

微電子學

上 冊

JACOB MILLMAN 原著

陳盛有 莊政義 張伯欽 合譯

**MICRO-
ELECTRONICS**

大中國圖書公司印行

微 電 子 學

上 冊

譯 者：陳 盛 有
莊 政 義
張 伯 欽

大中國圖書公司印行

原 序

本書係爲電機工程學生而編著之近代電子學教科書。本書所包羅的範圍極爲廣泛、深淺均富、考慮周詳，亦爲主修物理學科、實用工程師及科技人員在微電子學（積體電路）上求知求新的最有價值之工具書。

本書分爲三大部分，因此任課之教授可視其課程之目的與興趣之不同選擇教學之。在第一部分中討論到半導體裝置之特性，係爲初習電子學之學生而編寫。學生只須在大學一年級或二年級之間學過物理學及數學就可以瞭解到第一部分的內容了。在這四章所討論到的都是一些半導體的性質，解釋 $p-n$ 二極體以及單晶積體形式之雙載子型電晶體（BJT）的製作方式，並且討論到他們的一些特性。由於在當今的電子產品設計中，散只式之裝置已不甚重要，所以我們儘可能愈早地將積體電路（IC）晶片介紹出來（第4章）。

在第二部分（第5章至9章）裏我們要探討數位電路及其系統。爲什麼在還沒有介紹到類比電路之前，我們就先來介紹數位電子學呢？其理由爲：

1. 數位電子學之相關技術只牽涉到布林代數，易懂易學。這些裝置不是導電，就是斷電地工作，易於分析。

在此時我們要注意到的就是各電閘的交換速率及其負載之情形。反觀類比電路，牽涉到時間領域之觀念、頻率補償等，不易瞭解且難予分析。這種電路的分析須藉助於小信號參數，甚爲複雜。

初習第二部分的學生也不需有什麼電子工程學的先修要求的

，這些簡單數位網路的分析可參見附錄C，網路理論之概論。因此大二學生的程度來學習數位電子學應是綽綽有餘了

- 2 大部分的學生都已經學會計算機之程式設計（有些人甚至於在高中就學過了）。因此，他們必然急於知道到底是什麼電子數位硬體電路做什麼樣的工作。
- 3 在許多大學中（哥倫比亞大學即為一例），計算機科學系之課程中，只有一個學期的電子學選修課。所以，很顯然地這些課程的範圍應該集中於數位電子學，因此本書中第一部分及第二部分就可以使用到。在上述的九章裡包含的資料可能對於一學期的課程是多了一點，所以教授們可視需要選擇或刪去某些章節。
- 4 大部分的電子領域裏，實驗室工作佔了主要角色。數位電子實驗做起來比類比實驗要來得容易。亦即，實驗課程在數位的教學中是極必要的。而類比實驗做起來就沒有那麼輕易了，因為在此時要先修完網路理論的課程。
- 5 大部分的電子系統都是以數位式為主。

第二部分介紹了小型積體（SSI）邏輯電閘（AND，OR，NOT，NAND，……），這些可以組合成為各種標準的邏輯族（DTL，TTL，ECL，……）。然後就是組合系統，即中型積體（MSI）電路，諸如二進加法器、數位比較器、同位驗碼器、解碼器解調器、數據選擇/多工調制器、編碼器、以及只讀記憶器（ROM）。序向數位系統的例子諸如正反器（S-R，J-K，T及D型），可用來做為移位暫存器及計數器的基件方塊。

學生們已經學得雙載子電晶體的效用以及在數位系統中的應用了，所以再來探討一種新的半導體裝置，即場效應電晶體，利用於邏輯電閘中。最後，在第9章裡我們將探討MOSFET及BJT之大型積體（LSI）系統，囊括主要的記憶器，包括有動態MOS移位暫存器、

MOS ROM、可擦除再規劃式只讀記憶器（EPROM）、可規劃的邏輯行列（PLA）、隨機出入記憶器（RAM）、此外尚有電荷耦合裝置（CCD）、微處理機及微電腦，以及積體注射式邏輯（I²L）。

第三部分裏（第10章至18章）主要針對類比電路與系統。我們將討論到散只式BJT或FET的偏壓方法，以及工作點的穩度。每一個裝置將配合小信號模型做分析，計算出低頻率單級或串級式放大器的響應。

再來要介紹回授的觀念。在此要介紹四種典型的回授放大器電路，並描述出他們的特性。要求出放大器的頻率響應（有無回授情形皆是）得利用到高頻電晶體的模型。

基本的線性（類比）基塊為運算放大器（OPAMP），在本書的最後四章裡將敘述其特性與應用。我們也將詳細地介紹單晶的運算放大器之類比設計技術，包括如何用頻率補償以確保工作穩定度的方法。OPAMP的應用範圍極為廣泛，包括有：儀表放大器、類比計算機、主動濾波器、精確的AC/DC變換器、取樣及保持電路、類比多工調制器及解調器，對數放大器、D/A與A/D變換器、比較器、波形產生器、電壓時基產生器、正弦波振盪器、功率放大器，以及單晶電壓調整器等。

對於兩學期式的電子課程來說，第二個科目應以本書的第三部分內容為主。此部分的内容是相當廣泛的，所以授課教師可視需要或目的而精選其中教材來講授。

許多的課程只需一個電子學的基本必修科目，然後再有好幾個選修科目。本書的内容是供三個一學期的電子課程之用。

如果授課老師要先教有關類比的資料，可採用第一部分及某些第三部分，然而第二部分中的8-1至8-6節有關場效電晶體之敘述

應被囊括在內。

基於上述之理由，本書之內容實可做為一種或數種科目之教材，授課先生們都可以得到合理的教材安排。

自從 1959 年平面型電晶體被介紹出來後，每晶片上的元件個數幾乎每年就增加一倍。隨著 IC 晶片上零件密度的提高，使得電子電路與系統分界愈不明顯。事實上，整只單晶包裝，如一個 OPAMP，常稱為一種裝置。在本書中，我們不考慮將裝置、電路或系統做顯明的分界區別。當然了，一個電晶體顯然地是一種裝置，而大型的微電子晶片在考慮其特點下應稱為系統，至少亦屬於副系統。

現代的電子工程師在設計一項新產品時（例如，設計出儀表、控制、計算機、通信系統等）是將各種標準的微電子晶片組合起來，以達到所需之目的。並且儘可能地利用 LSI 及 MSI 以減少包裝的個數（及成本）。SSI 晶片及散只式零件（如大的電容器、電感器、變壓器及轉換器等）除非在不得已的情況下，否則儘可能不使用。因此工程師們一定要熟知那一類 IC 晶片有商用現成的產品，他們的功能為何，有什麼限制條件等。

基於上述之事實，本書之目的即在一部一步地介紹半導體之一些特性以及數值概念，進而瞭解到各種裝置的工作特性（尤其是 $p-n$ 二極體、BJT、MOS、CCD 及 I^2L 電閘等），然後我們才能將這些單晶裝置組合成為微電子晶片以執行其獨特的輸入—輸出特性。本書中所要討論到的 IC 晶片種類非常的多；不但詳細地介紹出如何在晶片上將這些電路製作出來，而且要描述這些晶片所執行的數位／或且類比式之功能。當我們對於各種電路或系統有所瞭解後，再要參考一下到底是那一種商用現成的晶片包裝可達成所需之功能（例如，數位多工調制器、類比比較器、數位至類比變換器等）。此外，我們還要解釋實際之（非理想式）裝置所遭遇到的工作限制因素（由於溫度

、電壓、功率、負載情況等所致)。有關這些非理想型之特性，我們亦以附錄B列出製造廠商所提供之代表性的散只式裝置與IC晶片提供參考。課題討論得愈深，則所須選擇的就愈為廣泛，但主要的目的是要讓學生們能一加入電子公司後就能從事於工程技術之實作。

本書係將Millman and Halkias之“Integrated Electronics : Analog and Digital Circuits and System”一書(1972年紐約McGraw-Hill公司出版)之內容重編、重寫並加進最新進步的資料而成。所加進去的新資料不外乎：三態輸出級之邏輯電閘、高階解調器與多工調制器、優先加編器、ROM的二維定址、ROM的字位或位址之擴張、通用型移位暫存器、MOSFET的改進技術、具有不飽和型或空乏負載之反轉器、CMOS傳輸電閘、可擦除可規劃式ROM(EPROM)、可規劃的邏輯行列(PLA)、動態RAM小體、電荷耦合裝置(CCD)、微處理機、積體注入式邏輯(I²L)、類比設計技術(包括有OPAMP的電流源及繼流器、主動負載、電位遷移器、以及輸出級等)，此外尚有抽樣及保持系統、類比調制器與解調器、各種A/D變換器系統、壓控振盪器、正相或反相式的增益控制放大器、可再觸發型之單穩複振器、時基電壓產生器、方波之調制器、功率放大器(包括熱環境之考慮)、交換調節型之電源供給器、功率型FET(VMOS)等。我們一直想將微電子技術從1978發展至今的藝術光輝宏揚出來，並且一再地刺探出未來可能的美景。

爲了讓較新的資料能佔一席之地，我們不得不將有些“積體電子學”的章節濃縮或刪除掉。例如，有關半導體物理之討論就得裁減濃縮，不再強調散只裝置之偏壓，半導體的光電效應不再敘述，低頻四參數式之混合模型只作簡單地敘述，而有關放大器之雜訊、調諧放大器、以及CRT之原形產生器各節皆被去除掉。

我們在本書之前言(緊接於原序篇幅之後)中將探討一下有關電

子及電子工業之發展歷史與沿革。學生們或授課教師最好能在一開始就看一下這篇較為引人入勝的電子歷史。

本書中的數學表達效果甚為精緻，用來闡釋裝置 - 電路 - 系統的行爲，且儘量用有用的系統及符號，附圖精美，學例詳盡，在每一章之後並附有複習問題。這些問題做為學生的作業最為恰當不過了，因為學生們在研讀本書之某一章的內容後便可有機會考驗一下到底從本書中獲得多少，瞭解了多少。本書作者曾拿出其中的百分之三十之題目做為測驗或考試之用，且甚感切當（其他的百分之七十題目為演算題）。

此外尚有 717 個習題，足夠讓學生們測驗出他們從本書中獲得多少基本觀念，且足以提供給學生在電子電路及系統之分析與設計之經驗。在所有的題目中，我們所給予的電路參數值以及特性規格都是最合理且最為實用的。本書所附之習題只有極少部分是括自“Integrated Electronics”一書，其他絕大部分都是新的，或將第一本書中的題目修改而提出。附錄 E 是部分習題的解答。

採用本書為教本的授課先生若要取得解答手冊可寫信至：College Division, McGraw-Hill Book Company, 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020。Attention: Electrical Engineering Editor, 27th floor。在本手冊中為了便於教學講述，同時附有 124 個插圖說明。

本書在出版之前曾詢問許多採用過“Integrated Electronics”之教授們的意見，請教他們那裏該刪減、增加、或修改。本書之編輯就是根據他們的意見而做安排的。作者甚感激 J. E. Steelman 教授所提供的寶貴建議，特別是 13-3 節的內容係根據他的意見而編寫的。尤其感謝我的兒子 Dr. J. T. Millman 給予我技術上的幫助與咨助。第 18 章的內容即由他主筆修改的。同時要感謝 D. A. Hodges 教

授做本書的精校及對第9章所提出的精闢見解。感謝 Dr. T. V. Papathomas 負責編寫“解答手冊”，以及Mrs. B. Lim爲習題解答做的打字工作。

賈格柏·密爾曼

(Jacob Millman)

前 言

電子學之簡史

本書中的這一篇前言主要在述說工作頻率從直流至好幾百兆赫之電子裝置發展的歷史。同時也要探討開發這些裝置使成為實際電路與系統之工業成長。

背 景

在不同的國度之不同的人群中，“電子學”一詞實在有不同之意義。因此，我們先來定義出到底什麼是電子學。

所謂“電子學”(Electronics)就是討論到在氣體、真空中或半導體上帶電體運動情形的一種科學或技術。請注意，在金屬中質點的運動不算是電子學所研究的範疇。

電機工程學(Electrical engineering)先於電子工程學(Electronic engineering)之前而燦耀奪目。電機工程學所討論到的裝置及範圍僅限於金屬中電子的運動；例如發電機、馬達、燈泡或電話等。這方面中較突出的裝置為有線電話或電報，以及電力工業。

電子學及電工學的發展實應歸功於庫倫、安培、歐姆、高斯、法拉弟、亨利、及馬克斯威爾等諸位在科學上赫赫有名的巨人在早期對於電學與磁學之研究。在1865年，馬克斯威爾與其他一起工作的研究學者致力於電磁理論的統一，發展出一套馬克斯威爾方程式(Maxwell's equations)。在此理論推介出來之前已經有甚多的歷史上之實例了。雖然馬克斯威爾推斷出，電磁波可在空間傳播，而光是屬於一種電磁波，但一直到20年後(1888年)赫茲(Hetz)才用火

花間隙振盪器產生電磁放射。1896 年馬可尼（Marconi）將赫茲電波傳送出去，在兩哩外的距離接收到。無線電報器是因為這個實驗誕生的。

電子學的歷史可概分為兩個階段，就稱為過去與現在兩個罷。在真空管或充氣電子管以前時代稱為過去的階段，而 1948 年電子管發明後歸屬於現代的階段。有關未來的發展與美景在本書中也要做一番簡明的交待。

過去的時代

電子學啓蒙於 1895 年，當時勞倫茲（Lorentz）將量子式之電荷假定為電子。兩年後湯姆生（J. T. Thompson）才以實驗的方式找到電子的存在。同年布勞恩（Braun）建造出可能是第一只的電子管，是為陰極射線管之始祖。

真空管的發現

直到廿世紀初期，電子學才被以有形的技術表現出來。1904 年佛來明（Fleming）發明了稱為閥（valve）的二極管。此裝置有一導線可發射出電子，在真空中面向著一屏極，兩者距離不遠。當屏極施加正電壓時，由上述發射而來的電子便被收集起來，如果施加負電位，則其間的電流便會等於零。所以這種電子閥可用來檢測出無線電信號。兩年後，皮卡德（Pikard）將一矽塊繫上貓鬚線（將很細弱的導線擠入矽晶塊中），形成了檢波器。這就誕生了半導體二極體了。但這種裝置極不可靠，所以很快地就被人遺忘了，也因此半導體電子學在 1906 年胎死腹中，無所發展。

同一年（1906）因為德 - 佛雷斯特（De Forest）發明了三極管，這又是電子學早期發展的一個里程碑，他將佛來明的電子閥中

再加入另一個電極（柵極），所以發明出來的三極管稱為音管（audion）。在這種電子管中，柵極上的電壓只要有微小的變化，便能使得屏極電壓發生相當大的變化。因此，這種裝置就是放大器的鼻祖了。五年後這種電子管中的真空情況才獲得改善，而且加上一個鍍上了氧化物的陰極，使得電子的放射效率更為可靠。也就是說，實用電子技術大概從 1911 年才起步（很巧合地，我本人就在那一年誕生的）。

收音機與電視

無線電收音機是電子技術的最早應用，同時因為電子學的誕生，所以美國在 1912 年成立了 IRE（The Institute of Radio Engineers）。早期的電子工程師們真了不起，能夠馬上覺察出收音機的重要性，而在收音機通訊一開始就成立了這一個機構。美國電機工程學會（American Institute of Electrical Engineers），專為一般電機工程師而設，早就成立於 1884 年。這兩者在 1963 年合併成為電機電子工程學會（The Institute of Electrical and Electronic Engineers，IEEE）。

在 1920 年，賓州匹次堡之西屋電氣公司開始成立第一個無線電廣播電台，KDKA，然後在短短的四年內，至 1924，全美國共成立了 500 間的無線電台了。廣播（包括收音機及電視之通信）的歷史可分為三大階段。

1907 至 1927 在此時期的裝置只是一些具燈絲型陰極之簡單二極管及三極管。由聰明的工程師所設計出來的電路有串級放大器，再生式放大器（1912 年阿姆斯壯（Armstrong⁺¹），振盪器，
+ 阿姆斯壯在這時畢業於哥倫比亞大學

外差放大器（1917年阿姆斯特壯），以及爲阻止放大器中不必要的振盪所做的中性化技術。

1927至1936 已發明傍熱式二極管及三極管。並且在三極管中介入第四個及第五個電極形成簾柵四極管以及五極管。同時，束射功率管（Beam Power Tube）及金屬電子管也被發明出來。藉著這些裝置，工程師們才能設計出超外差式接收機，自動增益控制（AGC），單鈕式調諧器，及多波段之工作。收音機在此時大放異彩。

1936至1960 在此時期所製作的裝置偏重於電極間距離的減少（以提高增益-頻寬之乘積），玻璃管的形狀愈來愈小，在此末期已經發展出彩色電視映像管了。阿姆斯特壯少校在1933年發明了頻率調制法。五年後，FM接收機便誕生了。電子黑白電視機在1930年正式應市，此時最重要的人物非RCA的查瓦瑞京（Zworykin）莫屬。十年後。美國各地，電視機已打入家家戶戶之客廳了。

1950年後，商用彩色電視開始問世，同時也加入多種功能。因此發明了FM限制器，FM鑑頻器，自動頻率控制（AFC），鋸齒波產生器（TV管中的線性偏向用），同步，多工調制、以及反回授電路（包括運算放大器等）。

電子工業

電子工業可分類成四種，當時稱爲四個C：零件（Component），通信（Communication）、控制（Control）、與計算（Computing）。零件製造公司在此時能製作供應出各種型式的電子管，此外尚有製造如電阻器、電容器、線圈、變壓器等被動元件之廠商

第二個C（通信）為製造AM或FM收音機、hi-fi音響系統，黑白或彩色電視接收機及發射機之工業。

第三個C（控制）很顯然地與“工業電子”有關。工業電子可定義為「用以控制工業的機械（器）之動作所使用的電子裝置。諸如充氣二極管、三極管（閘控管）、湧流陰極裝置，如水銀電弧整流管、高功率及高電壓之真空管。所以此一時期之電路為功率整流器、高壓整流器功率放大器、高壓發射電路、感應及介電式加熱器、功率變換器（由直流至交流）、測量、馬達控制、以及工業程序之控制。

在此時計算機（第四個C）甚少露面，因此有點計算機工業將在下述篇幅再來敘述。

現 代

三十年前電晶體發明之後，進入此一時代。

雙載子型電晶體的發現

電晶體的發明歷史是多彩多姿的。M. J. Kelly，研究部主管（後來為貝爾實驗家的首長）很早就有構想，希望電話系統使用電子交換及品管較佳的放大器。由於真空管在工作時，散發出多量的熱，非常不牢靠，且其燈絲常常燒燬。常須更換管子，甚不經濟。於是在1945年成立固態物理小組。引述此小組當初成立的宗旨。「本小組成立目的及執行之目標係在找尋最新的知識以發展出最新且最好的通訊用零件與器材」。其中最主要的目標就是發展出固態放大器。此一小組由許多理論與實驗並重之物理科學家，一個物理化學及一個電子工程師組織成立，且與冶金專家共同致力於實驗研究。這些科學家甚注重已經由Block, Mott, Schottky, Slater, Sommerfeld, Van Vleck, Wiger, Wilson, 以及世界上各物理學家（很幸運的

，我在讀研究所時，Sommerfeld 及 Slater 兩位教授是我的指導老師）所發展的金屬與半導體理論。

在 1947 年有一次在做實驗時，將二根相距很近的金線探棒擠入鍺晶體的表面，結果在“集極”探棒的輸出電壓（對鍺晶體的基底之相對電壓）比在“射極”探棒的輸入電壓還要大。布拉田（Brattain）及巴汀（Bardeen）兩位教授便很快地覺察到這就是所需要的效應了，因此誕生了固態放大器（為點觸型放大器之形式）。但第一個電晶體不很理想，其增益甚低、頻寬甚窄、且雜訊相當的多。同時每一裝置之間參數之值變化不等。

蕭克萊（Shockley）認為上述的困難是因金屬接觸情形所致。因此隨後便提出接合電晶體（第三章），且將工作原理確立起來。這種發展出來的裝置沒有金屬線之接觸，並且電晶體的工作是基於電荷之滲透作用，而不是如同電子管的導電流之工作。這種裝置中，同時有兩種電荷在變化著，所以是一種雙載子型之裝置，裝置中的電荷載體是我們熟習的電子以及其他讓人們不太知道是什麼東西的“奇怪粒子”。經測試後知道這些粒子的電極性與電子是相反的，同等於正電荷。同時，利用量子力學才能解釋這種粒子。由於這些載體的形成是因為晶體中電子走失所留下的空間，又稱為“電洞”（hole）。真空管中的電流是因為在熾熱射極之周圍所聚的電子空間電荷貢獻的。這種空間電荷稱為電子雲，可將發射而來的電子排斥之。此現象並不能存在於電晶體中，因為此種裝置只在極窄薄的部分，靠近接合之區域才有不活動性的空間電荷層，其餘部分皆為中性。因此在很低的電位下，這種裝置便能產生很大的電流。於是就可以得到很重要且實用的裝置（無燈絲之型式）。

除非很精純的單晶能製造出來，否則電晶體在理論上是不能製造出來的。兩年後，貝爾實驗之提爾（Teal）生長出鍺單晶體，然後

才做出少於百億分之一雜質的精純矽晶體。之後，利用施體（donor）與受體（acceptor）原子做一億分之一的雜質濃度控制。於是形成了雙載子電晶體的接合（2-1節所述）。在1950年製作出第一個生長接合型電晶體，隨後第二年製作出合金接合式電晶體。在固態放大器發展後的第三年之內，1951年電晶體便開始走入商用的製品市場了。

貝爾系統作了一項極其重要的決定，亦即不把新的發現守口如瓶。他們甚至舉行討論會發表給各教授們（才能再告訴給學生），甚至於使其他的電子公司也能學習到。他們甚至將專利品捐讓出來，准許其他有興趣的公司製作電晶體。隨著注意到電晶體重要性的各公司，如生產管子的Western公司（以前為貝爾公司生產管子）、RCA、西屋公司以及 General Electric 等首先供應生產的電晶體後，其他大小公司也競先製造着。附錄B-1所示為各半導體裝置的製造廠商附表。

1952年，美國軍方甚至於撥款專門做電晶體之研究。軍方尤其對這些裝置感到興趣，因為體小量輕，功率低，特性優良而可靠度之諸種重要的因素均為飛彈所需。因此在這一方面的投資馬上見效。在各種軍事及商用產品的應用中，固態的零件便逐步地取代了真空管，只除了一些電壓甚高、功率甚大的場合外。在美國大部分的大學課程於是不再講授真空管的課程了。

電晶體的特性隨著溫度的變化而變化。在溫度超過 75°C 時，鎢質電晶體的變異情況已經非常的厲害，而矽質電晶體可能工作至大約 200°C 。1954年美國德州儀器公司宣布矽電晶體已經製造成功。在今日大部分的半導體裝置及其他裝置都是以矽晶體製作成功的。

1956年巴汀、布拉田及蕭克萊三位先生獲得諾貝爾獎金。這是第一次授與工程裝置的諾貝爾獎。

積體電路

1958年吉爾貝（Kilby）在加入德州儀器公司不久之後便接受了單晶製造的觀念了，亦即將整個電路製作於同一個鍺或矽晶片（塊）之上。他製成容積（bulk）狀之電阻器，也做出層滲透型電阻器（4—9節）。同時將氧化層（做為介電質）做在矽晶上形成了電容器，此外還考慮到p—n接合電容器（4—10節）。為了展示他的構想，從一鍺晶片上做出相移振盪器，以及利用上述之電阻電容與電晶體做成複振器、且將金線用熱處理方式接連上去。在他申請的專利中強調各零件可藉金屬導體之佈置接在一起。在1959年，吉爾貝於IRE上宣佈發明固態電路（solid circuit），亦即後來所稱的積體電路（integrated circuit, IC）。

就在這同時，Fairchild半導體公司的研究發展部董事長諾依斯（Noyce），現為Intel公司的主席團主席，也有單晶電路的構想，「將許多裝置製在同一矽晶片上，次在製作的步驟中做各裝置之間的接連，次減輕及重量；減小體積，以及降低每個主動零件的成本。」他同時介紹出，各種裝置可藉反偏壓的p—n二極體隔離開來，且介紹出電阻的製作方法，而且如何在氧化物上之開口蒸著上金屬以做為電路零件的連接用。〔利用背對背的二極體做為零件的隔離之用在1959年由Sprague電氣公司的研究部董事長雷阿維克（Lehovec）所提出來，是另一件事了。〕第一個最進步的滲透型電晶體（第四章）是在1958年由Fairchild的霍爾尼（Hoerni）發展出來的。他負責了平面化技術，藉着表面上的氧化層形成接合面。他利用諾依斯及摩爾（Moore）所發展的光刻術與滲透步驟，且更發揚光大以製造之。其實真正的積體電路之製作關鍵在於平面型電晶體的整批（batch）製作步驟。在1961年，Fairchild與德州儀器公司同時推出商