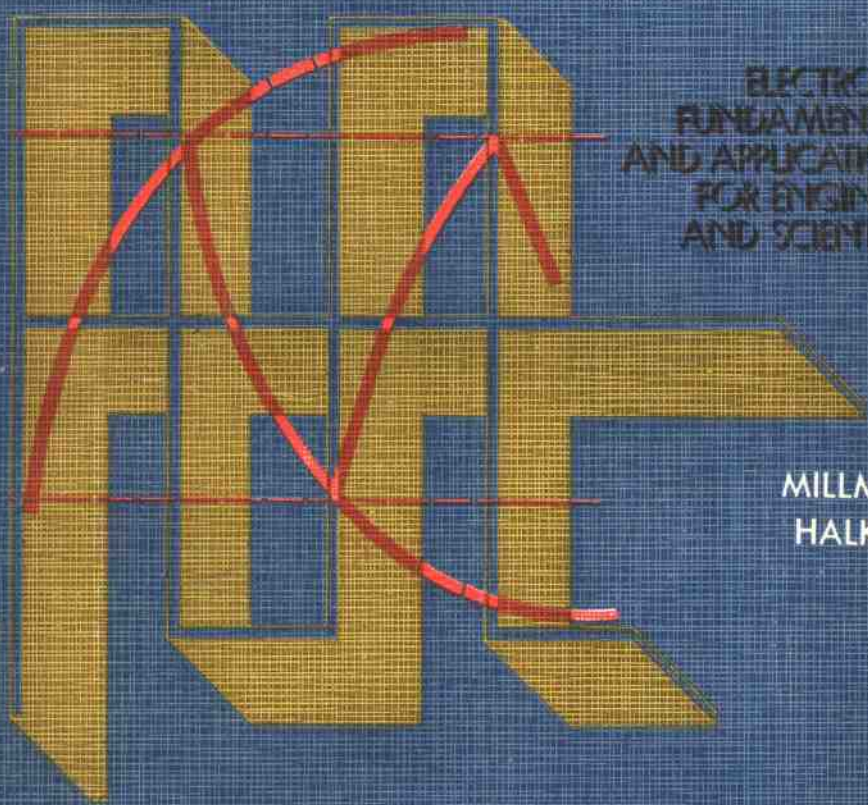


密尔曼应用电子学

謝芳生博士 譯



ELECTRONIC
FUNDAMENTALS
AND APPLICATIONS
FOR ENGINEERS
AND SCIENTISTS

MILLMAN
HALKIAS

東華書局印行

塞尔曼應用電子學

著 者

JACOB MILLMAN
CHRISTOS C. HALKIAS

譯 者

謝 芳 生 博 士

東華書局印行



版權所有・翻印必究

中華民國六十六年三月初版

大專
用書 密爾曼應用電子學 (全一冊)

定價 新臺幣一二〇元

(外埠酌加運費匯費)

原著者	Millman	&	Halkias
譯者	謝	芳	生
發行人	卓	鑫	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	中 臺 印 刷 廠		
	臺中市公園路三十七號		

行政院新聞局登記證：局版臺業字第〇七二五號
(66002)

東華書局電子及電機叢書

書名	編著者	譯者	書名	編著者	譯者
電子裝置及電路	Millman & Halkias	謝芳生 (華澤)	積體電路	郭雙發	
工程電磁學	Hayt, Jr.	謝芳生	基本電路	Leach	郭雙發 郭志鴻
基本電路理論	Desoer & Kuh	謝芳生	電晶體電路	陳六湖	
積體電子學	Millman & Halkias	謝芳生	電子電路初步	陳雲湖	
電子裝置理論及電路理論	Boylestad & Nashelsky	謝芳生	電子計算機	Bartee	楊維楨
網絡分析	Valkenburg	謝芳生	電子計算機	蔣尚民等	
密應用電子學	Millman & Halkias	謝芳生	電子計算機科學	Forsythe等	陳維龍
密應用電子學	莊政義 陳盛有		PL/I 與計算學	陳維龍	
電子學	張煜		COBOL 程式設計	楊維楨 羅維楨	
工業電子	G. M. Chute & R. D. Chute	陳茂保	計算機科學導論	T. Bartee	林洪權
工業電子學	楊維楨 張正		程式語言	陳維龍	
物理及固態電子學	Kana'an Kano	張煜	系統分析	楊維楨	
應用電子學	Burke, Irvin & Mann	潘樹楠	電工原理	張煜	
電子實驗	黃永文		電工學導論	Hayt & Hughes	郭雙發
電子實習	劉樹珊		基本電工學	Fitzgerald等	李文寶
自動控制	莊政義		實用電工學	劉樹珊	
電子儀表	陳雲湖 余標憲		輸配電	Stevenson, Jr.	劉群章
工程電磁學	Popovic	劉茂度	電工原理	Corcoran & Reed	樊哲智
電磁學	張為秋		電機機械	Hindmarsh	樊哲智
近代電路學	Calahan等	李文寶	電儀表學	高道旭	
電路學	Boylestad	李文寶 李增潤	電機學圖路		

發行所：台北市峨嵋街 105 號 電話：3819470；3114027

(詳細目錄函索即寄)

序

現代化的電子系統（不論是數位式或類比式的）主要都是由固態的積體電路分件（它們被稱為積體切片，積體式包裝，或者就稱為積體，英文簡寫為 IC）之裝配與輸入及輸出方面的變換器組合而成的（後者可以是紙帶或磁性帶、陰極射線管、記錄器、微音器、喇叭之類的）。採用這類積體式電子器材的系統，諸如計算、控制、通訊、資料之處理、儀器、實驗室的研究與發展等，佔工程與科學界中用到的大部份。所以，凡以此為業的人員就必須對這些基本建造單位有明確的認識並能運用它們；知道那些切片在商用上是現成的；它們能擔任些什麼功用；用途如何；限制何在等等。本書的目的就在於為工程方面的學生、科學家、或技術人員提供這方面的資料。說得更明白點，它是供化工、工業工程、材料工程、機械、核子工程、土木、航空工程師們，以及主修生物醫藥的，化學、計算機科學、地質、冶金、物理、和實驗心理學各方面的科學家們用的。工程助理、技工、以及系統工程師們也當能受益。

讀者的背景應當包括簡單的電路觀念，例如大一物理中在電學及磁學裡談及的那些。網絡理論的第一門課中涉及的題材亦屬有助，但不必列為此書的預習課目之一。分析本書中電路時所需的重要理論（克希荷夫的電流及電壓定律，戴維寧定理等）均被節略在附錄 C 中。必要時可將附錄中的各節與正文同時指定閱讀以資配合。我們假定讀者對基本微積分很熟悉，但是在求瞭解本書中大部份材料時這並非極重要的。我們也未假定讀者具有固態物理的知識。總而言之，本書可作一般工程師、科學家、技術人員（但非電子專家）第二年或第三年電子課程一學期的教材。

作者們的另一書“Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems”，McGraw-Hill 書局於 1972 年出於 N.Y. 的

(以下簡稱爲 IE)是專門爲電機系的學生寫的一本三學期用的教本*。本書是將前者予以簡化、重組、並節略，以供電子器材的應用者而非電子器材的設計專家用的。本書若重在積體電路在儀器及電子系統（數位及類比二者）方面的應用。電子工程師們所需要的廣博且深入的知識，諸如裝置的物理學，網路之講究，硬品的詳情，以及設計方面的學問均見 IE 一書。

本書的目錄足以反映上述主旨，第一、二兩章提出的是半導體的簡明的、質方面的敘述，並說明何以二塊半導體的接面會形成一個整流器。第三章討論如何應用這些二極體，並指出如何分析這電路。第四章應用已形成的物理觀念來討論雙載子接面電晶體 (bipolar junction transistor, 亦稱雙極性接面電晶體)。第五章說明如何在一個積體電路內同時製成數以百計（或仟計）的二極體、電晶體、電阻器、和電容器。第六章到第九章詳細地討論了數位電路及這類系統的應用。其中包括結合式與程序式的系統以及場效電晶體的大型數位系統。除了第二章中講到的二極體之應用以外，本書中的類比系統是於第十章開始的，那裡介紹了電晶體的小訊號模型。該章中分析了低頻放大器；放大器的高頻響應則在第十一章中討論。第十二章談的是反饋放大器。運算放大器的特性及基本的類比式積體則放在第十三章中。第十三、十四章中又分別討論了線型與非線型的類比系統（以運算放大器爲基礎的）。

應用的範圍極廣。其中有整流器（包括容式濾波器），剪波器，電壓調節器，邏輯閘（及閘、或閘、非閘、反及閘、DTL 邏輯、TTL 邏輯、射極耦合邏輯等），二進位加法器，解碼器/單化器，資料選擇器/多元器，譯碼器，只讀記憶，數位比較器，同位核對器，移位登記器，計數器，任入記憶，低頻放大器，高頻放大器，反饋放大器，差額放大器，類比計算器，有功濾波器，調諧放大器，類比式比較器，精確的交流/直流變換器，有功探測器，方波發生器，脈衝產生器，

*譯註：譯者於民國六十二年已將這本書譯成中文，由東華書局出版。

三角波產生器，再生式比較器，D/A 與 A/D 的變換器。

大多數地方均採用實際的(商場上現成的)裝置特性曲線。這樣，讀者對於裝置的參數之大小可以有所認識，並清楚在同一型裝置中當溫度改變時參數可以有多少變化，電路中無可避免的並聯電容之作用，以及輸入與輸出電阻對於電路操作的影響。這些問題對學生及實用工程師們是極重要的，因為設計出來的電路必須能在實際環境下正確且可靠地操作而不是在理想化或假設的情況下作用的。

附錄D中有 350 個習題，各章末了處又另有 340 個問題。這些足以測驗讀者對書中提出的基本觀念是否掌握住了，並給他們一些分析及運用電子電路及系統的經驗。在所有數值問題中我們用的幾乎都是實用的參數值及規格。

作者們對於題材的安排，電路性能之說明，採用一致的符號等各方面均深費心思，圖要畫得特別仔細，例題詳細地做出來，複習問題也是一番功夫後的產品。我們希望這樣做能使此書可供自修之用，同時實際工作中的工程師們將會發現此書可以幫助您在日益飛進的電子界中跟進。順便一提：複習問題也是極佳的試題。

爲了她爲稿件打字的技巧我們要謝謝 Maria Salgado 太太。我們也要感謝 J. Waldhuter 與 B. Wah 二位在習題方面所作貢獻。

密爾曼

赫爾賈

密爾曼應用電子學

目 次

第一章 半導體	1~22
§ 1-1 帶電粒子	1
§ 1-2 電場強度, 電位, 及能量	2
§ 1-3 能量的“電子伏”單位	5
§ 1-4 移動率與傳導率	6
§ 1-5 本質半導體內的電子與電洞	10
§ 1-6 施體與受體雜質	12
§ 1-7 半導體中的電荷濃度	14
§ 1-8 鎢與矽的電性	16
§ 1-9 擴散	19
§ 1-10 撮要	21
第二章 接面二極體的特性	23~48
§ 2-1 斷路的 $p-n$ 接面	23
§ 2-2 $p-n$ 接面作為整流器之用	26
§ 2-3 伏特-安培特性曲線	29
§ 2-4 V/I 特性曲線與溫度間的關係	32
§ 2-5 二極體電阻	33
§ 2-6 空間電荷區或變遷區的電容 C_T	35
§ 2-7 二極體中少數載子之儲存	38
§ 2-8 擴散電容	41

2 密爾曼應用電子學

§ 2-9 崩潰二極體·····	42
§ 2-10 發光二極體·····	45
第三章 二極體電路·····	48~77
§ 3-1 二極體作為一個電路單元·····	48
§ 3-2 負荷線的觀念·····	51
§ 3-3 二極體片斷式線型模式·····	51
§ 3-4 截割(限制)電路·····	54
§ 3-5 在二個獨立的階程處截割·····	58
§ 3-6 用崩潰二極體作的電壓調整器·····	61
§ 3-7 整流器·····	62
§ 3-8 電容濾波器·····	68
§ 3-9 其它二極體電路·····	73
第四章 電晶體特性·····	78~108
§ 4-1 接面電晶體·····	78
§ 4-2 電晶體中各項電流分量·····	81
§ 4-3 電晶體作為放大器·····	84
§ 4-4 電晶體的製作·····	85
§ 4-5 共基組態·····	87
§ 4-6 共射組態·····	90
§ 4-7 共射的截止區·····	95
§ 4-8 共射的飽和區·····	97
§ 4-9 典型電晶體接面電壓值·····	100
§ 4-10 共射的電流增益·····	106
第五章 積體電路：製法與特性·····	109~132
§ 5-1 積體電路的製法·····	109
§ 5-2 基本的單晶積體電路·····	111

§ 5-3	晶膜增長	115
§ 5-4	罩子與蝕刻	116
§ 5-5	雜質之滲透	117
§ 5-6	單晶電路的電晶體	117
§ 5-7	單晶二極體	122
§ 5-8	積體電阻器	123
§ 5-9	積體電容器與電感器	126
§ 5-10	金屬與半導體間的接觸點	128
第六章 數位電路		133~171
§ 6-1	系統的數位（二進位）運算	133
§ 6-2	或閘	137
§ 6-3	及閘	140
§ 6-4	非閘或反閘	142
§ 6-5	禁止（致能）運算	147
§ 6-6	互斥或閘電路	147
§ 6-7	德摩根定律	150
§ 6-8	二極體-電晶體式的邏輯反及閘與反或閘	153
§ 6-9	修改後的（積體電路式）DTL 閘	157
§ 6-10	電晶體-電晶體邏輯閘	162
§ 6-11	輸出級	163
§ 6-12	電阻器-電晶體邏輯	166
§ 6-13	傳遞的延遲時間	168
第七章 組合的數位系統		172~209
§ 7-1	標準閘的組合	172
§ 7-2	二進位的加法器	175
§ 7-3	解碼器／單化器	184
§ 7-4	數據選擇器／多元器	188

4 密爾曼應用電子學

§ 7-5 編碼器·····	190
§ 7-6 只能讀的記憶·····	194
§ 7-7 只讀記憶之用途·····	199
§ 7-8 數位式比較器·····	202
§ 7-9 同位核對器／產生器·····	206

第八章 依序的數位系統····· 210~236

§ 8-1 一位的記憶·····	210
§ 8-2 正反器·····	214
§ 8-3 移位登記器·····	220
§ 8-4 計數器·····	225
§ 8-5 計數器的用途·····	232

第九章 金氧半數位電路以及大型系統····· 237~269

§ 9-1 接面場效體·····	237
§ 9-2 金氧半場效體·····	242
§ 9-3 金氧半場效體的數位電路·····	249
§ 9-4 動態金氧半電路·····	254
§ 9-5 金氧半移位登記器·····	257
§ 9-6 金氧半的只讀記憶·····	260
§ 9-7 隨機出入的記憶·····	263

第十章 低頻放大器····· 270~308

§ 10-1 共射組態的圖解法·····	270
§ 10-2 電晶體的混合模型·····	274
§ 10-3 電晶體電路的線型分析·····	276
§ 10-4 射極追隨器·····	281
§ 10-5 共基極放大器的近似解·····	283
§ 10-6 電晶體放大級組態的比較·····	284

§ 10-7	有射極電阻的共射極放大器	285
§ 10-8	串接的電晶體放大器	287
§ 10-9	場效電晶體的小訊號模型	292
§ 10-10	低頻的共源極與共汲極的放大器	294
§ 10-11	操作點	297
§ 10-12	偏壓的穩定性	300
§ 10-13	自偏或射極偏壓	302
§ 10-14	線型積體電路的偏壓方法	303
§ 10-15	場效電晶體的偏壓	304
第十一章 放大器的頻率響應		309~339
§ 11-1	放大器的分類	309
§ 11-2	放大器中的失真(變形)	310
§ 11-3	放大器的頻率響應	310
§ 11-4	推廣了的電壓增益函數	314
§ 11-5	放大器的步級響應	315
§ 11-6	串接各級的通帶	318
§ 11-7	RC 耦合的放大器	321
§ 11-8	射極旁路電容對於低頻響應的影響	323
§ 11-9	共射極電晶體的混合 π 模型	326
§ 11-10	混合 π 之參數	328
§ 11-11	共射極的短路電流增益	329
§ 11-12	共射極電晶體放大器單級的響應	332
§ 11-13	二個串接的共射極電晶體級的高頻響應	335
§ 11-14	高頻下的共源極放大器	336
第十二章 反饋放大器		340~377
§ 12-1	反饋的觀念	340
§ 12-2	有反饋時的轉換增益	343

6 密爾曼應用電子學

§ 12-3	負反饋放大器的一般特性	347
§ 12-4	輸入電阻	349
§ 12-5	輸出電阻	350
§ 12-6	反饋對於放大器頻帶寬的影響	351
§ 12-7	反饋放大器的例子	352
§ 12-8	電流並聯的反饋	354
§ 12-9	電壓並聯的反饋	356
§ 12-10	反饋放大器的分析方法	357
§ 12-11	電壓串聯的反饋對	359
§ 12-12	電流串聯反饋的電晶體級	362
§ 12-13	電流並聯的反饋對	365
§ 12-14	電壓並聯反饋的電晶體級	368
§ 12-15	反饋放大器的不穩定性	370
§ 12-16	弦式振盪器	373
第十三章 運算放大器的線型類比系統		378~415
§ 13-1	基本的運算放大器	378
§ 13-2	差額放大器	381
§ 13-3	射極耦合的差額放大器	383
§ 13-4	差額放大器的轉換特性	386
§ 13-5	積體式運算放大器的一例	388
§ 13-6	校零誤差電壓與電流	389
§ 13-7	基本的運算放大器之應用	391
§ 13-8	直流差額放大器	396
§ 13-9	穩定的交流耦合的放大器	397
§ 13-10	類比式的積分與微分	399
§ 13-11	類比式的電子計算	401

§ 13-12	有功的濾波器	403
§ 13-13	積體式調諧放大器	409
§ 13-14	串疊的視頻放大器	413
第十四章	運算放大器的非線型類比系統	416~444
§ 14-1	比較器	416
§ 14-2	取樣與持續電路	419
§ 14-3	精確的交流／直流變換器	420
§ 14-4	波形發生器	423
§ 14-5	再生式比較器（ <u>許密特</u> 觸發器）	428
§ 14-6	射極耦合的邏輯	431
§ 14-7	數位至類比的變換器	437
§ 14-8	類比至數位的變換器	441
附錄A	常用物理常數的概值	445
附錄B	變換因數及字首	446
附錄C	網絡理論撮要	447~477
§ C-1	電阻式網絡	447
§ C-2	網絡理論	456
§ C-3	弦式穩態	461
§ C-4	簡化了的弦式網絡分析	467
§ C-5	一個RC電路的步級響應	474
附錄D	習題	478~561
第一章		478
第二章		481
第三章		485

第四章.....	494
第五章.....	500
第六章.....	503
第七章.....	512
第八章.....	516
第九章.....	520
第十章.....	523
第十一章.....	533
第十二章.....	541
第十三章.....	549
第十四章.....	557
習題解答	563~571
英漢索引	573~591

第一章

半導體

本章中將討論那些被用來區分金屬、半導體、以及絕緣體的各项性質。金屬中的電流是由於負電荷〔即電子 (electrons)〕的流動而形成的，但是半導體中的電流則是正電荷〔即電洞 (holes)〕及電子二者的運動之結果。我們也可以將雜質原子摻和到半導體內以便使其中的電流主要是由於電子或電洞（二者之一）所引起的。另外再要談到晶體內的電荷受到外界電場影響時的遷徙現象〔亦稱為漂流 (drift current)〕，以及在濃度不均時由這種差額所產生的結果〔被稱為擴散電流 (diffusion current)〕。

§1-1 帶電粒子

電子上所帶負電量已知為 1.60×10^{-19} 庫侖，電子的質量是 9.11×10^{-31} 仟克。許多重要的物理常數之值可見附錄 A，附錄 B 中所列為一些變換因數以及字首 (prefix)。這裡可以舉例說明一下常會用到的電流值範圍內所涉及的電子數，以助讀者得到一些概念。譬如說，一個電子上的電荷量既然為 1.60×10^{-19} 庫侖，那麼 1 庫侖的電量內的電子數就應當是此數的倒數了，大約也就是 6×10^{18} 個電子/庫侖。再說，1 安培的電流既然是 1 庫侖/秒，那麼 1 微微安 (1pA，即是 10^{-12} 安培) 的電流就代表着每秒內 6 百萬個電子的運動，涉及的電子數雖然這麼多，但這項電流本身却仍然小到難以測得的程度！

一個正離子上的電量必然是電子上電量的整倍數，不過符號相反就是了。就單離子化的 (singly ionized) 粒子而言，它的電荷就等於電子上的。雙離子化的粒子上的電量則為電子上的二倍。

在半導體晶體內（例如矽）每一對相鄰的離子共享二個電子。這

種結構被稱為共價鍵 (covalent bond)。在某種情況下，該結構可能會少掉一個電子，因而在鍵上留下一個“洞”(hole)，我們稱它為“電洞”。共價鍵上的這種電洞還會自一個離子移到另一個離子去，這就相當於正電荷的移動，因而形成電流。電洞所帶電荷的大小與自由電子的一樣。這裡十分簡略地描述了電洞作為有效載子的觀念，到第1-5節，將再詳述。

§1-2 電場強度，電位，及能量

依定義，一個單位正電荷在電場內所受的力 $\mathbf{f}$ (牛頓) 即是電場在該處的強度 $\mathcal{E}$ 。牛頓第二定律指出：一個電荷為 q (庫侖)，質量為 m (仟克) 的粒子在電場 $\mathcal{E}$ (伏特/米) 內以 $\mathbf{v}$ (米/秒) 速度運行時所受的力 $\mathbf{f}$ 為

$$\mathbf{f} = q\mathcal{E} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-1)$$

在下面各項討論中我們認為有理化的公制 (米-仟克-秒) 最實用。本書內除特別申明的地方以外，將一律採用這單位系統。

電 位 依定義，一點 B 對另外一點 A 的電位 V (伏特) 是將一個單位正電荷自 A 移至 B 時反電場所作之功。這定義對於三度空間的電場也成立。就一度空間的問題而言，假設 A 在 x_0 處， B 在任一距離 x 處，則*

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

其中的 $\mathcal{E}$ 現在代表電場在 x 方向的分量。將 (1-2) 式微分可以得出

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

式中負號表示電場是由高電位處指向低電位處的。在三維的情形下電

*這符號表示“依定義等於”