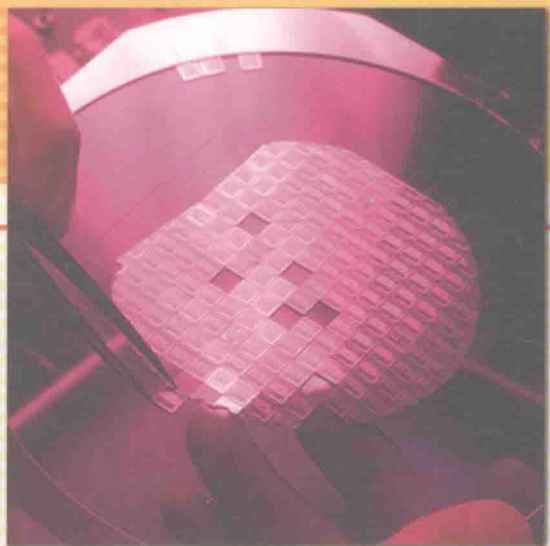


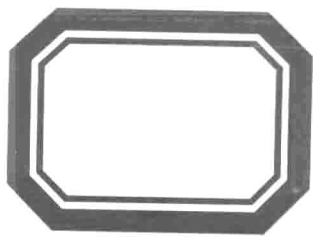
# 矽晶圓半導體材料技術

林明獻 編著



修訂版


 全華圖書股份有限公司 印行



# 晶圓半導體材料技術(修訂版)

---

林明獻 編著

 全華圖書股份有限公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

矽晶圓半導體材料技術 / 林明獻編著. -- 二版  
. -- 臺北縣土城市 : 全華圖書, 2007.09  
面 : 公分

ISBN 978-957-21-6017-6(精裝)

1. 半導體 2. 工程材料

448.65

96016729

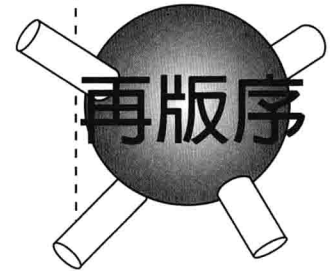
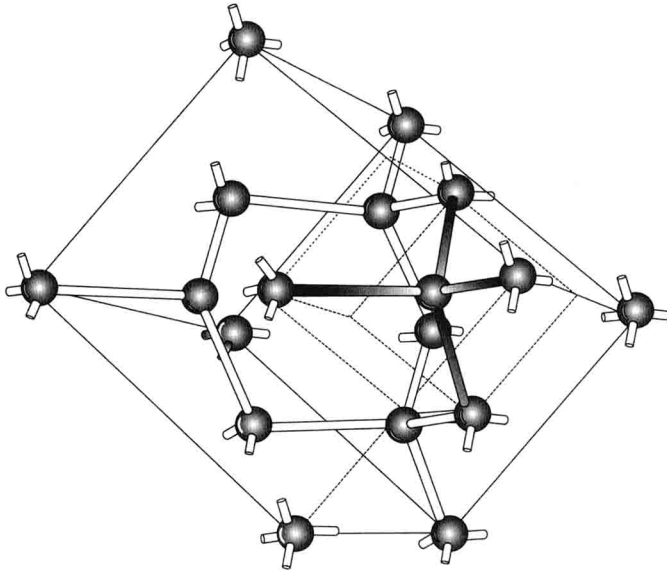
## 矽晶圓半導體材料技術(修訂版)

編 著 林明獻  
執行編輯 李佩璇  
發行人 陳本源  
出版者 全華圖書股份有限公司  
地 址 236 台北縣土城市忠義路 21 號  
電 話 ( 02 ) 2262-5666 (總機)  
傳 真 ( 02 ) 2262-8333  
郵政帳號 0100836-1 號  
印 刷 者 宏懋打字印刷股份有限公司  
圖書編號 0367271  
二版一刷 2007 年 12 月  
定 價 新台幣 620 元  
I S B N 978-957-21-6017-6

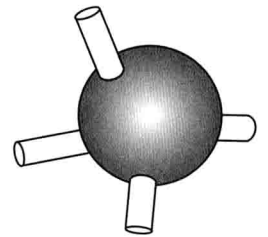
全華圖書  
www.chwa.com.tw  
book@ms1.chwa.com.tw

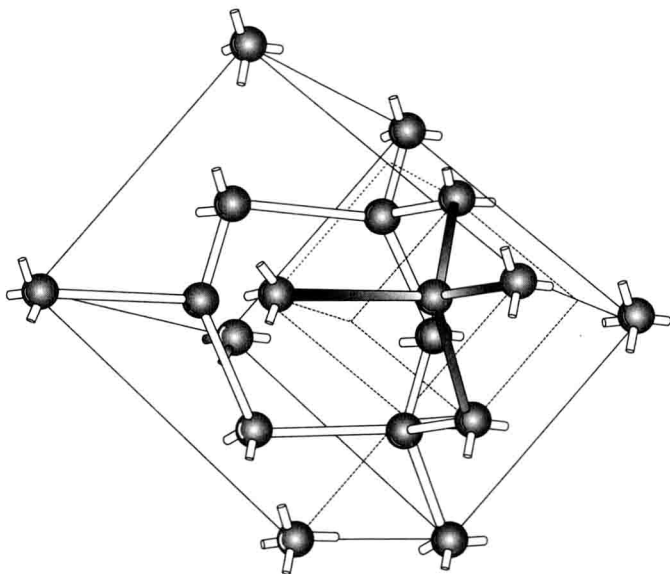
全華科技網 OpenTech  
www.opentech.com.tw

**有著作權 · 侵害必究**



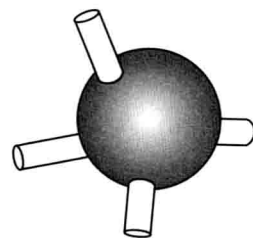
時距第一版的發行已近七年了，在這之間整個半導體的發展相當快速，線寬度也已由當年的 0.25 微米演進到今日的 65 奈米，距 45 奈米的量產已不遠了。而矽晶圓產業也由 200mm 演進到 300mm，而且在許多技術及產品特性上也推陳出新。筆者回顧當年第一版的匆促付梓，發現除了有許多的印刷錯誤外，在一些內容上也有不足之處。許多讀者也不時期盼及督促筆者儘速修訂內容，以趕上半導體一日千里的速度。筆者雖然心繫著修訂改版之事，但因工作上的繁忙，使得修訂的進度延宕多年。最近總算花了數月的時間，專心地把修訂的工作完成，除了內容的修正補強之外，也增加了數個新的章節。期盼本書的修訂，更能對整個台灣矽晶圓半導體產業帶來些許承先啓後的教育責任。





「矽」一直被視為是半導體工業最重要的材料，而目前積體電路技術也已邁入 0.18 微米以下的時代，這使得 IC 製程的良率與產品品質更加地受到矽晶圓性質的影響。近十年來國內積體電路工業的蓬勃發展，在技術上幾乎與世界水準同步。唯過去 IC 用的矽晶圓一直是仰賴國外的進口，直到中德電子材料公司於 1996 年 2 月生產出國內第一根 8 吋矽晶棒之後，始為我國的矽晶圓材料產業開啓了新紀元。國內外的大專院校向來難以培養出矽晶圓材料的專業人材，這一來是因為從事矽晶圓材料研究(尤其是矽單晶生長技術)的經費過於龐大，因此從事這方面研究的學校與師資並不多見；再者國內仿間有關這方面的教科書或參考書可說是付之厥如，即使在國外也僅有「Semiconductor Silicon Crystal Technology (F. Shimura 著)」及「Handbook of Semiconductor Silicon Technology (W.C. O'Mara 等編著)」等兩本寫於 1980 年代且資料老舊的書籍。

筆者有幸於美國威斯康辛大學攻讀材料博士學位期間，在 Dr. S. Kou 的指導下從事單晶生長技術的學術研究，開

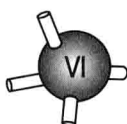


始全面的接觸有關矽晶圓材料的知識。畢業後在服務於美國 Siltec Silicon 公司(現已改名為 Mitsubishi-American)期間，因為負責 8 吋矽晶生長技術之研究開發工作，所以更廣泛地涉獵期刊上的矽晶生長技術與相關理論。後來在李慶超先生與薛銀陞博士的延聘之下，返國服務於中德電子，更讓我有機會與 MEMC 公司世界頂尖的專家一起從事最先進的矽晶圓技術與產品之開發工作，對我個人在矽晶圓材料知識上之獲益不少。

由於有感於國內有關矽晶圓材料技術資料的匱乏，使得許多有心鑽研此一領域的學生或工程人員，苦無一有系統的專業書籍可供入門學習與參考之用；再者我也深信從事半導體元件製造與研發的工程人員，必須具備對「矽晶圓」材料之基本性質的瞭解，才能更進一步瞭解元件的特性。因此在愛妻的鼓勵之下，1998 年 4 月我開始投入這本書的寫作歲月，希望藉由本書的發行，把個人這幾年來所累積對矽晶圓材料技術的有限知識，提供給從業及在學的先進與後輩們參考，並激發更多的優秀專業人材，加入矽晶圓材料技術本土化與知識傳承的行列。

本書的服務對象，著重於大專程度以上的在學學生，以及從事半導體產業相關領域的工程師及專業人員。因此在內容上採深入淺出的方式，同時涵括了學理介紹與工程應用兩方面。對於非工科背景的讀者，在研讀本書時，應著重於基本的物化概念與矽晶圓材料的製造流程，不須執著於繁雜數學公式之推導。而對於有心更深入研究矽晶圓材料的讀者，則可參考每一章節末所附的參考資料。

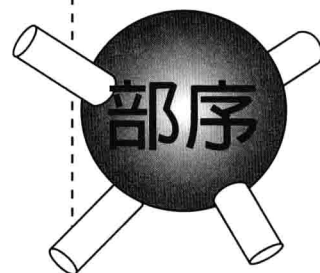
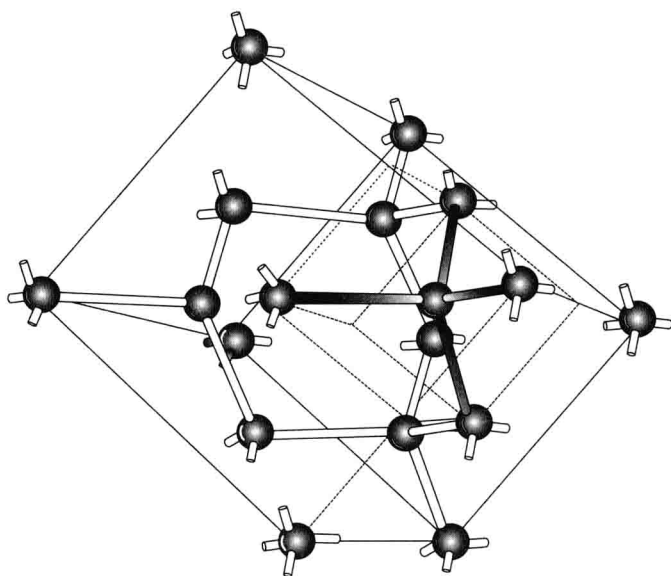
在本書的寫作期間，我受到不少朋友、同事、家人的鼓勵與提供寶貴的意見。然而要感謝的人太多，在此實在無法一一地列出他們的姓名，僅列出部份提供我寫作資料與參與初稿審校的中德同事與友人。他們計有：薛銀陞博士、林國隆先生、盧哲偉博士、魏文晴博士、顏黃實先生、蘇鈺峰先生、林瑞文先生、曾弘毅先生、葉聲威先生、顏枝松先生、黃俊榮先生、段一帆先生、張家彰先生、劉恩慈先生、朱恕白先生、蔡政焜先生、陳平先生、陳國憲先生、黃柏山先生、章婉瑩小姐、劉緒東先生、潘敏學博士及 Dr. D.M. Lee 等人。此外，必須感謝中德電子的李慶超先生允許我使用不少來自公司的資源。對於其他朋友的鼓勵及全



華科技圖書公司的全力協助，筆者藉此予以一併致謝。最後，特別要感謝的是我的妻子(謝美鳳)，沒有她的鼓勵，就不會有這本書的問世；也要感謝她體諒我在本書的寫作期間對家庭的疏忽。因此僅將本書的成就獻給我摯愛的妻子、雙親以及我們即將出世的千禧寶寶。

林明欽 於新竹

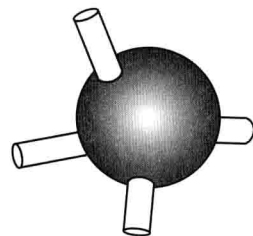




「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

由於矽晶圓材料是半導體工業的基礎，因此從事半導體領域之學術研究與工程人員，都必須深入的瞭解矽晶圓的基本性質與製造過程。本書內容上採深入淺出的方式敘述，除了介紹矽晶圓工業的歷史演進與產業現況之外，尚包含了以下單元：矽晶的基本性質、多晶矽的製造技術、單晶生長、矽晶缺陷、矽晶之加工成型、性質檢測等單元。作者將本書的重點放在矽晶圓製造流程的介紹上。適用於對矽晶圓半導體材料技術有興趣之讀者及相關從業人員。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。





## 相關叢書介紹

書號：00251  
書名：電子材料  
編著：傅勝利  
25K/187 頁/125 元

書號：03391  
書名：VLSI 製造技術  
編譯：陳秋雲  
20K/200 頁/200 元

書號：0342701  
書名：半導體製造裝置用語辭典  
(修訂版)  
編譯：孫清華  
20K/792 頁/590 元

書號：03612  
書名：半導體封裝工程  
編譯：郭嘉龍  
20K/536 頁/490 元

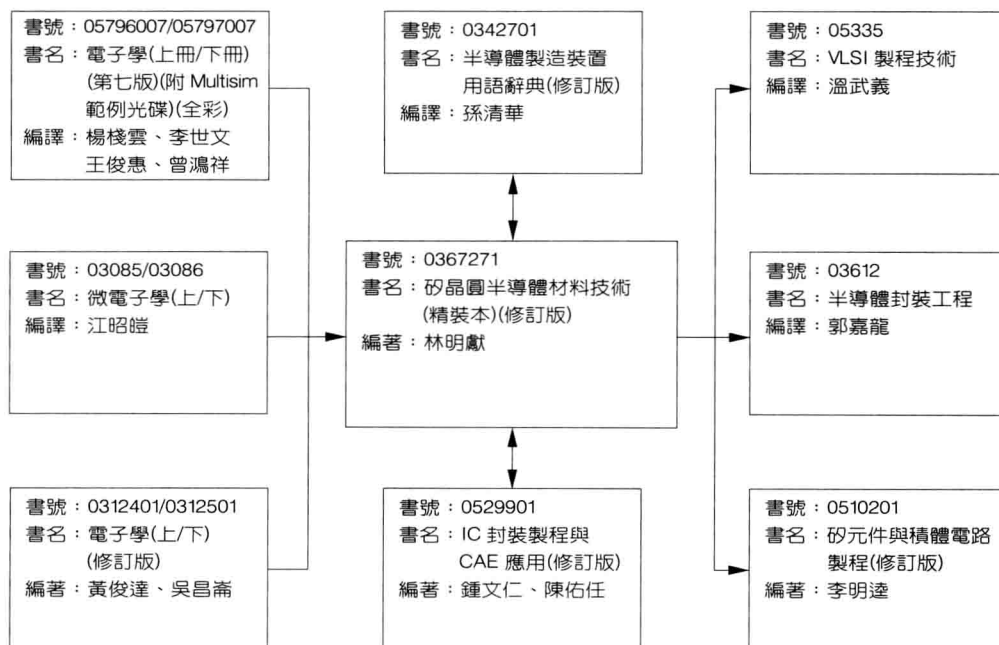
書號：05759  
書名：C/C++ 之 VLSI 設計  
編譯：溫榮弘  
20K/216 頁/280 元

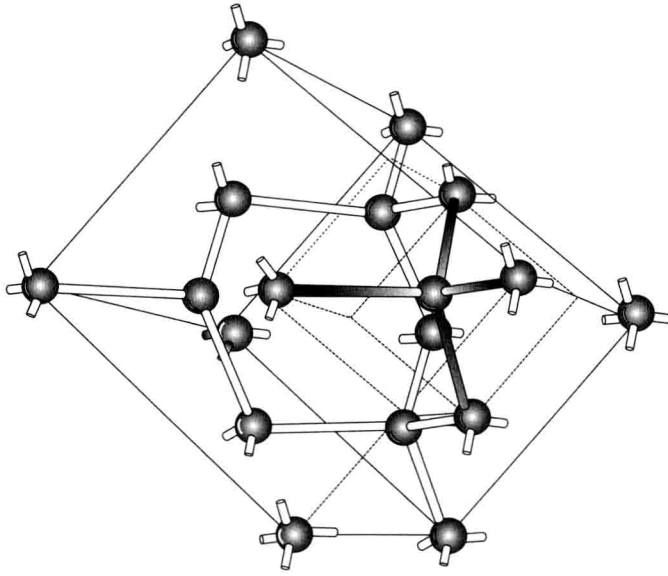
書號：0309903  
書名：VLSI 概論(修訂三版)  
編著：謝永瑞  
20K/608 頁/480 元

書號：05335  
書名：VLSI 製程技術  
編譯：溫武義  
20K/184 頁/220 元

◎上列書價若有變動，請以最新定價為準。

## 流程圖





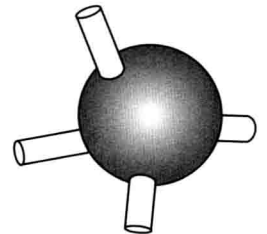
**1** 緒 論

**2** 矽晶的性質

第 <b>1</b> 節	結晶性質	2-3
第 <b>2</b> 節	半導體物理與矽晶的電性	2-35
第 <b>3</b> 節	矽的光學性質	2-55
第 <b>4</b> 節	矽的熱性質	2-62
第 <b>5</b> 節	矽的機械性質	2-68

**3** 多晶矽原料的生產技術

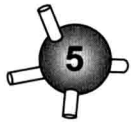
第 <b>1</b> 節	塊狀多晶矽製造技術-Simens 方法	3-3
第 <b>2</b> 節	塊狀多晶矽製造技術-ASiMi 方法	3-12
第 <b>3</b> 節	粒狀多晶矽製造技術	3-18





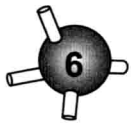
## 單晶生長

前 言	4-1
第 1 節 單晶生長理論	4-3
第 2 節 CZ 矽晶生長法(Czochralski Pulling)	4-29
第 3 節 MCZ 矽單晶生長法	4-77
第 4 節 CCZ 矽單晶生長法	4-86
第 5 節 FZ 矽單晶生長法	4-97
第 6 節 矽磊晶生長技術	4-115



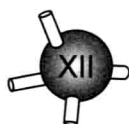
## 矽晶圓缺陷

第 1 節 CZ 矽晶的點缺陷與微缺陷	5-8
第 2 節 氧析出物(Oxygen Precipitation)	5-36
第 3 節 OISF(Oxidation Induced Stacking Faults)	5-64



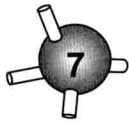
## 矽晶圓之加工成型

第 1 節 切斷(Cropping)	6-4
第 2 節 外徑磨削(Grinding)	6-12
第 3 節 方位指定加工－平邊與 V-型槽 (Flat & Notch Grinding)	6-15
第 4 節 切片(Slicing)	6-19
第 5 節 圓邊(Edge Profiling)	6-27
第 6 節 研磨(Lapping)	6-30
第 7 節 蝕刻(Etching)	6-37
第 8 節 拋光(Polishing)	6-44
第 9 節 清洗(Cleaning)	6-56



第 10 節 雷射印碼(Laser Marking) 6-71

第 11 節 矽晶圓的背面處理 6-83



## 7 矽晶圓性質之檢驗

第 1 節 PN 判定 7-3

第 2 節 電阻量測 7-6

第 3 節 結晶軸方向檢定 7-15

第 4 節 氧濃度的測定 7-22

第 5 節 Lifetime 量測技術 7-36

第 6 節 晶圓缺陷檢驗與超微量分析技術 7-53

第 7 節 晶圓表面微粒之量測 7-83

第 8 節 金屬雜質之量測 7-88

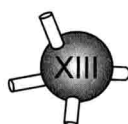
第 9 節 平坦度之量測 7-93

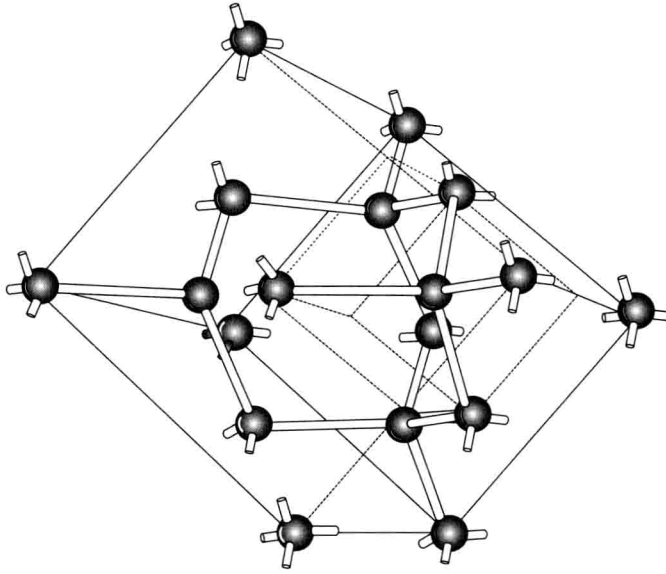
附錄 A 晶格幾何學

附錄 B 基本常數

附錄 C 矽的基本性質

附錄 D 矽晶圓材料及半導體工業常用名詞之解釋

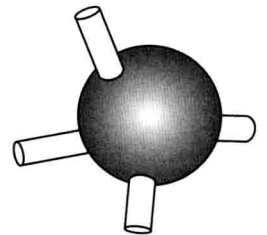
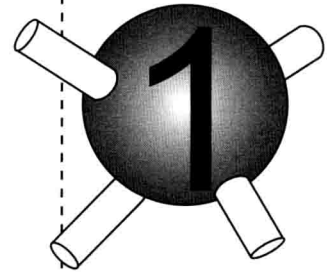


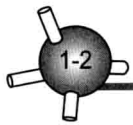


## 緒論

### 一、半導體工業的演進

矽是地表中含量第二豐富的元素，它通常以化合物的型態存在於自然界中，例如：氧化矽(silica)或矽酸鹽(silicate)。這些化合物形成不同型態的岩石及礦物，例如：最常見的石英礦物即為氧化矽的一種型態。遠在石器時代的人類已開始使用矽的氧化物來做成建築物、器皿及武器，是除了衣物、食物以外賴以維生自衛的最重要生存物質。因此甚至在 18 世紀末以前，silica 還被當成一種元素，直到 1787 年 silica 才被 Lavoisier 更正為一種氧化物<sup>(1)</sup>。而在 19 世紀中期，結晶形態的矽才被成功的取得。在二十世紀初時，世人才發現矽具有半導體的性質。這些性質包括電阻率隨著溫度的增加而遞減、光電性(光線使得矽的電阻率減小)、熱電效應、Hall 效應、磁電效應、半導體與金屬接觸的整流效應等。





在 1874 年德國的 Fredinand Braun 發明了第一個固態電子元件：galena point-contact rectifier<sup>(2)</sup>。這種整流器元件曾被應用在雷達偵測器上，但隨後即被 20 世紀初發明的真空管整流器所取代。在第一次大戰之後，由於量子力學的發明，使得世人又再重新對固態電子元件之研究產生興趣，例如：1927 年 Grondahl 及 Geiger 發明氧化亞銅整流器<sup>(3)</sup>。這種氧化亞銅整流器是簡單地將銅片加熱到 1000°C 所產生的，它當時被用在電話傳輸系統的調幅器(modulator)之用途上。在 1931 年 Brattain 及 Becker 開始在貝爾實驗室研究氧化亞銅整流器，他們發現 Cu<sub>2</sub>O 的電流是靠受子中心(acceptor centers)所激發的帶正電電洞所傳輸的。同時期半導體理論也在加速的建立之中，例如：1930 年代的 Gudden 發現運用少量雜質來改變矽的導電性之觀念。

在第二次大戰期間，雷達偵測器(radar detector)一直被視為防空體系的重要武器<sup>(4-5)</sup>。這使得當時的英、德、美等軍事強國大量投入雷達技術的研究上，也因此衍生了很多相關的附屬技術，例如：半導體整流器。整流器在當時軍事上的用途包括混頻器(mixer)、直流復位器(direct-current restorer)及影像偵測器等。由於半導體整流器必需能夠處理高雷達頻率，矽與鍺乃成為唯一合適的材料。然而在當時由於高純度的鍺比矽容易取得，所以高品質的整流器通常是使用鍺當原料。

1947 年 12 月 23 日 Bardeen、Brattain 及 Shockley<sup>(6)</sup>等人於貝爾實驗室發明了電晶體(Transistor)，正式開啓了半導體時代的序幕。由於電晶體效應的發明，使得高純度與能夠均勻導電的晶體之需求，變得更加的急迫。在 1950 年，Teal 及 Little<sup>(7)</sup>兩人將 Czochralski<sup>(8)</sup>於 1917 年發明的拉晶方法(註：有關 CZ 法，請詳見本書第 4 章第 2 節)，應用在生長鍺及矽單晶上。這方法也成為現代生產高品質矽單晶的主要方法，在當時生長 1 吋直徑的矽晶棒已經算是相當大了。Teal 則持續致力於晶體生長技術的研發，因為他相信「單晶」材料可以製造出較好的電晶體，這種「相信」也在當他發現其生長出來的單晶之少數載子生命週期比多晶材料好時，得到證實。

之後，由於 1952 年 Pfann<sup>(9)</sup>發明了區融法(Zone Refining)大幅地改善材料的純化技術，使得商業化的電晶體也跟著於 1953 年問世了，不過由於鍺較佳的純度與低溫性質，所以當時大多的半導體公司大多使用鍺當電晶體的材料。直到 1954

年 Teal 才在美國德州儀器公司成功地開發出第 1 個矽電晶體<sup>(10)</sup>，順便一提的是，由於這項技術的突破，也使得德州儀器公司由一個在當時沒沒無聞的小公司，轉變成為半導體界的龍頭老大。

在矽電晶體的發明之後，半導體界仍致力於矽原料的純化上。雖然矽單晶已可利用 Czochralski 長晶法獲得，然而在 CZ 法中由於石英坩堝會受矽熔湯(silicon melt)的侵蝕，而產生氧污染的問題。於是為了獲得高純度的單晶棒，Henry Theurer 於 1956 年發明了浮融法(Float-Zone Technique)<sup>(11)</sup>。FZ 法因沒有使用容器來盛裝矽熔湯，所以不會有氧污染的問題。在這時期內，利用 CZ 及 FZ 法所生產的晶體雖為單晶，但差排(dislocation)卻往往會出現在晶體中。後來在 1958 年，Dash<sup>(5)</sup>發明了一種可以完全消除差排的方法(Dash Technique)。因為有這種產生零差排(Dislocation-free)的方法，才使得生長大尺寸晶棒成為可能。

在有了品質較佳的矽單晶之後，半導體界的發展重心，乃轉到發展擴散摻雜技術(diffusion-doped technology)上，以此技術製造電晶體，可以比早期的合金技術(junction transistor)達到更高動力與更高頻率。這種擴散摻雜技術也於 1954 年被用在製造大面積的二極體上<sup>(12)</sup>。

1958 年 Kilby 於德州儀器公司發明了積體電路<sup>(13)</sup>，奠定了資訊時代來臨的基礎。在不到 1 年內，Noyce 結合平面化技術(planar technology)及接合隔絕(junction isolation)技術，建立了現代 IC 結構的基本樣版<sup>(14)</sup>。自從第一代 IC 的問世之後，半導體業的發展可說是一日千里，晶片(chip)上的電子元件之密度與複雜性，也由 SSI (small-scale integration)、MSI (medium-scale integration)、LSI (large-scale integration)、VLSI (vary-large-scale integration)、一直增加到今日的 ULSI (ultra-large-scale integration)。而積體電路的應用範圍，也變得相當廣泛，如圖 1.1 所示。目前在元件線寬上，已邁入 65 奈米的世代，45 奈米以下的製程亦即將量產。隨著元件線寬的縮小，其對矽晶圓材料的品質要求也更加嚴格。

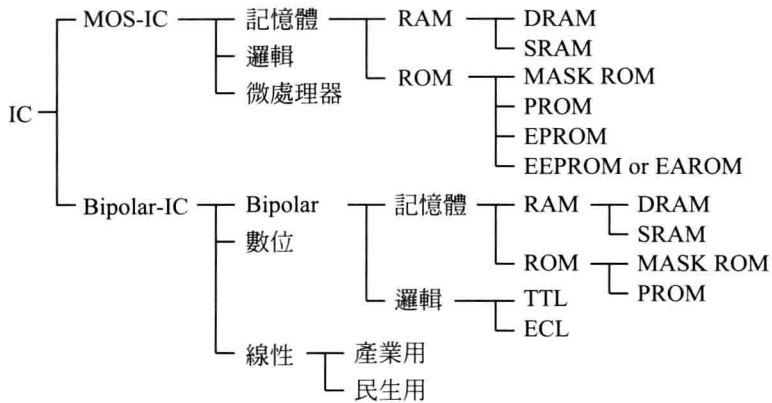
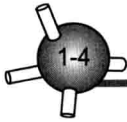


圖 1.1 積體電路電路的分類

## 二、矽晶材料的重要性

在 1950 年代初期以前，鍺是最普遍被使用在半導體工業的材料，但因為其具有較小的能隙(僅為 0.66eV)，使得鍺半導體的操作溫度僅能到達 90°C(因為在高溫時，leakage current 相當高)。鍺的另一個嚴重缺點是其無法在表面提供一穩定的鈍性氧化層，例如：二氧化鍺(GeO<sub>2</sub>)為水溶性且會在 800°C 左右的溫度自然分解<sup>(15)</sup>。反觀矽的能隙較大(1.12eV)，使得矽半導體的操作溫度可以高達 200°C<sup>(16)</sup>。再者矽晶表面可以形成一穩定的氧化層(SiO<sub>2</sub>)，這個性質使得矽在半導體的應用上遠優於鍺，因為氧化層可以被用在基本的積體電路架構中。此外在 1980 年代，半導體界也對 GaAs 的應用性產生極高的期待，因為 GaAs 比矽具有更高的電子移動率(electron mobility)，而且具有直接能隙(direct bandgap)之故。但因為高品質及大尺寸的 GaAs 不易獲得，終究無法取代矽晶材料在半導體業的地位。表 1.1 為鍺、矽、砷化鎵的基本性質之比較。



表 1.1 鍺、矽、砷化鎵的基本性質之比較

性質	Ge	Si	GaAs
Atoms/cm <sup>3</sup>	4.42×10 <sup>22</sup>	5.0×10 <sup>22</sup>	2.21×10 <sup>22</sup>
原子或分子重	72.6	28.08	144.63
密度(g/cm <sup>3</sup> )	5.32	2.33	5.32
晶體結構	Diamond	Diamond	Zinc blende
熔點(°C)	937	1412	1238
介電常數	16	11.8	10.9
有效能階密度			
導帶 $N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	1.04×10 <sup>19</sup>	2.8×10 <sup>19</sup>	4.7×10 <sup>17</sup>
價帶 $N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	6.1×10 <sup>18</sup>	1.04×10 <sup>19</sup>	7.0×10 <sup>18</sup>
電子親和力(V)	4.13	4.01	4.07
能隙(eV)	0.68	1.12	1.43
本質載子密度 $n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	2.5×10 <sup>13</sup>	1.5×10 <sup>10</sup>	1.79×10 <sup>6</sup>
晶格常數(Å)	5.658	5.431	5.654
有效質量			
電子	$m_e = 0.22m$ , $m_e^* = 0.12m$	$m_e = 0.22m$ , $m_e^* = 0.12m$	0.068m
電洞	$m_h = 0.31m$ , $m_h^* = 0.23m$	$m_h = 0.56m$ , $m_h^* = 0.38m$	0.56m
移動率(mobility)			
電子(cm <sup>2</sup> /V-s)	3900	1350	8600
電洞(cm <sup>2</sup> /V-s)	1900	480	250
導熱係數(W/cm-°C)	0.6	1.5	0.8
比熱(J/g°C)	0.31	0.7	0.35
線性熱膨脹係數(°C <sup>-1</sup> )	5.8×10 <sup>-6</sup>	2.6×10 <sup>-6</sup>	6.86×10 <sup>-6</sup>
少數載子生命週期(sec)	10 <sup>-3</sup>	2.5×1 <sup>-3</sup>	~10 <sup>-8</sup>