

Jacob Millman

微電子學

MICRO- ELECTRONICS

下

Digital and Analog Circuits and Systems 蘇炎坤 編譯

復文書局

微 電 子 學

MICROELECTRONICS

Digital and Analog
Circuits and Systems

蘇炎坤 編譯

友 誼 出 版 局

微電子學(下)

著作權執照台內著字第 號

版權所有



翻印必究

(1984)七十二年六月修訂再版

(1985)七十四年二月修訂三版

上册 132 元

下册 135 元

著 作 者: **Jacob Millman**

編 譯 者: **蘇 炎 坤**

發 行 者: **吳 主 和**

發 行 所: **復 文 書 局**

地址:臺南市東門路421巷28號

門市:台南市林森路二段63號

電話:(06)2370003·2386937

郵政劃撥帳戶 0032104 - 6 號

No.28, LANE421 DONG-MEN
ROAD TAINAN TAIWAN REPUBLIC
OF CHINA

TEL: (06)2370003·2386937

本書局經行政院新聞局核准登記發給
出版事業登記證局版台業字第0370號

序

本書主要係供電機工程的學生作為現代電子學的教本。但其所包含內容的深度和廣度對主修物理者、從事實際工作的工程師及欲獲得微電子(IC)方面速變知識之資料的科學家們來說亦足資參考。

其中分成三個部分，使教師依自己的興趣意旨決定各種不同的授課程序。第一部分(1~4 章) 討論半導體元件的特性以適應初學者的需要，而瞭解這部分的先決條件只要大學一或二年級所學的數學、物理就已足夠了。其中並概略的敘述半導體的性質，還有 $p-n$ 二極體、雙極體接面電晶體(BJT) 以單石體積的形式之製造方法，及其特性的討論。因為各別的元件在當今電子生產設計上所扮演的角色並非極其重要，所以在本書的開始(第四章) 便向讀者介紹積體電路(IC) 的薄片(chip)。

第二部分(五至九章) 探討數位線路及數位系統。之所以在類比資料(analog material) 前先介紹數位資料是由於下列重要因素：

1. 簡易的布林代數數位技巧對學生來說可輕易地學會。這些裝置不為開(ON) 即為(OFF) ，就已導至很簡單的操作。唯一猶須說明的特性只有開關速度和一個閘(gate) 上的負載量。另一方面，類比的考慮(Analog consideration) 却很難瞭解，因為涉及頻域與時域的觀念頻率補償還有更細微更複雜的線路分析，許多小信號裝置參數亦須顧及。此外這部份並不需要電機工程上的先修科目，因為數位網絡所需的簡易線路分析在附錄C，網路理論摘要裏已加以說明。因此，關於數位電子的課程，適用於大二的學生。
2. 大多數的學生已經學過數位計算機計劃的寫作，(有些人甚至高中就學過)，所以很想從電子學的研習中瞭解數位硬體操作的情

形。

3. 在許多大學（哥倫比亞便是其中的一所）的電機工程裏，計算機科學所開電子學的課祇有一個學期，很顯然地，其範圍必集中於數位電子學，如此便可採用第一跟第二部分當作教本。這九章所包含的內容較一學期所能涵蓋的要多一些，不過教師可以自由刪去自己認為較不重要，效益較差的段落。
4. 大多數電子學課程均包括實驗，但設計和實施數位方面遠較類比方面的實驗簡單得多，像這樣的實驗課可與數位的課程同時並進，而這些設備對類比實驗並不很恰當，因為需以網絡理論為先修科。
5. 大多數新的電子系統在本質上，數位方面佔極大優勢。這部分並介紹小型積體（SSI）邏輯閘（AND、OR、NOT、NAND …）。這些閘形成各種標準族群（DTL、TTL、ECL …），而後組成連結系統，即中型積體電路（MSI）邏輯像二進位加法器，數位比較器、同位核對器，解碼器／解複器、資訊選擇器／複合器、編碼器和僅讀記憶器（ROM）。例如序向數位系統——我們考慮正反器（Flip-Flop）（S-R，J-K，T及D形），將它們當成移位置數器及計數器的構成單位。

至此我們已概略瞭解雙極電晶體及其在數位系統方面的應用，以下將介紹一種新的半導體裝置——場效電晶體，用於邏輯閘。最後在第九章將研討具有MOSFETs及BJTs的大型積體電路（LSI）系統。這些都是主要的記憶器，包含有動態的MOS移位置數器，MOS ROM，可抹除規劃程式之僅讀記憶（EPROMs），方程式計劃之邏輯排列（PLAs），隨機出入記憶器（RAMs），電荷耦合元件（CCDs），微處理及微計算機與積體入射邏輯（I²L）。

第三部分（第十章到十八章）則集中於類比線路及系統，給予BJT或FET個別加偏壓的方法及操作點穩定性之探討。對於每一個裝置取其小信號模型用以計算低頻單級及串接級放大器之工作。

反饋觀念的介紹，四種標準反饋放大器結構及其特性同時被顯示

及描述。高頻電晶體模型用以獲得放大器（只有反饋或不只有）之頻率感應。

基本線性（類比）構造單位是可操縱性的放大器（OP AMP）。其性質與應用在最後四章加以描述，將OP AMP整體的類比設計技術詳細的提出，包括頻率補償以確保穩定性的方法，而OP AMPs的廣泛使用有儀器放大器、類比計算機，主動濾波器、精密AC/DC轉換器，抽樣並保持電路器，類比複合器與解複器，對數放大器，D/A及A/D轉換器，比較器、波形產生器，電壓時間基線產生器，正弦振盪器，功率放大器、單石電壓調整器等。

依一個兩學期的電子學次序，第二學期的課程需以第三部分為基礎。對一個課程來說，這些資料太廣濶，教師可依其所欲加強的來決定取捨。

許多科目只需要一個核心的電子學課程，因而本書提供各種選擇性的範圍。對於總共三學期的課亦有足夠的資料。

假使教師想在首次電子學課中，於數位資料之前考慮類比資料，可採用第一部分及第三部分的某些段落，還有第二個部分8～1到8～6，關於場效電晶體的部分。

由以上的討論，顯然地本書的各個標題是以提供一個或更多個學期課程之結構的廣大範圍來配合教師所欲之內容的方法寫成的。

自從1959年平面電晶體被使用後，在每一小片上成分的數目每年均倍增，以這種在一個IC薄片上成分密度不斷增加的情況，一個電子電路與一個系統的差別變得更加模糊不清。事實上一個整體的包裝像OP AMP經常被視為僅是一個「裝置」而已。在本書中並不想含糊地區別裝置、線路或系統。儘管很自然地一單一的高晶體顯然是一個元件且一大型的微電子薄片稱得上是「系統」至少是「分系統」。

現代的電子工程師設計一種新的產物（像儀器、控制，計算機，通訊系統等）藉著連接標準的微電子薄片以至整個裝配可以獲得所想要的外在目的。他們設法減小包裝的數目（因而減少成本）藉著在任何可能的地方用LSI及MSI且在任何絕對需要時僅用小型積體薄片

(SSI chips) 及各別的成分(例如很大的電容、電阻、電感、變壓器、轉換器等)。因此工程師們必須知道在商業上可用的 IC 薄片及其功用與限度。

鑒於上述的事實，本書的目標乃在使讀者逐步地從半導體性質的定性知識到對於裝置(尤其 $p-n$ 二極體，BJT，MOSFET，CCD 及 I^2L 閘)操作之理解，最後知道如何整體地將它們連接起來以形成各種不同而有用輸入輸出性質的微電子薄片。在本書中所探討的 IC 薄片之種類極其寬廣；不僅描述在矽裏製造些甚麼，而且對於這些薄片所能執行的數位或類比的功用有深入的瞭解。在每個線路或系統討論之後都有一特殊商業上可用的包裝——其能給予所要的操作(如數位複合、類比，數位對類比轉換等)做為參考，說明實際而非理想裝置所受到的限制(由於電壓、溫度、功率、負荷等)。為了知道這些不理想的特性，製造廠家將供應個別裝置及 IC 薄片的說明書(附錄B)。在學生進入電子公司之後，於研討的深度，標題的廣泛選擇，及實際上所強調的都需有所決擇，才能做些有用的工程工作。

本書經徹底的改編，重寫及在 Millman and Halkias "Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and System" (McGraw-Hill Book Company, New York, 1972) 一書中資料的補充，又增加了許多新的標題，包括不僅限於下列所舉的：邏輯閘的三態輸出級，較高次的解複器及複合器，優先編碼器，ROM 的維位址，ROMs 之字及位址的擴展，廣泛的移位置數器，MOSFETs 技術上的改良，具有非飽和或消耗性負載反相器，CMOS 傳輸閘，可抹除之規劃程式 ROM，方程式計劃之邏輯排列(PLA)，隨機出入之 RAM 電池，電荷耦合元件(CCD)，微處理機，積體入射邏輯(I^2L)，類比設計技術(電源及自動轉換裝置，活性負載，水平移位及 OP AMP 的輸出級)，抽樣及保持系統，類比複合器及解複器，幾個 AC/DC 轉換系統，電壓控制振盪器，電壓基線產生器，方塊波之調變，功率放大器(包括熱考慮)，開關-調整功率供應和功率 FETs (VMOS)。在此也提到 1978 年早期微電

子技術的狀況及一些將來可能的發展。

爲了增加些新的資料，某些積體電子學的標題被限制或完全刪除。例如半導體物理性質的討論全部刪去，各別裝置的偏壓不再被強調，半導體的光電效應亦被削去，四參數低頻混合型式僅概略的提及，放大器雜音，可調放大器，CRT 記號產生器等等的討論亦予省略。

在此序後的前言裏敘述電子學和電子工業的簡史。在開始研讀前希望指導者與學生們皆能先一覽這引人入勝的歷史。

本書在直覺教育，裝置-線路-系統行爲的解說，符號一致系統的使用，圖形畫法的注意，範例的詳答，每章後面的習題上皆費了一番心思。這些習題可作爲家庭作業，因爲它們可提供學生測驗自己對所讀過的段落是否瞭解的機會。作者已成功地用這些習題大約30%的簡易測驗，其餘70%是屬於數量方面的。

總共有717個習題，將測驗學生對書中所提一些基本觀念的瞭解且給予電子線路跟系統設計分析上一些經驗。幾乎在所有數字問題其實際參數值說明均已擇定，僅有一小部分的作業練習還保持“Integrated Electronics”裏的原狀。大多數的問題是新的，或以前所用而經修飾過的。在附錄E中選有部分問題的答案。

採用本書的教師可用解答手冊，請寄：College Division, McGraw-Hill Book Company, 1221 Avenue of the America, New York, NY 10020。Attention: Electrical Engineering Editor, 27th floor。書中還有124個相關圖形作爲教學上的輔助，在講授該主題時這些圖形可加以使用。

出版者曾寄出一分調查表給採用“Integrated Electronics”的許多教授，要求其在這本書中所認爲該削減，增加，修正等的地方，在現在的教本中對這分調查表均給予答覆。尤其感謝J.E. Steelman的許多助益性的建議。在此特別聲明，13-3中所用的研討是他寄給我的註解。很慶幸有小犬Dr. J.T. Millman在技術的磋商及幫助，他還負責第十八章的修正。同時感激D.A. Hodges教授的詳密審察及對第九章建設性的批評，而對負責預備“解答手冊”的Dr. T.V.

Pathomas 及 Mrs. B. Lim 的原稿及問題解答之精巧打字亦致謝忱。

Jacob Millman

目 錄

第三部份 類比電路及系統

第十章	類比二極體電路	1
10 - 1	簡單之應用	1
10 - 2	截波 (限制) 電路	3
10 - 3	於獨立準位之截波	8
10 - 4	崩潰二極體電壓調整器	12
10 - 5	整流器	15
10 - 6	其他全波電路	21
10 - 7	電容濾波器	23
10 - 8	其他二極體電路	28
	參考資料	30
	複習題	31
	習題	32
第十一章	低頻放大器	44
11 - 1	雙極性電晶體之操作點	45
11 - 2	偏壓穩定度	48
11 - 3	自偏壓或射極偏壓	49
11 - 4	對 I_{CO} , V_{BE} 及 β 變化之穩定性	52
11 - 5	對於正弦輸入之輸出波形	62
11 - 6	BJT 之小訊號近似模型	65

11 - 7	電晶體之互導.....	66
11 - 8	電晶體電路之線性分析.....	68
11 - 9	共射極放大器.....	69
11 - 10	射極追蹤器.....	73
11 - 11	共射極放大器.....	76
11 - 12	雙極性電晶體放大器組態之比較.....	77
11 - 13	具有射極電阻器之共射極放大器.....	78
11 - 14	串接之電晶體放大器.....	80
11 - 15	雙極性電晶體之精確小訊號模型.....	86
11 - 16	高輸入電阻之雙極性電晶體電路.....	92
11 - 17	場效電晶體之偏壓.....	98
11 - 18	JFET 或 MOSFET 之小訊號模型.....	102
11 - 19	低頻時共源極與共吸極放大器.....	105
11 - 20	場效電晶體作為電壓控制電阻器.....	108
	參考資料.....	110
	複習題.....	111
	習題.....	113
第十二章	反饋放大器特性.....	133
12 - 1	放大器之分類.....	133
12 - 2	反饋觀念.....	136
12 - 3	具有反饋之轉移增益.....	139
12 - 4	負反饋放大器之一般特性.....	143
12 - 5	輸入電阻.....	147
12 - 6	輸出電阻.....	151
12 - 7	反饋放大器之分析方法.....	155
12 - 8	電壓串聯式反饋.....	157
12 - 9	電壓串聯式反饋對.....	161
12 - 10	電流串聯式反饋.....	165

12-11	電流並聯式反饋	170
12-12	電壓並聯式反饋	176
	參考資料	180
	複習題	182
	習題	183
第十三章 放大器之級狀響應		198
13-1	頻率失真	198
13-2	放大器之級狀響應	203
13-3	耦合電容及射極旁路電容器對低頻響應之影響	207
13-4	RC 耦合放大器	211
13-5	高頻時之拼合 π 電晶體模型	212
13-6	拼合 π 參數之變動	215
13-7	共射極短路電流增益	216
13-8	一般化之電壓增益函數	220
13-9	單級共射極電晶體放大器之響應	222
13-10	增益與頻帶寬度之乘積	228
13-11	高頻時之射極追蹤器	230
13-12	兩串接共射極電晶體級之高頻響應	233
13-13	高頻時之複級共射極放大器之串接	238
13-14	高頻時共源極放大器	239
13-15	高頻時共汲極放大器	244
13-16	串接級之通帶	246
	參考資料	249
	複習題	250
	習題	253
第十四章 反饋放大器之頻率響應		267
14-1	反饋對放大器頻帶寬度之影響	267

14 - 2	具有反饋之雙極點轉移函數	272
14 - 3	具有反饋之三極點轉移函數	280
14 - 4	多極點反饋放大器之近似分析	282
14 - 5	電壓並聯式反饋放大器之頻率響應	284
14 - 6	電流串聯式反饋放大器之頻率響應	288
14 - 7	電流並聯式反饋對之頻率響應	292
14 - 8	電壓串聯式反饋對之頻率響應	297
14 - 9	穩定度	300
14 - 10	波德圖表	303
	參考資料	309
	複習題	310
	習題	311

第十五章 運算放大器之特性 318

15 - 1	基本運算放大器	318
15 - 2	訊差放大器	323
15 - 3	射極耦合訊差放大器	326
15 - 4	訊差放大器之轉移特性曲線	331
15 - 5	運算放大器之設計技術	333
15 - 6	類比設計技術 (繼續)	340
15 - 7	間離誤差電壓與電流	347
15 - 8	運算放大器參數之量度	353
15 - 9	運算放大器之頻率響應	359
15 - 10	補償	363
15 - 11	主極點補償	363
15 - 12	極點 - 零點補償	365
15 - 13	領先補償	372
	參考資料	373
	複習題	374

習題.....	378
---------	-----

第十六章 運算放大器系統..... 393

16 - 1	基本運算放大器之應用.....	393
16 - 2	訊差（儀表）放大器.....	399
16 - 3	交流耦合放大器.....	402
16 - 4	類比積分與微分.....	404
16 - 5	電子之類比計算.....	408
16 - 6	主動濾波器.....	410
16 - 7	主動共振帶通濾波器.....	416
16 - 8	精密之交流 / 直流變換器.....	423
16 - 9	抽樣並保持電路器.....	428
16 - 10	類比複合器與解複器.....	431
16 - 11	對數及指數放大器.....	433
16 - 12	數位變類比（D/A）轉換器.....	440
16 - 13	類比變數位轉換器.....	445
	參考資料.....	452
	複習題.....	455
	習題.....	457

第十七章 波形產生器..... 475

17 - 1	比較器.....	475
17 - 2	比較器之應用.....	477
17 - 3	再生比較器（史密特觸發器）.....	480
17 - 4	方塊波及三角波產生器.....	484
17 - 5	脈波產生器.....	493
17 - 6	電壓時基產生器.....	496
17 - 7	級狀（階梯）產生器.....	502
17 - 8	方塊波之調變.....	505

17 - 9	正弦振盪器	511
17 - 10	相位移振盪器	513
17 - 11	振盪器組態之一般形式	516
17 - 12	韋恩橋接振盪器	519
17 - 13	晶體振盪器	522
	參考資料	524
	複習題	525
	習題	527
第十八章 功率電路與系統		540
18 - 1	大訊號放大器	540
18 - 2	諧波失真	542
18 - 3	放大器之分類	546
18 - 4	A類放大器之效率	547
18 - 5	B類推挽式放大器	549
18 - 6	AB類操作	553
18 - 7	積體電路功率放大器	555
18 - 8	熱考慮	557
18 - 9	調整之電源	560
18 - 10	單石調整器	562
18 - 11	開關式調整器	565
18 - 12	額外之開關調整器拓撲圖	570
18 - 13	功率場效電晶體 (VMOS)	576
	參考資料	579
	複習題	580
	習題	581
附錄 A 常數與轉換因數		588
附錄 B 半導體製造廠商與元件之規格表		590

附錄 C	網路理論撮要.....	605
附錄 E	習題解答.....	640

第十章 類比二極體電路

截至目前，本書所強調的數位電路及系統，其電壓均予以理想化，祇具有兩個值： $V(0)$ 及 $V(1)$ 。本章開始將探討類比電路及系統。一個類比波形係表示其電壓或電流隨時間作連續性的變化，在特定的最大幅度值與最小幅度值之間呈現所有的數值。

由圖 2 - 16 所示之片段線性二極體模型 (the piecewise linear diode model) 可知，當此種元件導電時，它近似於一電池 V_f 及一很小值的順向電阻 R_f 相串聯，而當此元件為 OFF 狀態時，二極體的作用即如同一個很大的反向電阻 R_r 。這一種二極體電路的模型及分析方法，我們已經在 2 - 12 節中加以概略性地敘述，在本章中我們將應用來作下列的應用：簡單整流器 (rectifier)、單端及雙端截波器 (single-ended and double-ended clippers)、電壓調整器 (voltage regulators)、半波與全波整流器以及電容濾波器。

10-1 簡單之應用 (A Simple Application)

試考慮一個包括二極體 D 、負載電阻 R_L 以及正弦波輸入電壓 $v_i = V_m \sin \alpha$ 的串聯電路，其中 $\alpha = \omega t$ ，而 $\omega = 2\pi f$ ， f 係輸入激勵訊號的頻率。假設圖 2 - 16 所示之片段線性模型 ($R_r = \infty$) 為正確的，則順向電流 ($v_i > V_f$) 可以由圖 10 - 1 (a) 所示的等效電路求得。當 $v_i = V_m \sin \alpha \geq V_f$ 時，