，都採用真正的參數值，及規格值。書末附有習題答案，可供學生參考。另外還印有解答手冊，採用本書的教授可向出版圖書公司索取。

有關教授方法，電路性能的說明，使用一致的標記，插圖的注意，書內例題的詳細演算，及複習問題的安排，都在撰寫時加以考慮。我們希望由這些使本書可為自修之用，並使實際工作的工程師們，在這電子學迅速發展的今天，可利用本書，趕上時代。順便提醒大家，這些複習問題是很好的平時測驗問題。

謝謝 Mrs. Maria Salgad 細心地代打原稿。同時非常謝謝 J. Walchuter 及 D. Wah 二位在習題上所給我們幫助。

Jacob Millman
Christos Halkias.

目 錄

譯者序

作者序

第一章 半導體

1-1	荷電質點	1
1-2	場強度，電位，能	1
1-3	能量的單位，電子 伏特 (eV)	4
1-4	遷移率及傳導系數	5
1-5	本質半導體內的電 子及電洞	8
1-6	施體雜質及受體雜 質	10
1-7	半導體中之電荷密 度	11
1-8	鎢及矽的電性	13
1-9	擴散	16
1-10	摘要	17
	複習問題	18

第二章 接面二極體之特性

2-1	開路 $p-n$ 接面	21
2-2	以 $p-n$ 接面用作整 流器	24
2-3	伏特 - 安培特性曲 線	26

2-4	V / I 特性曲線與 溫度之關係	29
2-5	二極體電阻	29
2-6	空間電荷，或過渡 區電容量 C_T	30
2-7	儲存於二極體內之 少數載子	33
2-8	擴散電容量	35
2-9	崩潰二極體	36
2-10	光發射二極體	38
	複習問題	39

第三章 二極體電路

3-1	二極體用作電路元 件	41
3-2	負荷線觀念	43
3-3	片斷式線性二極體 型	44
3-4	截波 (限制) 電路	46
3-5	兩獨立階層之截波	49
3-6	崩潰二極體 - 電壓 調整器	51
3-7	整流器	58
3-8	電容器濾波器	53
3-9	其他二極體電路	61
	複習問題	63

第四章 電晶體特性

4-1	接面電晶體.....65	6-3	及閘..... 116
4-2	電晶體電流之分流.....67	6-4	非電路，或反相器 電路..... 118
4-3	電晶體用作放大器.....70	6-5	抑通操作..... 121
4-4	電晶體構造.....70	6-6	不相容或閘電路..... 122
4-5	共基極組態.....72	6-7	狄摩根定律..... 124
4-6	共射極組態.....74	6-8	“非及”及“非或” 二極體 - 電晶體 邏輯 (DTL) 閘 ... 126
4-7	共射極截止區.....78	6-9	改進的 (積體電路) DTL 閘 129
4-8	共射極飽和區.....80	6-10	電晶體 - 電晶體邏 輯 (TTL) 閘 133
4-9	制式電晶體接面電 壓值..... 82	6-11	輸出級..... 133
4-10	共射極電流增益.....86	6-12	電阻 - 電晶體邏輯 (RTL) 136
	複習問題.....87	6-13	傳播延遲時間..... 137
第五章	積體電路的製造 及特性曲線		複習問題..... 138
5-1	積體電路技術.....91	第七章	組合的數位系統
5-2	基本單石積體電路.....93	7-1	標準閘組成.....141
5-3	晶膜生長.....96	7-2	二進位加法器 143
5-4	面罩及蝕刻.....96	7-3	解碼器 / 解多工器.....150
5-5	雜質之擴散.....97	7-4	資料選擇器 / 多工 器 153
5-6	單石電路的電晶體.....98	7-5	編碼器 154
5-7	單石二極體 101	7-6	祇讀所記憶 (ROM) 158
5-8	積體電阻器 102	7-7	ROM的用途..... 161
5-9	積體電容器及電感 器 104	7-8	數位比較器 164
5-10	金屬 - 半導體間之 連接..... 106	7-9	同位核對器 / 產生 器 166
	複習問題.....108		複習問題 168
第六章	數位電路		
6-1	一個系統的數位 (二 進位) 運算.....111		
6-2	或閘.....114		

第八章 順序數位系統

- 8-1 一數元記憶 171
- 8-2 正反器 174
- 8-3 移位記錄器 179
- 8-4 計數器 183
- 8-5 計數器的應用 189
- 複習問題 191

第九章 MOS數位電路及LSI系統

- 9-1 接面場效電晶體... 193
- 9-2 金屬 - 氧化物 - 半導體場效電晶體 (MOSFET) 197
- 9-3 數位MOSFET電路 203
- 9-4 動態MOS電路... 208
- 9-5 MOS 移位記錄器 210
- 9-6 MOS 祇讀記憶... 213
- 9-7 隨意出入記憶 (RAM) 215
- 複習問題 219

第十章 低頻放大器

- 10-1 共射極組態之圖解分析 221
- 10-2 電晶體拼合型 ... 225
- 10-3 電晶體電路的線性分析 226
- 10-4 射極追蹤器 231
- 10-5 近似的共基極放大器解法 232

- 10-6 電晶體放大器各種組態之比較 232
- 10-7 有射極電阻共射極放大器 233
- 10-8 串級電晶體放大器... 235
- 10-9 場效電晶體小信號模型 239
- 10-10 低頻共源極及共吸極放大器 241
- 10-11 工作點 243
- 10-12 偏壓的穩定性 245
- 10-13 自給偏壓或射極偏壓 247
- 10-14 線性積體電路的偏壓技術 248
- 10-15 FET之偏壓法 249
- 複習問題 251

第十一章 放大器的頻率響應

- 11-1 放大器的分類 253
- 11-2 放大器的失真 253
- 11-3 放大器的頻率響應 254
- 11-4 電壓增益作用一般化 257
- 11-5 放大器的步進響應 257
- 11-6 串接級的通頻帶 ... 260
- 11-7 RC 耦合放大器 ... 262
- 11-8 射極旁路電容器對低頻響應的效應 ... 264
- 11-9 拼合 π 共射極電晶體模型 266
- 11-10 拼合 π 參數 268
- 11-11 共射極短路電流增

益..... 268

- 11-12 單級共射極電晶體放大器之響應..... 271
- 11-13 兩串接共射極電晶體級之高頻響應..... 273
- 11-14 高頻共源極放大器..... 274
複習問題..... 276

第十二章 反饋放大器

- 12-1 反饋的觀念..... 279
- 12-2 有反饋時之轉移增益..... 282
- 12-3 負反饋放大器的一般特性..... 284
- 12-4 輸入電阻..... 286
- 12-5 輸出電阻..... 287
- 12-6 反饋對放大器頻帶寬度的效應..... 288
- 12-7 反饋放大器舉例..... 289
- 12-8 電流並連反饋..... 291
- 12-9 電壓並連反饋..... 292
- 12-10 反饋放大器的分析方法..... 293
- 12-11 電壓串連反饋對..... 295
- 12-12 電流串連反饋電晶體級..... 298
- 12-13 電流並連反饋對..... 300
- 12-14 電壓並連反饋電晶體級..... 302
- 12-15 反饋放大器內之不穩定..... 304
- 12-16 正弦波振盪器..... 307
複習問題..... 309

第十三章 運算放大器

- 13-1 基本運算放大器..... 311
- 13-2 差訊放大器..... 313
- 13-3 射極耦合差訊放大器..... 315
- 13-4 差訊放大器的轉移特性曲線..... 317
- 13-5 IC 運算放大器的實例..... 318
- 13-6 間離誤差電壓及電流..... 319
- 13-7 基本運算放大器之用途..... 322
- 13-8 差訊直流放大器..... 325
- 13-9 穩定的交流耦合放大器..... 326
- 13-10 類比積分及微分..... 327
- 13-11 電子類比計算..... 328
- 13-12 主動濾波器..... 330
- 13-13 積體電路調諧放大器..... 335
- 13-14 縱接視頻放大器..... 338
複習問題..... 339

第十四章 運算放大器非線性類比系統

- 14-1 比較器..... 341
- 14-2 取樣及保持電路..... 343
- 14-3 精密的交流/直流變壓器..... 344
- 14-4 波形產生器..... 346
- 14-5 再生比較器(斯密特激發器)..... 351

14-6	射極耦合邏輯(ECL))	353	附錄 3-1	電阻網絡	367
14-7	數位一至一類比變換 器	357	附錄 3-2	網絡定理	374
14-8	類比一至一數位變換 器	361	附錄 3-3	正弦穩定狀態	378
	複習問題	363	附錄 3-4	簡單的正弦網絡分 析	383
附錄一	一般物理常數	365	附錄 3-5	RC 電路的步進響 應	389
附錄二	變換因數及字首	366	附錄四	習 題	393
附錄三	網絡定理摘要	367	索 引		471
			習題答案		

第一章 半導體

能使我們區別絕緣體、半導體及金屬的物理特性，將在本章內加以討論。在金屬內電流的產生，是負電荷（電子）的流動。在半導體內，它的電流是由電子及正電荷（電洞）所構成。半導體內可滲以雜質原子，所以它的電流，有時電子佔多數，有時電洞佔多數。在電場影響下，晶體內部電荷的轉移（即漂移電流——Drift current）及濃度不均勻之梯度（擴散電流——Diffusion current）亦將加以研究。

1-1 荷電質點

負電荷的荷電量為 $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ （庫倫），它的重量為 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。附錄一列有很多重要的物理常數，附錄二內列有變換因數及字首，從這些數字可以很容易的看出，用每秒多少電子數，是可以代表電流大小的。例如每一個電子的電荷為 $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，所以每庫倫的電子數為上數的倒數，約為 6×10^{18} 。更進一步，每秒1庫倫的電流為1A（安培），1 pA（1 picoampere = 10^{-12} A ）的電流，代表每秒有6百萬個電子在流動，可是這1 pA的電流實在太小，實際測量是太困難了。

正離子的電荷，為電子電荷之整數倍數，祇是它的符號相反而已。單一離子微粒的電荷等於一個電子的電荷，雙離子微粒的電荷等於兩倍電子的電荷。

例如在矽半導體晶體內，三個電子被一對鄰近離子所佔住。此種結構稱為共價鍵（Covalent bond）。在某種狀況下，此構造中有時會損失一個電子，使鍵中留下一個電洞（Hole）。這種共價鍵內的空隙，會在晶體內的離子間移動，而造成自由正電荷的電流。電洞的電荷與自由電子相等，上述電洞用作電荷載子的觀念，將於第1—5節中，再詳細介紹。

1-2 場強度，電位，能

按定義，電場某一點加於單位正電荷的力 f （牛頓），就是此點的電場

2 電子工程學及其應用

強度 ϵ (Field intensity)。牛頓第二定律，求電荷 q (庫倫)，質量 m (公斤)，在電場 ϵ (每公尺伏特)內，運動速度 v (每秒公尺)，所需之力之公式爲

$$f = q\epsilon = m \frac{dv}{dt} \quad (1-1)$$

使用 mks (公尺—公斤—秒)系統爲單位，對以後學習最爲方便，本書內，除另有說明者外，都用此種系統爲單位。

電位 按定義， A 點與 B 點間之電位 V (伏特)即爲單位正電荷由 A 至 B 反抗電場所作之功。此一定義適合於立體 (三因次)。如就一直線 (一因次)而言， A 在 x_0 ，與 B 的距離爲 x ，則按定義等於：

$$V \equiv - \int_{x_0}^x \epsilon dx \quad (1-2)$$

其中 ϵ 代表電場 X 方向之分力。將 (1-2) 式微分，得

$$\epsilon = - \frac{dV}{dx} \quad (1-3)$$

式內負號表示電場由高電位區指向低電位區，在三因次立體中電場等於電位的負梯度 (gradient)。

按定義，**電位能** (Potential energy) U (焦耳)等於電位乘以所要討論之電荷 q ，或

$$U \equiv qV \quad (1-4)$$

在討論電子時， q 應改爲 $-q$ (q 爲電子電荷之大小)， U 與 V 的形式相同，祇是倒過來而已。

能量不減定律 (Law of Conservation of energy) 說：總能量 W 等於位能 U 及動能 $\frac{1}{2}mv^2$ 之和，而且保持不變。故空中任何一點的

$$W = U + \frac{1}{2}mv^2 = \text{常數} \quad (1-5)$$

茲列舉說明此定律：設有兩平行之電極 (爲圖 1-1a 之 A 與 B)，分開的距離爲 d ， B 點的電位比 A 點負 V_d 。今有一電子離開 A 之表面，以速度 V_0 奔向 B 電極，問他到達 B 電極之速度 v 爲多少？

* 此符號 $\equiv$ 用以表示“按定義等於”。

由定義，公式（1—2），先讓 A 電極接地，故其電位為零。則 B 電極之電位為 $V = -V_d$ ，故其電位能為 $U = -qV = qV_d$ 。由 A 電極至 B 電極之總能量為

$$W = \frac{1}{2} m v_o^2 = \frac{1}{2} m v^2 + qV_d \quad (1-6)$$

這方程式表示 v 一定小於 v_o ，因為舉例中說明電子向被拒絕電場的方向移動，很明顯地這個結果是對的。請注意，在此保守系（conservative system）中，電子所獲得的最後速度 v ，與兩極間電場分佈之變化方式無關，而祇與位差 V_d 之大小有關。同時，如電子能到達電極 B ，那末它一開始的速度一定要符合 $\frac{1}{2} m v_o^2 > qV_d$ 的條件。否則，（1—6）式的 v 為一虛數，是一個不可能的結果。下面對此將作一較詳細的討論。

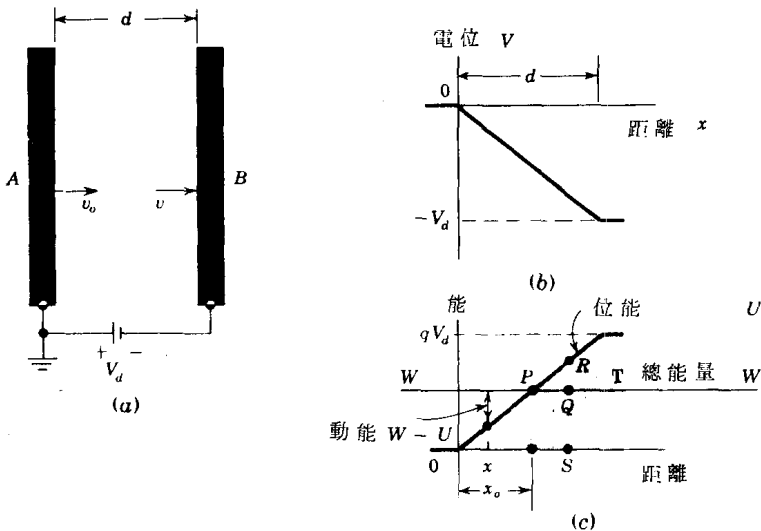


圖 1—1 (a) 一電子離開電極 A ，初速為 v_o ，在減速電場內向電極 B 移動。
(b) 電位圖。 (c) 電極間位能障壁 (Barrier)。