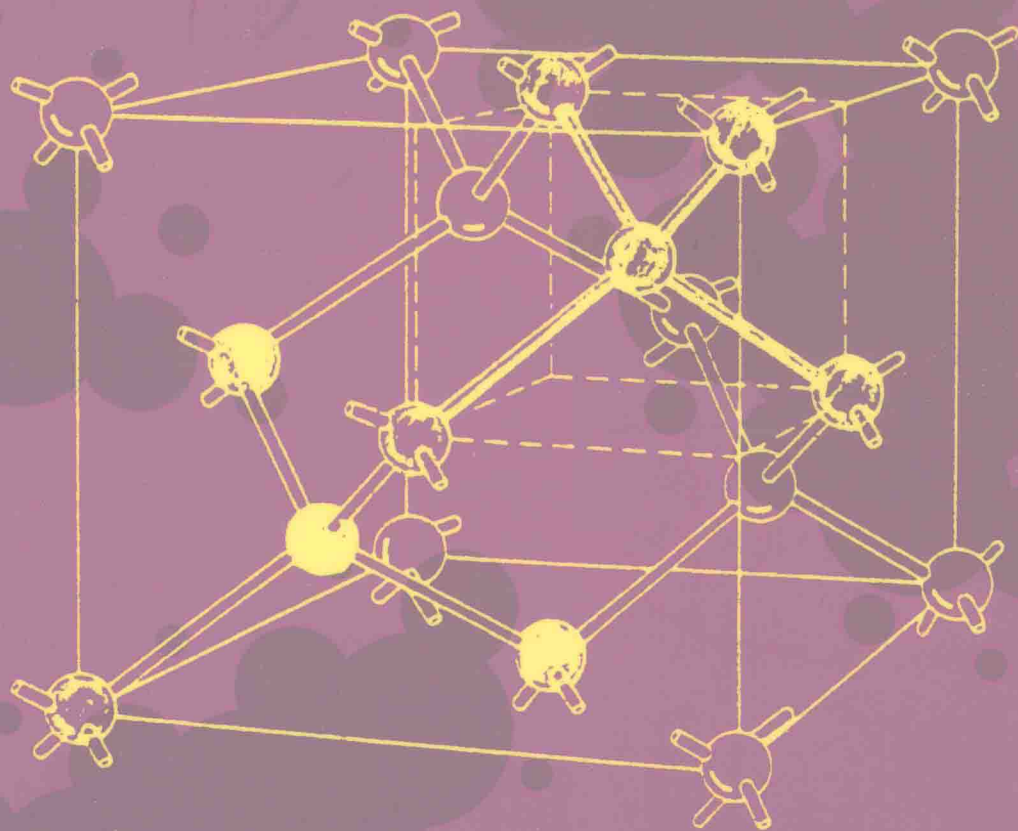


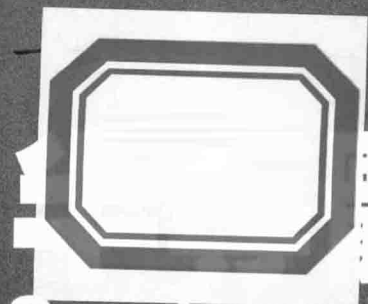
半導體工程精選

蔡淑慧 編著

Semiconductor Engineering

本書以有系統的方式，深入淺出地介紹目前半導體歷史回顧、物理及元件物理與製程整合所必須具備的基礎理論、重要觀念與方法、以及先進製造技術特別是奈米材料在最近發展快速之後，半導體的應用更加朝向奈米級的應用。



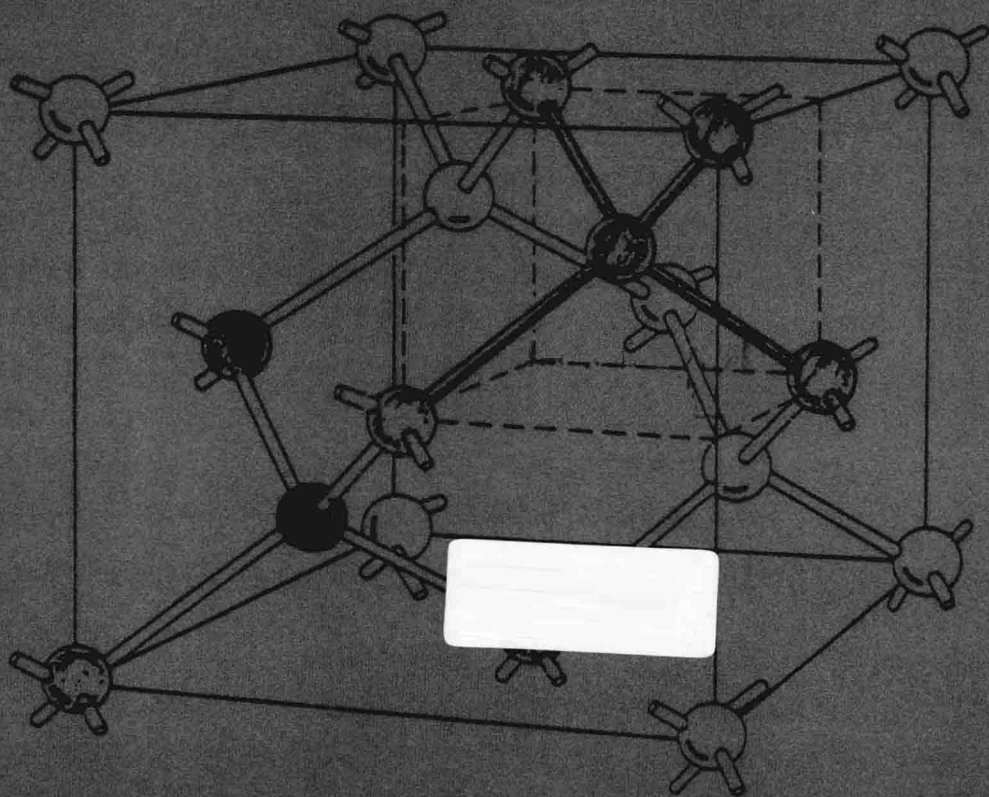


半導體工程精選

蔡淑慧 編著

Semiconductor Engineering

本書以有系統的方式，深入淺出地介紹目前半導體歷史回顧、物理及元件物理與製程整合所必須具備的基礎理論、重要觀念與方法、以及先進製造技術特別是奈米材料在最近發展快速之後，半導體的應用更加朝向奈米級的應用。



五南圖書出版公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

半導體工程 精選／蔡淑慧著．—初版．—臺北

市：五南，2007.10

面；公分．

I S B N: 978-957-11-4925-7 (平裝)

1.半導體 2.電子物理學

337.472

96016630



5D69

半導體工程 精選

編 著 — 蔡淑慧(375.2)

發行人 — 楊榮川

總編輯 — 龐君豪

主 編 — 穆文娟

責任編輯 — 蔡曉雯

文字編輯 — 施榮華

封面設計 — 簡愷立

出版者 — 五南圖書出版股份有限公司

地 址：106 台北市大安區和平東路二段 339 號 4 樓

電 話：(02)2705-5066 傳 真：(02)2706-6100

網 址：<http://www.wunan.com.tw>

電子郵件：wunan@wunan.com.tw

劃撥帳號：01068953

戶 名：五南圖書出版股份有限公司

台中市駐區辦公室 / 台中市中區中山路 6 號

電 話：(04)2223-0891 傳 真：(04)2223-3549

高雄市駐區辦公室 / 高雄市新興區中山一路 290 號

電 話：(07)2358-702 傳 真：(07)2350-236

法律顧問 得力商務律師事務所 張澤平律師

出版日期 2007 年 10 月初版一刷

定 價 新臺幣 320 元

序 言

本書以有系統的方式，深入淺出地介紹目前半導體歷史回顧、物理及元件物理與製程整合所必須具備的基礎理論、重要觀念與方法、以及先進製造技術特別是奈米材料在最近發展快速之後，半導體的應用更加朝向奈米級的應用。內容可分為十個章節：第一至第五章涵蓋目前主流半導體元件基本特性、包括了材料、結構、電磁場中的傳輸行為、以及光電特性。第六至第八章探討現代與先進的元件物理之原理及相關應用、包括了 MOS 結構、非晶型半導體、以及半導體多層結構。第九至第十章則討論以半導體元件為主的相關半導體製程與應用，包括了半導體長晶、長膜、以及元件製程。由於強調基本物理觀念與實用並重，且對於重要的觀念或關鍵技術均會清楚地交代，並盡可能以「雷達報報站」的補充解釋來幫助讀者理解與想像，以期收事半功倍之效。

本書宗旨主要是提供讀者在半導體製造工程上建立更完整的元件物理基礎上，進一步地介紹最新半導體元件的物理原理與其製程技術。它除了可作為電機電子工程、系統工程、應用物理、與材料工程領域的大學部高年級學生或研究生的教材，也可以作為半導體業界工程師的重要參考。適合基礎理工、電子訊息、半導體相關科系學生學習的教科用書，也可提供相關從業人員參考進修之用。

本書內容足以提供連續兩學期的半導體元件物理與製程技術的課程。若是一個一學期的課程，則教師可以使用第一章至第五章的內容來講授半導體基礎元件物理；下半學期可以使用第六章至第十章的內容來講授現代半導體元件的應用與製程技術。

目 錄

CHAPTER 1 半導體的歷史回顧

- 一、半導體簡介與歷史演進／ 2

CHAPTER 2 半導體的材料與結構特性

- 一、半導體的材料／ 8
- (一)元素半導體與化合物半導體／ 8
 - (二)奈米半導體／ 9
- 二、半導體的結構／ 10
- (一)晶體和非晶體——原子之大家族／ 10
 - (二)晶面和晶向——米勒指數／ 11
 - (三)金剛石結構 (diamond lattice) 和閃鋅礦結構 (Zincblende lattice) ／ 15
 - (四)III-V 族 GaAs 之結構分析與界面態模型／ 17

CHAPTER 3 半導體的電子結構與能隙理論

- 一、能隙的形成／ 24
- 二、金屬、絕緣體、半導體與費米能階 (Fermi level) ／ 28
- 三、內廩 (intrinsic) 半導體與外廩 (extrinsic) 半導體——不純物加入的影響／ 32
- (一)電洞 (Holes) 的概念與有效質量的意義／ 32
- 四、有效質量可由實驗上測得——迴旋加速器共振法 (cyclotron resonance) ／ 38
- (一)內廩半導體和外廩半導體的差別／ 41

CHAPTER 4 半導體中載流子在電場與磁場中的傳輸行為

- 一、電阻產生的原因／ 50
 - (一)晶格振動所致之載流子散射／ 53
 - (二)不純物所導致的載流子散射／ 54
 - (三)捕獲與再結合中心 (trap and recombination center) ／ 54
- 二、電阻的量測／ 55
 - (一)定電流測電壓方法／ 55
 - (二)單臂惠斯通電橋方法／ 56
 - (三)雙臂惠斯通電橋方法／ 56
 - (四)開爾文四線連接測試技術／ 57
 - (五)四點探針量測法／ 58
- 三、載流子在磁場中的作用—霍爾效應 (Hall effect) ／ 61

CHAPTER 5 半導體的光學性質與光電效應

- 一、半導體的光電現象／ 68
 - (一)半導體的光吸收／ 68
 - (二)反射率和透射率／ 71
- 二、本質吸收 (intrinsic absorption) ／ 73
 - (一)直接躍遷／ 73
 - (二)間接躍遷／ 74
- 三、其他吸收／ 76
 - (一)激子吸收／ 76
 - (二)自由載子的吸收／ 76
 - (三)雜質的吸收／ 77
 - (四)晶格振動吸收／ 78
- 四、半導體的光電導／ 78
 - (一)光電導的現象／ 78
- 五、半導體的光生伏特效應／ 81

- (一) 光生伏特效應 / 81
- (二) 光電池與太陽光電池 / 82

CHAPTER 6 半導體的同質結、異質結及 MOS 結構

- 一、非平衡載流子 / 88
 - (一) 非平衡載流子的復合與生命期 τ / 89
 - (二) 非平衡載流子的擴散與漂移 / 89
- 二、同質結——p-n 結 (p-n Junction) / 95
 - (一) 平衡時的 p-n 結位能障 / 96
 - (二) p-n 結的順向注入 / 97
 - (三) p-n 結的逆向抽取 / 99
 - (四) p-n 結的整流作用 (rectification) 與載流子之注入 (injection) / 101
 - (五) p-n 結的電容 / 101
 - (六) p-n 結的擊穿 (break down) 及隧道結 / 106
- 三、異質結 (heterogeneous junction) / 109
- 四、MOS 結構 (Metal-Oxide-Semi-conductor Structure) / 112
 - (一) 理想的 MOS 結構的電容－電壓特性 / 115

CHAPTER 7 非晶型半導體

- 一、非晶型物質 / 126
- 二、非晶型物質的基本能隙模型 / 128
- 三、非晶型物質在半導體元件上的應用 / 130
 - (一) 摻雜的效應 / 131
 - (二) 直流電導 / 131
 - (三) 非晶態半導體中的缺陷 / 134

CHAPTER 8 半導體的表面、界面與多層結構

- 一、半導體表面結構 / 136

- (一)表面弛豫 (surface relaxation) / 136
- (二)表面重構 (surface reconstruction) / 138
- (三)台階表面 (stepped surface) / 139
- (四)吸附表面 / 140
- 二、金屬與半導體界面 / 140
 - (一)蕭特基位能障的原因 / 140
 - (二)歐姆接觸 (Ohmic contact) / 143
- 三、矽與二氧化矽界面 / 144
- 四、半導體常見的吸附 / 148
- 五、半導體的多層結構——超晶格 / 150
 - (一)超晶格的結構與物理功能 / 150
 - (二)超晶格和量子阱材料的應用 / 154

CHAPTER 9 半導體長晶與薄膜製程

- 一、晶體成長製程 / 158
 - (一)半導體晶體生長的方法 / 158
 - (二)區域精煉與浮區成長 (Zone refining, floating zone) / 160
- 二、半導體薄膜的製程方法 / 164
 - (一)真空蒸發鍍膜法 (也就是物理氣相沈積法
: Physical vapor deposition) / 164
 - (二)特殊蒸發法——幾種比較便宜的方法 / 172
 - (三)濺射鍍膜法 (sputtering) / 173
 - (四)化學氣相沈積法 (CVD) / 177

CHAPTER 10 半導體元件製程

- 一、前言 / 190
- 二、氧化物的形成 / 191
 - (一)二氧化矽的結構與性質 / 192
 - (二)氧化的方法 / 193

(三)熱氧化速率的因素／ 198

(四) SiO_2 在元件上的作用／ 199

三、摻雜／ 203

(一)熱擴散／ 203

(二)熱擴散的方法／ 208

(三)離子注入法／ 211

四、光微影技術 (lithography) ／ 219

(一)圖形轉移／ 220

(二)圖形刻蝕／ 224

CHAPTER 1

半導體的歷史回顧

一、半導體簡介與歷史演進

一、半導體簡介與歷史演進

導電能力介於導體與絕緣體之間的物質稱為半導體。半導體材料是一種具有半導體性能、可用來製作半導體元件和積體電路的電子材料，常用的矽晶半導體其電阻係數在 $0.001 \sim 1000$ 歐姆-釐米範圍內。半導體材料的電學性質對光、熱、電、磁等外界因素的變化十分敏感，在半導體材料中摻入少量雜質就可以控制這類材料的電導率。

正是利用半導體材料的這些性質，才製造出功能多樣的半導體元件。半導體材料是半導體工業的基礎，它的發展對半導體技術的發展有極大的影響。半導體材料按化學成分和內部結構，大致可分為以下幾類：

1. 元素半導體有鍺、矽、硒、硼、碲、銻等。50 年代，鍺在半導體中佔主導地位，但鍺半導體元件的耐高溫 and 抗輻射性能較差，到 60 年代後期逐漸被矽材料取代。用矽製造的半導體元件，耐高溫 and 抗輻射性能較好，特別適宜製作大功率元件。因此，矽已成為應用最多的一種半導體材料，目前的積體電路大多數是用矽材料製造的。

2. 化合物半導體由兩種或兩種以上的元素化合而成的半導體材料。它的種類很多，重要的有砷化鎵、磷化銦、銻化銦、碳化矽、硫化鎘及鎵砷矽等。其中砷化鎵是製造微波元件和積體電路的重要材料。碳化矽由於其抗輻射能力強、耐高溫 and 化學穩定性好，在航太技術領域有著廣泛的應用。

3. 非晶形半導體材料用作半導體的玻璃是一種非晶體無定形半導體材料，分為氧化物玻璃和非氧化物玻璃兩種。這類材料具有良好的開關、記憶特性和很強的抗輻射能力，主要用來製造閾值開關、記憶開關和固體顯示元件。當今熱門的能源材料——太陽能電池，很多都是採用非晶形半導體材料所製作的。

4. 有機半導體材料。已知的有機半導體材料有幾十種，包括萘、蒽、聚丙烯腈、酞菁和一些芳香族化合物等，但目前尚未得到應用。

人類的文明演進與材料之發展，自古以來就是息息相關。從上古的石器時

代、銅器時代……到近四分之一個世紀以來，進步最快、影響最深遠的，莫過於半導體材料了，因而使得人類堂堂進入「矽」器時代（半導體元件中用的最多的是矽材料）。我們每天在家裡或外面所接觸到的電器設備，裡面都是使用半導體元件製成，但是通常被藏在黑盒子裡，以至於落到「吃過豬肉卻不曾看過豬走路」的局面。本書希望讀者能一窺黑盒子裡的秘密，了解半導體神通廣大的功能與奇妙的特性。在往後的幾章，半導體的特性、元件製作與應用將有很詳細的解說。

- 西元 1833 年—著名的實驗物理學家法拉第 (Faraday)，觀察到硫化銀的電阻率隨著溫度上升而減少（稱為負溫度係數），這是第一次觀察到半導體的基本性質之一，與一般金屬的正溫度係數（電阻率隨著溫度上升而上升）相反。
- 西元 1873 年—史密斯 (Smith) 以光照射 Se 上時，電阻會變小，發現了半導體光電導的特性。
- 西元 1879 年—霍爾效應 (Hall effect) 的發現，可以用來確定在半導體中載流子濃度與遷移率 (mobility)，進而發現有正載流子且遷移率比正離子大，而提出電洞 (hole) 作為正電荷載流子之圖像。
- 西元 1906~1926 年—矽 (Si) 和鍺 (Ge) 開始被用於製作半導體整流元件。
- 西元 1956 年—巴丁 (J. Bardeen)、布拉坦 (W. H. Brattain) 和薛克利 (W. B. Shockley) 因為研究半導體及電晶體效應而獲得諾貝爾獎。在這期間半導體的固態能隙理論也已逐漸發展完成。
- 西元 1958 年—貝爾實驗室 (Bell Lab) 的科學家利用 Si 作出矽平面式的電晶體，後來的德州儀器 (T. I.) 公司和費爾契德 (Fairchild) 把電晶體、電阻、電容放在一個小的矽晶片上 (Si wafer) 構成整個電路或系統，為積體電路之先驅 (Integrated Circuit, 簡稱 IC)。
- 到了 1970 年代，積體電路的製造技術漸漸成熟，擁有 100 個、1,000 個甚至 10,000 個電晶體的積體電路便循序發展成功，而有小型 (SSI)、中型 (MSI)、大型 (LSI) 之別。1968 年執半導體工業牛耳的費契德

公司發生經營危機，公司內多位具有新穎構想的專家們乃另外組織 Intel 公司，從事大型積體電路產品的生產，於該年代成功生產 4 位元（4004）、8 位元（8080）次至於 16 位元（8086）的微處理機（micro-processor），開啟了所謂的微電腦時代。

- 西元 1970 年之後—貝爾實驗室（Bell Lab.）採用化合物半導體材料砷化鎵，利用其直接能隙（Direct bandgap）、發明了室溫半導體雷射，開創了光電通訊的新紀元。
- 而西元 1994 年時，台灣台積電的張忠謀董事長更率先催生全世界第一家半導體專業代工公司的出現（不生產自己產品，設計公司拿圖樣，請台灣積體電路公司生產），創新產業競賽、撼動競爭規則。台灣積體電路公司，更是讓台灣的半導體業首度在國際揚名，並帶動半導體產業朝向民生化的用途。

所以回顧歷史，半導體的應用隨著技術的改進，將持續有良好的發展。例如在積體元件的應用上，希望尺寸能愈作愈小，並隨著奈米科技的配合下，不但提供了基礎物理研究的新課題，更將帶領工業界製造在一顆晶粒上容納上億個元件成為可預見的事實。而半導體材料藉由改變元素半導體的幾何形狀（如多孔矽），或是非結晶狀態，或是尋找新的化合物半導體，都將在半導體的相關元件下，如偵測器、發光元件，或是太陽電池功率元件，提供了多樣性的選擇。

☀ 雷達報報站：莫爾定律

電腦計算能力提升的速度究竟有多快？西元 1964 年高登·莫爾先生（Gordon Moore），Intel 創辦人之一，提出他的觀察用來說明晶片進步的速度：「一片晶片上的電晶體數每 12 個月就會加倍，但是價格不變（在西元 1975 年調整成 18 個月）」，這項聞名的預測被稱之為莫爾定律（見圖 1-1），其後影響了電腦半導體產業發展三十多年，也帶動了全球文明的高速發展。

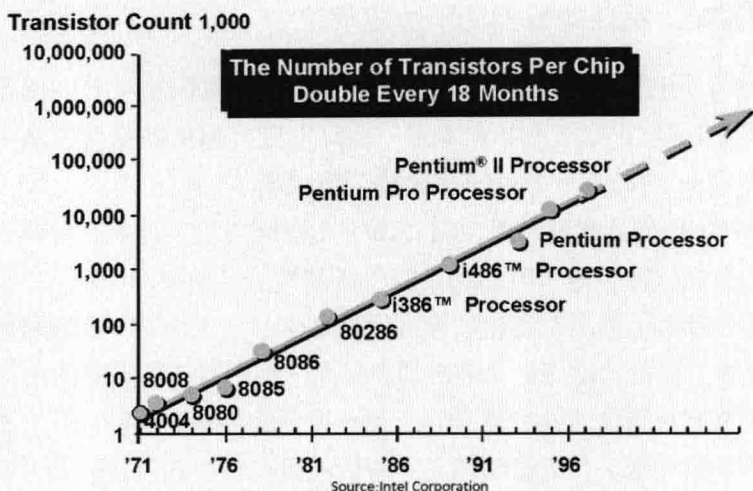


圖 1-1 莫爾定律的預測影響了電腦半導體晶片的發展

☀ 雷達報報站：積體電路

積體電路又叫集成電路，目前使用的範圍很廣，但大部分用在低功率元件上：一般高功率放大器還是以電晶體為主，故打開電腦盒子，你會看到許多長接腳，長方形或正方形，像黑色毛毛蟲的，就是它啦！積體電路的類別很多，從外殼材料上分，有金屬、塑料和陶瓷三種，從線路上來分，有邏輯電路和線性電路。為什麼會出現積體電路呢？因為人類的太空飛行、火箭、電腦等技術迅速發展後，迫切地需要解決體積與重量的問題，並且希望設備的可靠度提高。積體電路出現後，輕、薄、短、小的要求達到了，而且由於元件之間連接線大大地減少了，故線路的可靠性也大大地提高了。在民生方面，可作成很小的助聽器，手提的甚至掌上型的各種電子產品，例如手機、PDA 及筆記型電腦，甚至近來的生醫科技也拜積體電路之賜而大放異采。

☀ 雷達報報站：為什麼矽的使用比鍺多？

套句俗語「平平（台語）都是同一父母生，一個作官，另一個作流氓」。矽與鍺都是四價的元素半導體，為何先發展起來的鍺會先熟先爛（Soon ripe, soon rotten），被後來居上的矽取代呢？

西元 1960 年代的電晶體原以鍺（Ge）電晶體為主，但氧化鍺為水溶性，鍺的表面保護較困難，容易損傷而生成漏電流（leak current）；而矽（Si）可經高溫氧化形成二氧化矽表面保護層，且矽（Si）本身漏電流較小。除此之外，矽又比鍺便宜（地殼到處都是，可由石英岩提煉純化）。

但是近來因為高速元件的需求而出現一種矽鍺半導體（SiGe）。矽鍺為矽半導體加鍺元素，在高頻環境下，較矽晶具有較佳的低雜訊及低功率損耗優點；相較於砷化鎵（GaAs），矽鍺半導體有較優的高集積度、高電子傳導頻率，及製造良率較高的優勢；另外，矽鍺製程技術可與 CMOS 技術相容並整合，也可整合 FET 與 Bipolar。不過，矽鍺半導體其崩潰電壓（Breakdown Voltage）較低（低於 5V，一般的電子元件需要 15V）。就應用層面而言，矽鍺半導體可應用藍芽（Bluetooth）、功率放大器、行動電話、RF IC、SOC 或光纖骨幹網路 SONET 介面 IC。

CHAPTER 2

半導體的材料 與結構特性

- 一、半導體材料
- 二、半導體的結構

一、半導體的材料

(一)元素半導體與化合物半導體

前面提到了一些矽、鍺、砷化鎵等，事實上這些都是屬於半導體材料。半導體再細分，還可以分為元素半導體（Element Semiconductor）和化合物半導體（Compound Semiconductor）。矽、鍺是元素半導體，砷化鎵則屬於化合物半導體。化合物半導體有兩種形式：Ⅲ-V族半導體與Ⅱ-VI族半導體。前者是由元素周期表中ⅢA及ⅤA族的元素所組成，例如氮化鎵等；後者是由元素周期表中的ⅡB及ⅥA族的元素所組成，例如硒化鎘等。其他還有許多種，諸如Ⅳ-Ⅳ族，Ⅱ-VI族，Ⅳ-VI族，由下表列出的情況看來，將不同價數的元素組合而成的化合物半導體，似乎是可以以排列組合對每一個元素作用。如此一來經由排列組合，可得到一系列的Ⅲ-V族，Ⅱ-VI族，Ⅳ-VI族的化合物半導體。

表 2-1 元素與化合物半導體

Element	Ⅳ-Ⅳ Compounds	Ⅲ-V Compounds	Ⅱ-VI Compounds	Ⅱ-VI Compounds
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

註：摘自 S. M. SZE 之 Semiconductor devlces, p. 3