

微電子學(1)

(附習題解答)

薛福隆 編譯

JACOB MILLMAN

**MICRO-
ELECTRONICS**

Digital and Analog Circuits and Systems



全華科技圖書公司印行

微電子學(1)

(附習題解答)

薛福隆 編譯

JACOB MILLMAN

MICRO- ELECTRONICS

Digital and Analog Circuits and Systems



全華科技圖書公司印行

272479



全華圖書 版權所有 翻印必究
局版台業字第0223號 法律顧問：陳培豪律師

微電子學(1)

薛福隆 編譯

出版者 全華科技圖書公司
北市建國北路85巷9號
電話：501-1300-564-1819
郵撥帳號：100836

發行者 蕭 而 廊
印刷者 慶福彩色印刷廠
東南亞 港 明 書 店
總經銷 香港九龍彌敦道500號2樓

電話：3-302846-3-309095

定價 新臺幣 120 元
海外定價 港 幣 24 元
再 版 中華民國69年4月

原 序

本書主要是當作電機工程學生的近代電子學教科書。本書的範圍與深度適合理論研究者、從事工程者、以及科學家，使其能夠更新微電子學這方面日新月異之知識。

本書分為三部份，因此可使用在不同課程上，配合教授之目的與興趣。第一部（第1～4章）討論半導體元件特性，是專為從未接觸電子學之學生而編的。此四章概略說明半導體之特性，說明如何以單晶的積體型式製作一個 $p-n$ 二極體以及一個極性接面電晶體（BJT），並討論其特性曲線。因為分立元件在今日電子產品的設計上不再重要，因此在本書前面就開始介紹積體電路給讀者（第4章）。

第二部（第5章至第9章）探討數位電路與系統，在類比電路之前介紹數位電路有數項重要原因：

1. 數位電路只牽涉到簡單的布耳代數，學生很容易了解。這些元件不是 ON 就是 OFF，操作很簡單。在基本上只需要考慮的特性只有一個開電路之交換速率與負載。而類比電路就不易捉摸，因為它牽涉到頻域與時域之觀察、頻率補償、以及詳細而複雜的電路分析。有許多小

2 微電子學 (第1冊)

訊號元件參數必須考慮在內。

2. 大部份學生均知道如何寫數位計算機之程式，因此對他們而言，有極強烈的動機來研究電子學，以發現數位電路是如何動作的。
3. 在許多大學中，對於計算機科學只要求一學期的電子學課程。很明顯的，必需着重在數位電子學上，因此第一部與第二部可當作此門課之課程。這9章包含的題材超過一學期，故教授可以自行刪減。
4. 大部份電子學課程要求有實驗，數位實驗之設計與操作比較容易。此種實驗課程在數位課程上是必需的。
5. 大部份新的電子系統基本上主要是數位的。

第二部介紹小型積體 (SSI) 邏輯閘 (AND, OR, NOT, NAND, …)，這些都是製造成不同的標準系列 (DTL, TTL, ECL, …)。然後是組合系統，為中型積體電路 (MSI)，像是一個二進位加法器，一個數位比較器，一個同位核對器，一個解碼 / 解多工器，一個數據選擇器 / 多工器，一個解碼器，以及一個只讀記憶體 (ROM)。系列數位系統之例子，我們考慮正反器 (S-R, J-K, T 與 D 型)，用這些可當作移位暫存器與計數器之構造方塊。

現在的學生已熟悉極性電晶體之使用，並已應用到數位系統上，同時並介紹場效電晶體，是一種新的半導體元件。最後，在第9章研究大型積體電路 (LSI) 系統，利用 MOSFET 與 BJT。主要是記憶體，以及包括動態 MOS 移位暫存器，MOS ROM，可清除可程式只讀記憶體 (EPROM)，可程式邏輯陣列 (PLA)，隨意出入記憶體 (RAM)，電荷耦合元件 (CCD)，微處理機，以及微電腦，積體注入邏輯 (I^2L)。

第三部份 (第10章至18章) 着重在類比電路與系統上。已知分立元件 BJT 或 FET 之偏壓方法，並討論操作點之穩定性。每一元件之小訊號模型才能得到，並用來計算低頻率單級與串接放大器之特性。

並介紹回授觀念，指出四種標準的回授放大器組態以及其特性。高頻電晶體模型用來得到放大器之頻率響應 (不論有沒有回授)。

基本的線性 (類比) 構造方塊是運算放大器 (OP AMP)，其特性

與應用在後面四章中敘述。OP AMP 單晶類比設計技術詳細地列出，包括頻率補償之方法，以得到穩定性。OP AMP 之廣泛應用包括：儀表放大器、類比計算機、活性濾波器、準確 AC / DC 轉換器，取樣與保持系統、類比多工器，以及解多工器、對數放大器、D/A 與 A/D 轉換器、比較器、波形產生器、伏特時基產生器、弦波振盪器、功率放大器、以及單晶電壓調節器。

在一晶方上的元件數目自 1959 年，平面電晶體介紹出來後每年約增加一倍，隨著這種一個 IC 晶方上元件密度逐年增加的變化，一個電子電路與一個系統之間的差別越來越不明顯。事實上，整個單晶包裝，像是一個 OP AMP，通常稱為一個“元件”。在本書裏我們不特別去分解元件、電路、或系統之間的差異；當然，一個電晶體很明顯的是一個元件，一個大型微電子晶方是一個“系統”或至少是一個“副系統”。

近代的電子工程師設計一個新產品（例如，一個儀器、一個控制、計算機，或通訊系統，等等）是將標準微電子晶方連接而成的，使得能合乎所欲的外加目標。在可能情況下利用 LSI 與 MSI 減化所用 IC 之數目（並減少成本），只有在必要時才使用 SSI 晶方以及分立元件（像是大電容器或電阻器、電感器、變壓器、換能器，等等）。很明顯地，工程師們必須知道那些 IC 在商業上可供使用，有那些功能，以及其限制。

根據上面之事實，本書之目標是一步一步地使讀者由了解半導體性質慢慢地了解此元件之操作（特別是 p-n 二極體，BJT，MOSFET，CCD， I^2L 閘），最後了解如何將這些組合成單晶型式的微電子晶方，具有特殊有用的輸入 - 輸出性能。本書研究各種的 IC 晶方，不但包括描述在矽晶中製造那些元件，同時使您了解此晶方所能操作的數位 / 類比功能。在每一電路與系統研究後，可參考特殊的商用 IC，能達到所欲之操作（例如，數位多工器、類比較器、數位 - 到 - 類比轉換，等等）。實際上實際元件的限制（由於溫度、電壓、功率、負載，等等）將加以說明。為了說明這些非理想的特性，廠商之規格列在附錄 B 上。

本書是將“積體電子學”上之資料重新組織、重寫，以及更新。有許

多新的題材加入，包括下列：一個邏輯閘之三態輸出、高階解多工器、ROM 字與位址之擴大、萬用移位暫存器、MOSFET 技術上的改良，非飽和或乏型負載之反相器、CMOS 傳輸閘、可清除可程式 ROM、可程式邏輯列（PLA）、動態 RAM 胞、電荷耦合元件（CCD）、微電腦、積體注入邏輯（I²L）、類比設計技術（電流源與重複器、有作負載、移位器、OP AMP 之輸出後）、取樣與保持系統、電壓控制振盪器、類比多工器與解多工器、數種 A/D 轉換器系統、正 - 負控制增益放大器、可觸發單穩定複振器、電壓時基產生器、方波之調變、功率放大器（包括熱量的考慮）、交換式調節的電源供應器，以及功率 FET（VMOS）。並說明在 1978 年早期之微電子學情況，以及未來可能的發展。

爲了添入新資料，在“積體電子學”中的一些主題均加以濃縮或完全省略。例如，半導體元件物理的討論大大地減少，分立元件的偏壓不再強調，半導體中的光電效應取消，四參數低頻率併合模型只是簡略地提示，放大器雜訊的討論也省略。

在前言中簡短地敘述電子學與電子工業的發展，希望教授們在開始這門課時先閱讀此篇歷史。

對於教學上的安排，元件 - 電路 - 系統原理之說明，有系統的符號表示法之使用，所繪之方塊圖，例題的詳細說明，以及各章後之複習題均作廣泛的考慮。這些複習題應當作爲家庭作業，因爲這些可提供學生來測驗自己是否完全了解各節的內容。作者很成功地利用這些問題在測驗或是考試上。

所包括的 717 題家庭作業問題，將測驗學生是否能抓住書中之基本觀念，同時讓他們練習電子電路與系統的分析與設計。在大部份的數字問題中實際參數值與規格均經過選擇。只有少部份是取自“積體電子學”中之習題。大部份問題均爲新的，或是將以前的題目修改。附錄 E 並附有部份題目之解答。

本書並已有習題解答供應，可寫信至 College Division, Mc Graw-Hill Book Company, 1221 Avenue of the Americas, New York

。Attention: Electrical Engineering Editor, 27th floor。

出版商曾送出問卷給許多採用“積體電子學”的教授，詢問有關本書中那些部份應刪去、增添與修正。現在本書內容係反映這些問卷之結果。我特別感謝 Professor J.E. Steelman，提供許多寶貴的建議。也很欣慰地，我感謝吾兒 Dr. J.T. Millman 在技術上的提供意見與協助。我也感謝 Professor D.A. Hodges 詳細的校閱以及建設性的批評，更感謝 Dr. T. V. Papathomas 負責“題解”的準備，以及 Mrs. B. Lin 純熟的打字。

Jacob Millman

圖書之可貴 在其量也在其質

量指圖書內容充實、質指資料新穎够水準，我們就是本著這個原則，竭心盡力地為國家科學中文化努力，貢獻給您這一本全是精華的全華圖書。

目 錄

第一部份：半導體元件特性

第一章 半導體	3 ~ 30
1 - 1 帶電質點	3
1 - 2 電場強度，電位，能量	4
1 - 3 能量的單位電子伏特	7
1 - 4 移動率及傳導係數	8
1 - 5 本質半導體內的電子與電洞	13
1 - 6 施體與受體雜質	15
1 - 7 半導體內的電荷密度	17
1 - 8 矽和鍺的電的性質	18
1 - 9 霍爾效應	21
1 - 10 熱阻器與敏阻器	23
1 - 11 擴 散	24

1 - 12	在有階的半導體中電位的變化	26
1 - 13	摘 要	28
	複習題	29
第二章	接面二極體	31 ~ 66
2 - 1	斷路的 p - n 接面	31
2 - 2	p - n 接面作為一個整流器	34
2 - 3	伏特 - 安培特性	38
2 - 4	V/I 特性和溫度的關係	42
2 - 5	二極體電阻	42
2 - 6	空間電荷或過渡區之電容 C_T	44
2 - 7	二極體中少數載體之貯存	49
2 - 8	擴散電容	52
2 - 9	崩潰二極體	53
2 - 10	二極體作為一個電路元件	56
2 - 11	負載線的觀念	58
2 - 12	片斷式線性二極體模型	58
2 - 13	接面二極體的轉接時間	61
	複習題	64
第三章	電晶體特性	67 ~ 106
3 - 1	接面電晶體	67
3 - 2	電晶體各電流分量	70
3 - 3	電晶體作為一個放大器	73
3 - 4	電晶體的構造	74
3 - 5	共基極阻態	76
3 - 6	共射極阻態	80
3 - 7	共射極的截止系統	85

3 - 8	共射極飽和區.....	87
3 - 9	典型的電晶體接面電壓值.....	90
3 - 10	共射極電流增益.....	95
3 - 11	相反型的操作.....	96
3 - 12	電晶體額定值.....	97
3 - 13	其他的電晶體特性.....	100
3 - 14	電晶體交換時間.....	100
	複習題.....	103

第四章 積體電路：製作和特性..... 107 ~ 142

4 - 1	積體電路（微電子）技術.....	107
4 - 2	基本的單晶積體電路.....	109
4 - 3	晶膜生長.....	115
4 - 4	罩幕與蝕刻.....	115
4 - 5	雜質擴散.....	117
4 - 6	單晶電路的電晶體.....	118
4 - 7	單晶之極體.....	123
4 - 8	金屬與半導體的接觸.....	126
4 - 9	積體電阻器.....	128
4 - 10	積體電容器.....	132
4 - 11	積體元件之特性.....	133
4 - 12	單晶電路之佈局圖.....	134
4 - 13	其他隔離方法.....	137
	複習題.....	139

第二部份：數位電路與系統

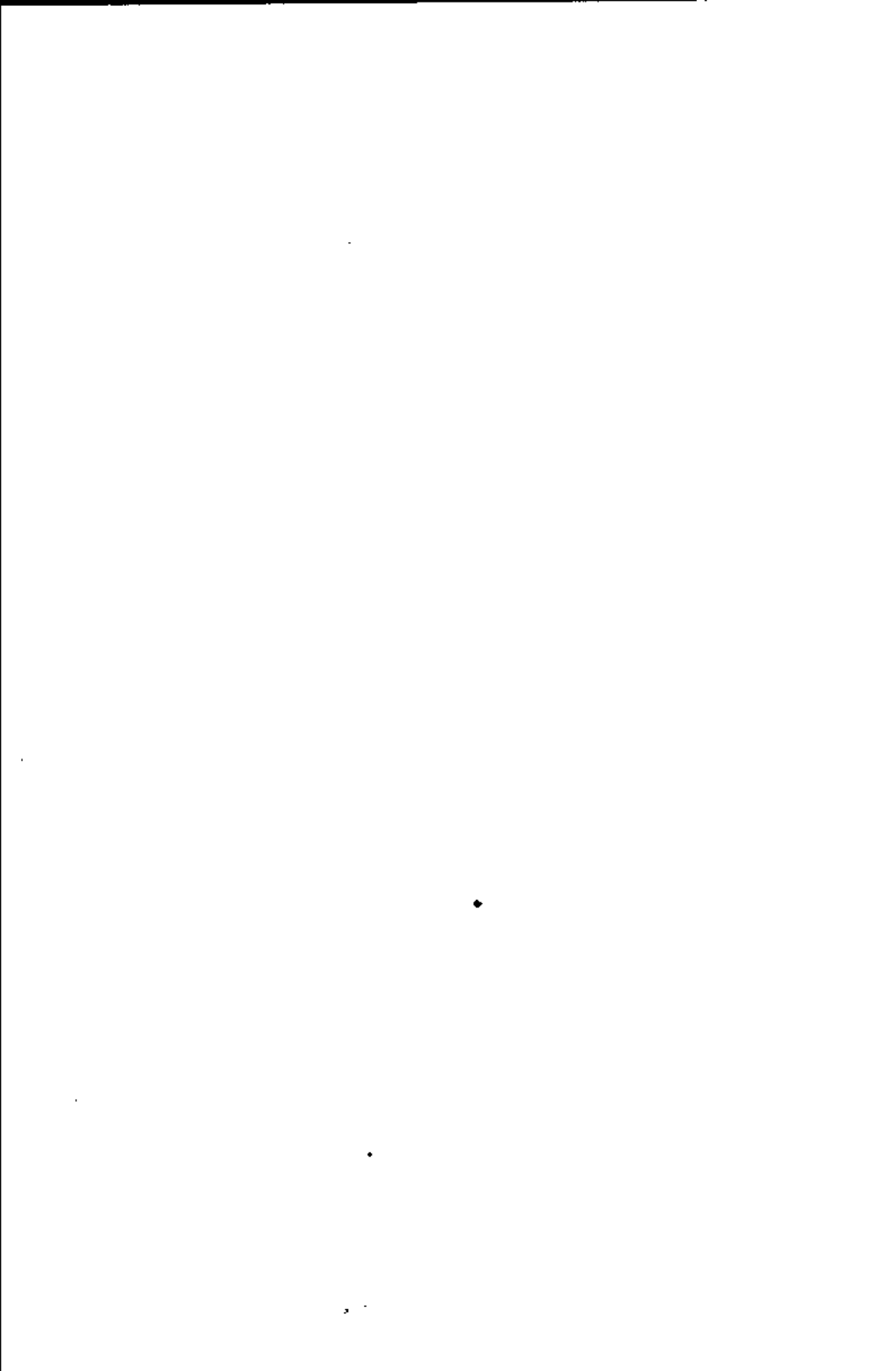
第五章	數位電路.....	145 ~ 196
-----	-----------	-----------

5 - 1	系統的數位(二進)運算	145
5 - 2	或 閘	148
5 - 3	及 閘	151
5 - 4	非閘(反相)電路	154
5 - 5	禁止(效能)運算	157
5 - 6	除或閘電路	158
5 - 7	棧莫根定律	160
5 - 8	二極體電晶體邏輯	162
5 - 9	修改的(積體電路)二極電晶體邏輯閘	166
5 - 10	高臨界邏輯(HTL)	172
5 - 11	電晶 - 電晶邏輯閘(TTL)	172
5 - 12	輸出級	176
5 - 13	電阻器 - 電晶體邏輯(RTL)與直接耦合電晶體 邏輯(DCTL)	181
5 - 14	射極耦合邏輯(ECL)	184
5 - 15	邏輯系列的比較	191
	複習題	194
1 ~ 5	習 題	197
1 ~ 5	習題解答	243
附錄A 常數與轉換因數		
附錄B 半導體製造商與元件規格		
附錄C 網路理論簡介		

第一部份

半導體元件特性

**MICRO-
ELECTRONICS**



第一章

半 導 體

本章討論絕緣體半導體與金屬之物理特性，以便能加以區分。金屬中的電流是由於負電荷（電子）的流動，半導體中的電流則是由於電子和正電荷（電洞）的運動。半導體可以摻以雜質原子，使得它的電流主要是由電子或由電洞所引起。本章將討論在電場的影響下（漂移電流）以及由於不均勻的濃度梯度（擴散電流）所引起的晶體內電荷的遷徙。

1-1 帶電質點

電子的電量，和質量已經分別發現為 1.60×10^{-19} 庫侖和 9.11×10^{-31} 仟克。許多重要的物理常數已列在附錄 A - 1 中，而一些轉換因數及字首則排在附錄 A - 2 內。電流大小表示為每秒內的電子數，我們很快地就可以得到一些概念。譬如說，每一個電子的電荷是 1.60×10^{-19} 庫侖，每庫侖內的電子數就是這數目的倒數，大約是 6×10^{18} 。由於 1 安培 (ampere) 的電流就是 1 庫侖 / 秒，於是 1 微微安 (1 picoampere，或

4 微電子學 (1)

者 10^{-12} 安培) 的電流差不多就代表了每秒內有 6 百萬個電子在流動。然而 1 微微安的電流是如此之小以致於想到測量它都會遇到相當大的困難。

，偏正離子的電荷是電子電荷的整數倍，它的符號是相反的。就單離子化的質點而言，它的電荷就等於電子之電荷。對於雙離子化的質點而言，離子的電荷是電子的兩倍。

一個電子的質量是以一個數目來表示的，它是將氧的原子量選作 16 作為標準。根據這個定義，原子量為 1 的原子的質量就是單原子氧質量的十六分之一，而這質量已被算出為 1.66×10^{-27} 仟克。因此，以仟克來計算任何一個原子的質量時，就必須將這原子的原子量乘以 1.66×10^{-27} 仟克。

在半導體結晶中，例如在矽中，二個電子為每對相鄰的離子所共有。這種組態稱為共價鍵 (Covalent bond)。在某些情形下，一個電子可以從這結構上失去，而在鍵上留下一個“電洞”。共價鍵內的這種缺額能在晶體內由一個離子移動到另一個離子，因而構成電流，它和自由的正電荷運動時所構成的電流是一樣的。對於電洞作為電荷的有效載體這個觀念的簡單介紹，在第 1-5 節內將有詳細的說明。

1-2 電場強度，電位，能量

依定義，在電場內作用在單位正電荷上的力 f (牛頓) 就是這點的電場強度 ϵ 。牛頓的第二定律決定一個電荷 q (庫侖)、質量 m (仟克) 的質點在電場 ϵ (伏特 / 米) 內以速度 V (米 / 秒) 移動時的運動現象，

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

對於以後的各項討論，我們發覺有理化的公制 (米—仟克—秒) 單位系統用起來最方便。除了特別聲明外，這一單位系統將是本書內一貫採用的系統。

電 位