

微電子學

數位／類比 電路／系統

林靜 校訂
崔承慰

何親賢 譯著
J. Millman 原著

中央圖書出版社出版

微電子學

數位／類比 電路／系統

林 靜
崔承慰 校訂

何 親 賢 譯著
J. Millman 原著

中央圖書出版社出版

行政院新聞局出版事業登記證，
局版台業字第○九二○號

學子電微
(MICROELECTRONICS)

究必印翻 有所權版

整元佰叁幣台新價實

原著者：Jacob Millman

譯著者：何親賢

出版者：中央圖書出版社

台北市重慶南路一段一四一號

發行人：林在 高

發行所：中央圖書供應社

台北市重慶南路一段一四一號

電話：三三一五七二六
三七一八九三

郵政劃撥帳戶：九一四號

印刷所：利康印刷有限公司

三重市民生東街廿六之一號

中華民國六十九年四月初版
中華民國七十二年三月再版

編號：2613

原 序

本書係針對電機工程學系學生所需而編寫的最新電子學教科書。所含範圍既深且廣，因此本書對專修物理及實習工程師，甚至科學家們希望增進變化神速的微電子學（積體電路）方面所具之新知識均富有極高的價值。

本書共分三大部份，這樣可隨教師之用途及意願而取用他所需的教材。第一部（1-4章）研討有關半導體元件特性，同時也可使初學者對電子學作一初步之引導。尤其是第一，二學年教物理及數學課程者應預作瞭解。這四章扼要地講述半導體特性，說明 $p-n$ 二極體之構造與以單石積體的方式形成雙極接面電晶體（BJT）的情形，並探討其特性。目前新型的電子產品個別元件已不再扮演那麼重要的角色，因此本書提前在第四章為讀者介紹積體電路（IC）。

第二部（第5至9章）專講數位電路及系統。在介紹類比材料之前首先講述數位材料是有若干重要理由的：

1. 數位技術僅採用單純的布耳代數，學者容易學。該元件等均非開即關。以致操作簡單。主要需在交換速度及開上加載之特性方面詳作說明。反過來說，要想對類比研討等有所領悟都很困難，因為它們包含着頻率 - 與時域的概念，頻率補償，以及更為詳盡而複雜的電路分析。許多小信號元件參數也一定要深入考慮。因為在附錄C中對數位網路所需的網路理論已作過簡單的電路分析，所以學第二部不需先有電工學方面的知識。在課程中編入數位電子學對大二學生來說可能會有相當的價值。
2. 可能有許多學者已經學會如何規劃數位計算機程序（有些是從高中所學得）。因此盡量鼓勵他們鑽研電子學以瞭解數位硬體是如何工作。
3. 美國許多大學（連Columbia在內），電機工程學系之計算機科學只選修一學期。顯然，其範圍都集中在數位電子學上，如果是這

樣採用本書第一及第二部作為教材即可。這九章所含材料用一個學期來教稍嫌過多，這時則可由任課老師酌予刪減。

4. 電子學課程大都需包含實驗作業。無論是設計與實驗室實驗，數位都會比類比簡單。這種實驗課程對其數位課程來說也許是同等的重要。然而，類比實驗課程之編排並不十分理想，因為所需之網路原理課程仍居首要。
5. 事實上絕大多數新的電子系統都是以數位為主。

第二部係介紹小型積體 (SSI) 邏輯閘 (AND, OR, NOT, NAND, 等)，並增補一些各種標準族 (DTL, TTL, ECL, ...) 以充實之。此外尚有組合系統等，係屬中型積體 (MSI)，諸如，二進位加法器，數位比較器，同位核對器，解碼器/分工器，數據選擇器/多工器，編碼器，以及只讀記憶體 (ROM)。以順序數位系統為例，我們要研討正反器 (S-R, J-K, T, 及 D 型等) 並且像玩積木般的應用它們來作移位暫存器以及計數器。

當學者已很熟練地使用雙極電晶體並知道應用於各數位系統之後，就介紹一些新半導體元件，場效電晶體並能運用於邏輯閘中。最後，在第9章中則講述有關大型積體 (LSI) 系統，MOSFETs 及 BJTs 等。這都是以記憶為主其中包括動態 MOS 移位暫存器，MOS ROMs，可抹除可規劃程式只讀記憶體 (EPROMs)，可作程式邏輯規劃陣列 (PLAs)，隨機出入記憶體 (RAMs)，電荷耦合元件 (CCDs)，微處理機，微計算機，以及積體注入邏輯 (I²L)。

第三部 (10 至 18 章) 專門研討類比電路及系統。所要講的為個別 BJT 或 FET 的偏壓法，以及工作點之穩定性。獲取每一元件之小信號模型以用於計算低頻率單級及串級放大器之性能。

反饋概念之介紹。列述四種標準反饋放大器組態，並描述這類電路的特性。運用高頻率電晶體模型以獲得放大器之頻率響應 (含或不含反饋)。

該基本線性 (類比) 基塊也就是運算放大器 (OP AMP)，其特性與應用均在最後四章中講述。運算放大器的單石類比設計技術，包括保其穩定度之頻率補償方法在內，也都作詳細的介紹。討論有關廣泛應用 OP AMP 方面包括：儀器放大器，類比計算機，有源濾波器，精密 AC/DC 轉換器，抽樣及保持系統，類比多工器以及分工器，對數放

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，正弦波振盪器，功率放大器，及單石電壓調整器等。

若是兩個學期的電子學課程，第二階段課程可由第三部中取材。第三部的材料用於一個學期則嫌過於繁重，這時可由任課教授從中擇取他認為重要的課題來講。

在電子學中許多課程祇需其中某一重點課程就行了。因而提供了許多可供選擇之電子學方面課題。實際上本書所搜集之材料已足夠三個學期之用。

如果某教授認為第一階段的電子學課程應將類比教材排在數位教材的前面，那麼就可採用第一部以及從第三部中摘出部份施教即可。但是還應包括在第二部中的 8-1 節至 8-6 節場效電晶體在內才是。

從以上討論，就不難發現本書中的各專題都是按某種方式編寫，也就是說本書取材廣度與深度並重，可使施教者有選擇餘地。

當平面電晶體問世後，自 1959 年起在其晶片上的組件數每年加倍。在一 IC 晶片上之組件密度由於此一經常性的增加，而使得電子電路與系統間的分辨也就變得極含混了。事實上，就像一個 OP AMP，完整單石封裝往往就會當它是一個“元件”。本書並無意將此等元件，電路，或系統作明確的劃分：雖然一個單一電晶體顯然就是一個元件，一個大型微電子晶片就該稱為“系統”或是至少也該稱為“副系統”才對。

現代的電子工程師設計一種新產品（例如，儀器，控制，計算機，或通訊系統，等等）祇要將標準微電子晶片互接，即可如願以償。有人想要盡量減少封裝數（因成本之故）就採用隨處可買到的 LSI 及 MSI，甚至只使用 SSI 晶片以及個別零件（諸如巨型電容器或電阻器，電感器，變壓器，轉換器，等等）即可達到目的。這樣看來，電子工程師只要記得在市面上可購得者有那些 IC 晶片，它的功能，及所受限制為何就行了。

如前所述，本書的宗旨是在引導讀者從半導體特性之性質上學起一步步逐漸了解元件（特別是 $p-n$ 二極體，BJT, MOSFET, CCD，及 I^2L 陣）的工作情形，終於了解如何運用各個有用之輸入-輸出特性將此等單石元件組合成為微電子晶片。在本書中可學到各種 IC 晶片，其中不祇是講解怎樣製造矽並且還要深入瞭解此晶片所履行數位及／

或類比功用。在學完每電路或系統之後，爲了有助於工作上所需（例如要作數位多工，類比比擬，數位與類比之轉換等）乃將特殊現有封裝製成附註以供參考。所講述的均爲真實的，而非理想元件的實際限制（由於溫度，電壓，功率，負載，等等），爲了要識別此等非理想特性，在附錄 B 中均提供有關廠家具代表性的個別元件及 IC 晶片。深入探討，廣擇課題，以及加強實習以備學子畢業離校之後可以學以致用直接加入生產行列。

本書係參照 Millman 及 Halkias 的積體電子學：類比與數位電路及系統（1972）加入最新材料作徹底整編，重寫而成。其中所增加的許多新課題比起如下所列舉者還要多得多：邏輯閘之三狀態輸出級，更高次序的分工器及多工器，優先編碼機，ROM 之二維定址法，ROMs 之字與位址擴充，通用移位暫存器，MOSFETs 之工藝改進，未飽和或空乏負載反相器，CMOS 輸送閘，可抹除程式規劃 ROM，程式規劃邏輯陣列（PLA），動態 RAM 格，電荷耦合元件（CCD），微處理機，積體注入邏輯（I²L），類比設計技術（電流源及轉發器，有源負載，位準移位，以及一 OP AMP 之輸出級），抽樣保持系統，類比多工器以及分工器，數個 A/D 轉換器系統，電壓控制振盪器，正負控制增益放大器，再觸發單穩複振器，電壓 - 時基產生器，方波調變，功率放大器（含熱考慮），交換調節電源供給器，以及功率 FETs（VMOS）。本書提供 1978 年初微電子學技藝並指出未來可能發展方向。

爲了容納新材料，已將在“積體電子學”中的若干課題予以濃縮甚至全部捨棄。例如，半導體元件物理學之討論就大量減少，個別元件之偏壓法已不予重視，半導體之光電效應也已刪掉，四參數低頻率拼合模型也只作重點敘述，而放大器雜訊，調諧放大器，及 CRT 字元產生器等之討論均已省略。

新增電子學及電子工業簡短發展史載於本前言。希望在開始研讀全書之前，以使教師與學者閱讀這段光輝燦爛的歷史而激發學習興趣。

在編排方面盡量考究在觀念上傳授，對元件 - 電路 - 系統功效之說明，使用統一系統記號，精心繪製圖表，在課文中又對插圖詳加說明，還在每章末尾編列習題。這些習題都是應該按期去做的課外作業，因爲這樣才能讓學者有機會去測試自己，看看他們對於所學了解的程度。全部習題中約有百分之 30 爲簡單問答題或測驗題（其餘之百分

之 70 為計算題)，這是作者對此等題目的特意安排。

全書共列 717 個問題，讀者可用這些問題來測試對書中所學過的基本概念能了解多少，並可使他們能領悟到如何去分析與設計電子電路與系統等。全部計算字題幾乎都係用實際的參數值及規格。只有極少數問題是從“積體電子學”中所摘錄者。大多數的問題日都是新的或是修改以前用過的。各問題的重要答案都列於附錄 E 中。

凡採用本書的教師如果想要題解參考書可寫信到：College Division, McGraw-Hill Book Company, 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020。請注意：Electrical Engineering Editor, 27th floor。另一輔助教學法，書中附有圖片 124 幀在講課時對教師很有參考價值。

出版本書曾徵求許多採用本書前身“積體電子學”一書的教師們之意見，他們要求在新版中刪除，增添，校正，等等之建議。而本書正是根據他們的建議寫成。本人特別要感謝 J.E. Steelman 教授所提供之許多寶貴的建議。就像在第 13-3 節中 notes 之後所用的方法是他所提供的。最令人感奮的是幸得我兒子 Dr. J.T. Millman 的協助與商議。並由他負責第 18 章之校正。我也要向 D.A. Hodges 教授表示最大的謝意，承蒙他的詳細審閱以及對第 9 章所作建設性的批評與建議。此外還要感謝 Dr. T. V. Papathomas，由他負責撰寫本書的“題解參考”以及 B. Lim 太太，她打錄原稿及題解的熟練技巧。

Jacob Millman.

前言

電子學簡史

此前言對本書之電子元件其工作頻率從直流至數百 MHz 之發展作一歷史性的回顧。同時也要探討由這些元件的發展形成各式電路與系統，而帶動工業成長的歷程。

歷史背景

“電子學”因不同的人與不同的國家有不同的意義。因此，特將在此所用之術語憑個人意識下一定義。“電子學”係指荷電質點在氣體，真空，或半導體中活動狀態之科學及工藝。但要注意若該質點只限於在某種金屬內活動，那就不屬電子學範圍。

在電子工程 (Electronic engineering) 問世之前；電機工程 (Electrical engineering) 已早盛行於世了。電機工程係單指處理電子在金屬中活動的各種裝置的範圍而言。例如，發電機，電動機，電燈，或電話等。此等裝置主要用於有線電話或電信局以及動力工業方面。

電子與電工之貢獻乃歸功於諸如庫倫，安培，歐姆，高斯，法拉第，亨利，與馬克斯威爾等科學巨人在電與磁的方面的開拓工作。約於 1865 年，馬克斯威爾聚合了其他諸先進的研究成果樹立了目前稱為馬克斯威爾方程式的電磁學理論。雖說馬克斯威爾的學說曾預言電磁波可在空中傳播，並稱光也是一種電磁波，然而直到幾乎 23 年之後 (1888 年) 赫茲運用火花間隙振盪器而製造出此類輻射獲得驗證。這却是一個史無前例的首先樹立科學理論的鐵證。於 1896 馬可尼 Marconi 發射赫茲電波成功，並在距離約二英里處發見此等電波。在這次實驗中無線電報的基礎仍然十分脆弱。

此一歷史在時間上可分為兩個時期，簡而言之即為過去與現代。過去即指管子時代——含真空管或充氣管。現代係起於 1948 年電晶體之發明。也包括了一可想見的之未來。

過去

電子學起始於 1895 年，也就是在羅蘭茲(H.A.Lorentz)認為個別稱為電子的電荷之存在之際。兩年後湯姆遜(J.J.Thompson)從實驗中發現此等電子。同年(1897)布勞恩(Braun)製造出可稱為第一只電子管的，其實就是原始的陰極線管。

真空管的發明

電子學在未及二十世紀初已開始推往工藝形態。1904 年佛來明(Fleming)發明他稱為閥 Valve 的二極管。其中含一條在真空中對相距甚近之屏極間放射電子的加熱線。在屏極上施加正電壓就集聚電子，若施加負電總電流減低為零。這種真空管用作為無線電信號檢波器。兩年後，畢卡得(Pickard)試出以一矽晶體附加一貓鬚線（一尖頭線銜接於矽晶體中）作為檢波器。這就是第一只半導體二極體。這種元件極不牢靠，很快就被棄而不用，於是半導體電子學於 1906 年胎死腹中而告停頓。

同年(1906)裏，在這早期的電子學歷史途中出現了最為重要之里程碑，就是福雷斯特(L.D.Forest)在佛來明真空管中加上一個第三電極（柵極），於是就發明了被他稱為 Audion 的三極管。柵極電壓細微的變動即可使屏極電壓產生巨大之變化。因此該三極管即為首創之放大器。為了要獲得一可靠的電子元件大約花費了五年時間來改進其三極管中之真空而增添了一有效之塗氧陰極。因此該實用電子學時代則約始於 1911 年。（非常湊巧，我也是這年出生）

無線電與電視

電子學最初係應用於無線電，同時也是電子學的誕生，而無線電工程師協會 IRE(The Institute of Radio Engineers)於 1912 年在美國成立。這對當時的工程師們之創造力是具有巨大之貢獻，他們立即就瞭解到無線電之重要性，就在無線電通訊剛一開始之際就組織了此一協會。而美國電機工程師協會早在 1884 年就已成立，專注於電機工程師們一貫的興趣。這兩個社團於 1963 年合併成為電機電子工程師協會 IEEE(The Institute of Electrical and Electronic Engineers)。

第一座無線電廣播電台，KDKA，於 1920 年在美國賓州 Pitts -

burgh 成立，由西屋電氣公司建造而成。僅短短四年之後，美國都已有 500 座無線電台。該廣播歷史（含無線電及電視通訊二者在內）可分為三主要時期。

1907 至 1927 年代 當時所用的元件等只是簡單燈絲型陰極之二極管與三極管而已。經工程師們的努力而發明了各式電路，串接放大器，再生放大器（1912 年為阿姆斯壯 Armstrong⁺ 所創），振盪器，外差式（1917 年為阿姆斯壯所發明），以及放大器中以防不必要振盪之中和電路。

1927 至 1936 年代 為二極管及三極管發明了間接式加熱陰極。在三極管中附增另二電極——第四及第五極——而分別構成該簾柵管及五極真空管。在此期間還推出了束射功率管及金屬管。由於此等新元件，使工程師們才能發明該超外差接收機，自動增益控制（AGC），單旋鈕調諧，以及多頻帶工作。無線電都成了當時的熱門生意。

1936 至 1960 年代 在這最後的階段裏，盡量減少各電極之間的距離（以求高增益帶寬乘積），則有袖珍型玻璃管的發明，直到本年代末期，方發明彩色電視管。阿姆斯壯少校於 1933 年發明了調頻。大約五年後第一部調頻接收機才正式啓用。而黑白電視約起源於 1930 年，在此尤須提及者當為 RCA 之 Zworykin。至少在十年後電視，在美國電視才正式地使用。

商用彩色電視起源於 1950 年前後，隨之便有許許多多新的任務完成。於是就發明了如下各式電路：調頻限制器，調頻鑑別器，自動頻率控制（AFC），鋸齒波型產生器（用於電視管之線性偏向），同步，多工制，以及逆反饋電路（含運算放大器等）。

電子工業

電子工業大致可分為一或至如下之四大類，我應稱它為四 C's，每個 C 分別代表組件（Components），通訊（Communications），控制（Control）（或自動化），以及計算（Computation）等。電子零件公司歷來供應各式電子管，諸如電阻器，電容器，線圈，變壓器等各式無源電路元件。

+ 當時阿姆斯壯還是一個在哥倫比亞大學尚未畢業的學生。

該第二類 C (通訊) 係指工業所製造之調幅及調頻無線電，高度逼真度系統，以及黑白與彩色電視接收機及發射機等。

第三類 C (為控制) 當不言可知係指“工業電子學”。工業電子學也可解釋為“以電子元件等使用於工業機器等之控制與操作(而非通訊及計算方面)”。工業電子之元件有充氣二極管及三極管(閘流管等)，諸水銀電弧整流器，高壓及高功率管等槽式陰極元件。在此期間的電路有功率整流器，高壓整流器，功率放大器，高壓發射電路，感應及介質加熱，功率反相器(由直流至交流)，測量，馬達控制，以及工業程序控制等。

計算機(第四 C) 於此刻剛具規模，因此，對此項工業將在下面詳細討論。

現 代

本年代約起於 30 年前電晶體發明之際。

雙接面電晶體的發明

這段發明史非常有趣。凱利(M.J.Kelly)，研究室主任(其後為貝爾研究所所長)，他首先察覺電話系統需要用電子來交換並需要有更好的放大器。真空管並不十分可靠，主要因為它們會產生大量的熱，即使是在未被使用時也會如此，尤其是，燈絲燒毀就得更換新品子。一固態物理組於 1945 年組成。該組織工作重點為：“本組織所實行之研究係遵照其宗旨將獲取其新知識以用於發展全新及改進組件等以及通訊系統之設備組件”。其中最重要的目標之一是要發展固態放大器。該組係由理論及實驗物理學家，理 - 化學家，及電子學工程師等所組成，他們與冶金專家們在實驗室中共同研究。這些科學家們對 Block, Mott, Schottky, Slater, Sommerfeld, Van Vleck, Wigner, Wilson, 以及世界上其他卓越科學家們已經完成的金屬及半導體等之理論研究均甚為熟識(我很幸運的曾在此等名教授中的兩位 Sommerfeld 及 Slater 領導下作過研究工作。)

在 1947 年 12 月裏的一項實驗，在一鉅晶體之表面壓入相距極近的二個金 - 線探棒。發現在該“集極”探棒之輸出電壓(對鉅基極而言)要比輸入到“射極”探棒來得大些。Brattain 與 Bardeen 立即體

察到這就是他們所要尋求之功效，於是固態放大器（係為點觸型電晶體）終於因此而誕生。這就是第一只最差勁的電晶體。它們的增益和頻帶寬均甚低並且還有雜音。同時各元件間的參數之變化很大。

肖克利也認為使用金屬點接觸有許多困難。他建議立即作接合式電晶體（第三章）工作理論的實際研究工作。有一種元件係非點接觸式，該電晶體係賴擴散而工作，以取代呈現在電子管中的傳導電流。該新元件具有同時工作之雙極性電荷載子；那就是雙極元件。該載子就是赫赫有名的電子，而另外“奇特質點”就不知為何物解。經測試顯示，其極性與電子相反，因此就等於是正電荷。這類質點只可用量子力學理論來解釋。它們被稱之為“電洞”因為它們代表晶體中曾經被電子所佔用而在失去之後遺留下來的位子，所以稱為電洞。在真空中之電流會受到熱離子射極附近所造成之電子空間電荷所限制。這種空間電荷，這種電子雲，排斥隨後所發射之電子。這種現象不可能出現於一電晶體中，因為根據理論所示該新元件基本上是中性的，除非是有一薄而呆滯的空間電荷層緊靠在其接合處。因此在此等新元件上施加些低電位就可望使密度大增。獲得重要實用元件（而非加熱之燈絲）之可能性即被認定。

從理論上研討得知該電晶體除非應用特別純的單晶體造成否則就毫無用處。大約兩年之後，貝爾研究所的 Teal 製作出單鉻晶體比後來的矽其雜質原子要少十億分之一。然而可以經由控制所導入雜質稱之為施體或接受雜質原子其程度僅可達億分之一而已。用這種方法構成雙極電晶體接面（2-1 節）。第一只接合電晶體於 1950 年出現。其合金接面方法即於第二年出現。短短的三年後就發明了用固體來放大。於 1951 年電晶體就正式列於商業生產行列。

貝爾當局立刻作了一個最重要的共同決定——將此項新發現當絕對公開。任真地舉行了幾次座談會與教授們共享這份知識（讓他們也可將此項知識傳授給學生），同時也可與其他公司共享這份成果。並對有意構造電晶體各公司頒發特許執照。讓諸如西電電子管公司（該公司係為貝爾系統擔任製造工作者），RCA，西屋，以及奇異等公司均係首先製造電晶體，也有許多新的零件公司發現此元件的前途大有可為因而也隨之參與其事。有關半導體元件製造業者之一覽表，請查附錄 B-1。

至 1952 年，美國軍事專款已配撥部份移作電晶體研究之用。主要由於這類元件體積小，重量輕，電力低，易於處理，且可靠性高（因無須燈絲）武裝部隊有意將這類元件用於飛彈中。此項投資償還極為順利。從實際上看固態元件除了那些須使用過高電壓及功率者外，幾乎在軍事方面以及商業應用上均已取代了電子管子。美國大多數的大學在他們的課程中已不再提到真空管了。

電晶體的特性均隨溫度之變更而有巨大之變化。就拿鎢來說，溫度若超過約 75°C 以上其變量就趨於過量，然而矽則可在 200°C 以下使用。1954 年德州儀器宣佈生產矽電晶體。如今絕大多數的半導體電晶體以及其他元件都用矽作成。

1956 年 Bardeen, Brattain, 及 Shockly 均榮獲諾貝爾物理學獎。這還是首次頒發諾貝爾工程元件發明獎。

積體電路

1958 年 Kilby 加入德州儀器後不久就有單石晶片的構想。也就是，製造一種擺脫鎢或矽之完全電路概念。他使用大塊半導體作成電阻器，同時他也製造出擴散型層電阻器（4-9 節），他用氧化層（作介質）於矽上造成電容器，還設想為 $p-n$ 接合電容器（4-10 節）。爲了要證明他的構想之可行性，他用此種電阻器，電容器，及一電晶體做了一部相移振盪器和一部複振器，全部都是以鎢與熱黏合金作連線製成。然而，在申請專利時，他指出可以設計妥當傳導材料將此類組件互接。1959 年 Kilby 在一無線電工程師協會會議中正式宣佈了他的固態電路（後來稱為積體電路）。

大約在此同時的 Noyce，其後在快捷半導體任研究發展主任（現為 Intel 會主席），他也有製作單石電路的構想，他的想法是“爲了能使各元件之間的相互連接成為製造過程的一部份，將多種元件作在單矽晶片上，如是則可縮小體積，減輕重量，而且價錢也跟每一主動元件一樣”。他曾述及如何使用反偏壓 $p-n$ 二極體等才能將各元件之間彼此隔離，如何才能製作電阻器，如何經由各洞孔運用氧化物蒸發金屬來完成各電路元件之間的相互連接。（利用反相連接二極體使元件隔離的觀念係由 Sprague Electric 公司研究部主任 Lehovec 單獨想出，並於 1959 年獲得專利）。最新的擴散型電晶體（第 4 章）係由 Fairchild

之Hoerni 於1958年所發明。他的辦法是在表面以一氧化層鈍化接面之平面處理。他所用的製造影印石板技術與擴散過程原係Noyce及Moore所發明的方法。其實積體電路製造的主要關鍵在於平面電晶體與整批處理。到1961年，Fairchild和Texas儀器均已將該積體電路等從事於商業生產，其他公司很快也加入他們製造IC。如今數百萬的電晶體，無源組件，及其相互連接均可同時整批大量生產。

場效電晶體

在電晶體發明之前已有許多人在研究其“場效”，也就是，施加一橫向電場以使一固體之傳導性變化。其實，正當此等場效研究期間，正如前所述，已發明了雙極電晶體。Shockley 於1951年提出過接合場效電晶體。然而，剛一開始企圖製造就遭到失敗，其原因係無法取得一穩定表面。其後由於該平面處理以及二氧化矽表面鈍化（玻璃，一最佳絕緣體）的發明而克服了此一困難。將一金屬電極（閘極）置於此一薄（ $1,000 \text{ \AA}$ ） SiO_2 層上，加電壓加於閘極及重矽之間使表面附近感應傳導電荷。該閘極在兩電極（稱為源極 S 及汲極 D ）間側向延展數微米（係指通道）而 S 與 D 之間的電流均由閘極電壓控制。貝爾研究所的Kahng及Atalla於1960年首先宣佈第一只金屬氧半導體場效電晶體（MOSFET，第8章）。該種元件之再現性甚差。大約花費了五年時間來探索出在 SiO_2 中污染物（主要是鈉離子）之困難，其後才知道如何消除的方法。許多工藝上的進步（8-6節）都由基本金屬氧半導體場效電晶 MOSFET 中獲得，現在該元件已是雙極電晶體主要競爭對手。

電荷耦合元件

在 S 與 D 之間製作一連串相間緊密的閘極電極是有此可能的。從 S 所導入之電荷則可由第一電極捕捉，經施加適當之電壓波形，此電荷則可從第一電極移往第二電極，再從第二至第三電極，如是類推。此所謂電荷耦合元件（Charge-coupled device, CCD）係由貝爾研究所的Boyle與Smith於1969年所發明（9-8節）。

微電子學

由於雙極接面電晶體與 MOSFET 積體電路等使其可靠性，工作速度，產量都直線上升，而成本，功率消耗，及體積也都急劇下降。下面所列之概略時程顯示其元件（電晶體，二極體，電阻器，或電容器）以每一 IC 矽片的增加情形。

1951 —— 個別電晶體等

1960 —— 小型積體 SSI，每晶片在 100 個組件以下。

1966 —— 中型積體 MSI，每晶片的組件數在 100 個以上在 1,000 以下

1969 —— 大型積體 LSI，每晶片的組件在 1,000 以上在 10,000 以下

1975 —— 特大型積體 VLSI，每片超過 10,000 個組件

Intel 主席 Moore，於 1964 年（當時為 Fairchild 研究部主任）發現晶片上的組件數自 1959 年起每年有倍增之勢，此時也正是平面電晶體所推廣之際。他正確的估計這種趨勢定會繼續下去。其大型矽 IC 晶片的體積也只不過約 3×5 公厘的面積而厚度僅約為 0.1 公厘（厚度與一根頭髮差不多）。這種晶片可含（以 1978 年為計）約 30,000 組件，相當於 2,000 組件平方公厘或約為 1 組件/平方密爾。此等數字對初聞者來說真是難以置信，尤其是這種 IC's 均已投入工業生產行列而非在實驗室中之研究階段，微電子學 (Microelectronics) 一語就是用來說明這種高密度 IC 晶片。目前在商業上應用一單晶片的完全計算機其面積大約為 6×6 公厘。這種微計算機 (9-11 節) 係一完全普通用途之數位處理及控制系統，也表示至 1977 年在 (VLSI) 微電子學方面所獲得的成就。在這年差不多全世界有 900 億元的電子工業均靠微電子學了！

起初的 IC's 均為數位邏輯電路（第五章），以及由這類閘相互接成組合系統（第六章），以及順序系統（第七章），從 1964 年開始，線性積體電路（第十五章）日漸使用，而類比 IC 系統都已鼎盛一時（第十六及十七章）。

半導體記憶體

許多電晶體組態均設計成儲存數位數據。這都被稱為隨機出入記憶體 (RAMs, 9-6 節)，第一部 LSI RAMs 於 1970 年由 Intel 與 Fairchild 售出。這種早期的 RAMs 可儲存 1,000 二進數元資料（大約）。

1973年 InTEL 與 Mostek 已推出了 16,000 數元之記憶器，而且可望於 1979 年作出 65,000 數位 RAMs 作商業上之應用。其 CCD 可作為循環記憶器之用，而於 1977 年就作出了 65,000 數元的 CCDs。

積體注入極邏輯 (I^2L)

直到目前為止 MOSFET 所用之處還沒有 BJT 來得大，但是往後後者很快會超過前者。在 1972 那年這種情形都有了改變，此係因 IBM (德國) 的 Beger 與 Wiedman 以及 Philips (尼德蘭) 的 Hart 與 Slob 明了一種新雙極電晶體邏輯閘之故，稱為積體注入邏輯 (Intergated-Injection Logic, I^2L)，見 9-12 節。這並不是新元件，祇是一種較新的電路組態，所用的仍為標準 BJT 構造工藝。該 I^2L 閘之密度要已增至 MOSFET 閘一樣，其速度高，而功率都很低。於 1977 年 Texas Instruments 及 Fairchild Semiconductor 已將 I^2L 晶片推出，而這種邏輯正出現於數位電子錶，記憶器及微處理機中。目前正着重 MOSFETs 工藝上的改進，主要在設法增加在一晶片上的密度與工作速度。因此，這並不足以表示 I^2L 定會勝過 MOSFET，或是相反情況。

通信及控制工業

這些工業採用固態電子，起初很慢，但是現在除非係極需使用高電壓或功率而外幾乎全部裝備都已經電晶體化了。中等電壓或功率都使用個別電晶體。這類個別電晶體之應用包括功率開關（作紙帶打孔或紙帶傳動），馬達控制，汽車點火系統，電視偏向電路，反相器，電源供給器，以及聲頻與射頻輸出級等。致於其他方面之應用大都係由 IC 所擔任。

因為微電子學使得通訊工業有了劇烈的變化。1970 年數據輸送在通信上所佔份量極微。到 1980 年數位輸送可望與聲音（類比）輸送相等。目前電話系統的交換與記憶器均採用數位微電子學設施。有源音頻濾波器等，均係類比，也均假 ICs 成全。顯然，通訊衛星由於微電子學的勃興而成為經濟實惠的通信工具。

同樣，該控制工業也深受到微電子學的影響。儀器使用，測試，自動化之製造程序，數字控制機具，以及能量之管理均以數位及計算機控制為主，其所以能實現此皆因積體電路之故。