

高速寬頻網路半導體元件—— 矽鍺元件及其製程介紹

楊宗煒* 張翼**

交通大學材料科學與工程研究所

*博士班研究生 **教授

摘要

由於矽鍺 (SiGe) 材料與矽鍺電雙極電晶體 (SiGe HBTs) 技術已經成熟且進入生產階段，因此在無線通訊及光纖通訊、高速寬頻網路應用上，矽鍺半導體積體電路已經是市場上一種重要的解決方案。在無線高速寬頻網路應用方面，SiGe HBT 能在高頻操作下，提供優異微波特性，其效能不僅超越矽(Si)元件技術，更挑戰著目前執牛耳地位的III-V族化合物半導體元件。在光纖通訊方面，SiGe已成功佔有OC-192 (10Gbps) 之市場，更進而展現使用在OC-768(40Gbps)市場之可行性，此外SiGe IC可整合不同功能電路於同一晶片上 形成系統晶片(System-on-a-chip, SoC)。在SoC的趨勢下，整合將是無線寬頻網路未來主要的發展方向。因此就製造成本及系統整合性而言，矽鍺元件說是高速寬頻網路半導體元件之必然趨勢一點也不為過。

關鍵詞

矽鍺(SiGe)；矽鍺電雙極電晶體(SiGe HBTs)；系統晶片(SoC)；寬頻網路(Broad Band Internet)

前言

近年來網際網路的蓬勃發展帶動對寬頻網路的需求，各大電信公司無不加強通訊自動化，進而鋪設光纖骨幹拓展寬頻服務。而隨著寬頻網路應用領域的拓展，化合物半導體材料 (SiGe、GaAs、InP)再次引起了眾人的

注意；由於化合物半導體相較於傳統的矽材料，無論在電子移動率、高頻功率耗損、雜訊等特性上都具有明顯的優勢，使其逐漸成為網路半導體領域中的主流材料。在網路半導體中最重要的是極速的追求，唯有不斷地追求極速才是保持領先的不二法門。然而高速化固然是業界共同追求的目

標，卻得配合低價化才能兼具商品化或實用化的價值。

自1998年IBM宣佈SiGe將邁入商業量產化之後，立刻吸引十餘家業者跟進。SiGe最大的特色是可在CMOS的基礎下發展，直接運用現行矽材料的晶圓廠進行研發及生產，開發費用和投資設備費用可因此大幅節制。相對地，GaAs、InP等高速元件製程必須完全自行形成一獨立開發和生產的體系，元件成本較難大幅降低。只要SiGe IC在功能上能追上GaAs IC產品製程，GaAs在成本上勢必無法與SiGe競爭。IBM在SiGe的發展已成為業界的標準，2001年SiGe HBT的截止頻率(fT)突破200GHz，是過去的2倍，依經驗法則，光纖通訊IC的傳送速度是截止頻率的1/3~1/4，故IBM此一水準，應可使用在40Gbps光纖通訊系統的元件上，並進逼GaAs和InP元件。目前先進國家業者正積極進行以複合物半導體元件為主之OC-768 (40Gbps) 晶片之發展，如Vitesse與Inphi兩家公司正在發展採用磷化銦 (InP) 製程為主之OC-768晶片，而AMCC與IBM兩家公司則發展採用矽鍺 (SiGe)製程為主之OC-768晶片，這些產品預計將在2003年問世。

SiGe的崛起應與光纖息息相關，目前10Gbps的OC-192系統已逐漸邁入光纖通訊主流市場，未來可望再擴展延伸至OC-768 40Gbps之系統，而10Gbps之系統目前則以SiGe IC為主。

除此之外，無線通訊領域上，SiGe也有很好的發揮機會，在WLAN和行動電話應用上，使用SiGe IC除了提高系統功能外，並可將Base Band及RF IC晶片功能整合。雖然SiGe具備相當的潛在優勢，可以威脅GaAs和InP等傳統III-V族製程IC元件，儘管市場性良好，但技術上仍有相當門檻，因此目前SiGe的開發大半集中在歐美，尤其以美國為最多，如ADI、Intersil、Maxim和AMCC公司等，皆全力邁入SiGe IC生產。而掌握全球八成GaAs和InP市場的日本業者，對SiGe的開發反應較為冷淡，也對現行SiGe業者聲稱的SiGe卓越性能，表示懷疑。以手機用功率放大器為例，欲達20dBm以上之功率輸出，SiGe似乎力有未逮，不如GaAs游刃有餘。40Gbps以上的超高速IC目前亦以GaAs IC為主；而調變器驅動IC，其操作電壓為3V~5V，SiGe亦不容易達成。但SiGe發展的時間畢竟短淺，因此其IC特性未來仍有突破的空間。本文將對矽鍺元件及其製程做一詳細的介紹。

材料特性及異質結構

目前寬頻網路IC最熱門的仍以矽鍺、磷化銦，以及砷化鎵等半導體材料為主，對於這些不同材料之物理性質及應用特性，我們以表一來做比較：過去由於矽的電子遷移率較低，大半應用在1GHz以下的頻率，但隨著Si IC製程之改進，1800 MHz等頻率所

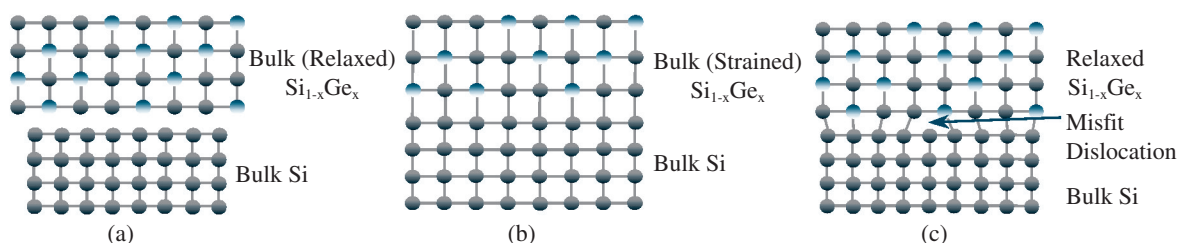
使用的RF IC，除功率放大器以砷化鎵為主要材料外，其他功能之IC也多以Si IC為主，因此不少10GHz 以下之IC如：1.8GHz DCS 1800及 2.4GHz WLAN使用之IC，慢慢為SiGe IC所取代。在光纖通訊，SiGe IC可整合RF IC與基頻電路於同一晶片上 形成系統晶片(System-on-a-chip, SoC)，在SoC的趨勢下，整合亦是無線通訊統及寬頻網路未來主要的發展方向，而SiGe因為採用了BiCMOS製程，可以輕易地整

合類比與數位電路及RF IC，故具備了高整合度的優勢，因此在此二領域之應用佔盡優勢；此外，由於Si材料較為便宜、製程技術較成熟，因此製程上與Si IC製程大同小異的SiGe，也可以利用其低成本的優勢進行生產；因此矽鍺 IC 成為眾人相當看好的寬頻網路技術。

圖一為矽鍺磊晶成長於矽基板上的示意圖。由於鍺原子的晶格常數較矽原子大4.2%，所以在矽基板上成長

表一 矽鍺、磷化銦及砷化鎵等半導體材料的特性

	矽鍺 (SiGe)	磷化銦 (InP)	砷化鎵 (GaAs)
電子遷移率	Medium	Medium-High	High
高頻應用	Good	Excellent	Excellent
高溫操作	Poor	Good	Good
抗輻射性	Medium-High	High	High
材料安全性	Safe	Poisonous	Poisonous
製程技術	Maturing	Maturing	Maturing
整合程度	High	Low	Low
成本	Low-Medium	High	Medium-High
崩潰電壓	Low	High	High
導熱性	Good	Poor	Poor
電阻係數	Low	High	High
其他	可生成SiO ₂ ，但品質不若Si、不易碎	無合適氧化物、易碎	無合適氧化物、易碎
主要應用領域	RF IC	Digital Circuit	RF IC

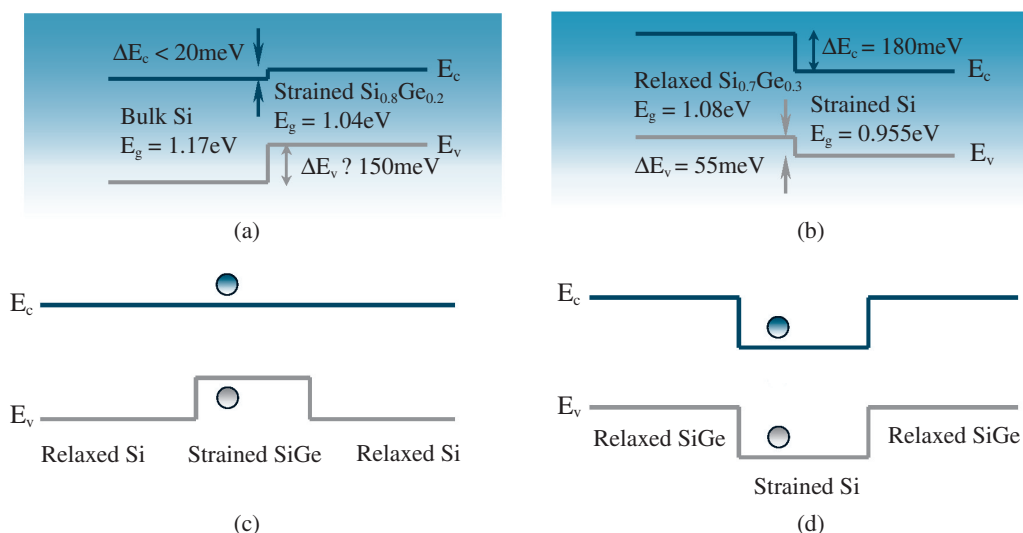


▲圖一 塊材矽鍺、形變矽鍺及形變能釋放缺陷產生示意圖

矽鍺薄膜會產生形變(Strain)，在平面方向會產生壓縮形變(Compressive Strain)。在磊晶方向則因為壓縮形變而增大晶格距離如圖一(b)。因此成長矽鍺磊晶層需控制其磊晶之厚度低於臨界厚度(Critical Thickness)，以避免因形變能量的釋放而產生位錯差排(Misfit Dislocation)^[1]。由於具應變能的矽鍺磊晶層會因過高之製程溫度引發應變能的釋放產生差排，破壞磊晶層品質，因此矽鍺磊晶後元件製作之製程溫度需嚴加控制。

圖二為不同Si/SiGe異質結構的能帶排列示意圖^[2]。當Si和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 之間的能帶不連續出現在價帶，而導電帶近似連續，如圖二(a)例，這種情況有利於價帶工程。如果異質結構成長在Relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的緩衝層上，則Si和

SiGe間為導電帶不連續如圖二(b)例，則適合導電帶工程。藉由不同之SiGe/Si組合，可長出適用於不同元件之磊晶結構，如圖二(c)之能帶工程，適於製作P型金氧半電晶體(MOSFET)。圖二(d)之能帶工程適於製作n型MOSFET。由於異質結構^[3]的發現，使得元件設計多了一個維度，因此Si/SiGe除了可應用於金氧半電晶體外，另一應用為n-p-n型矽鍺異質結構雙載子電晶體(SiGe Heterojunction Bipolar Transistor, SiGe HBT)。SiGe HBT可在高速下操作，其速度遠高於傳統之矽雙極電晶體，且其製程可和傳統之Si製程相容，因此可大幅降低生產成本。HBT結構極具應用潛力，是目前寬頻網路實際應用上極為重要的一種磊晶結構。關於SiGe HBT將於下



▲圖二 不同Si/SiGe異質結構的能帶排列示意圖

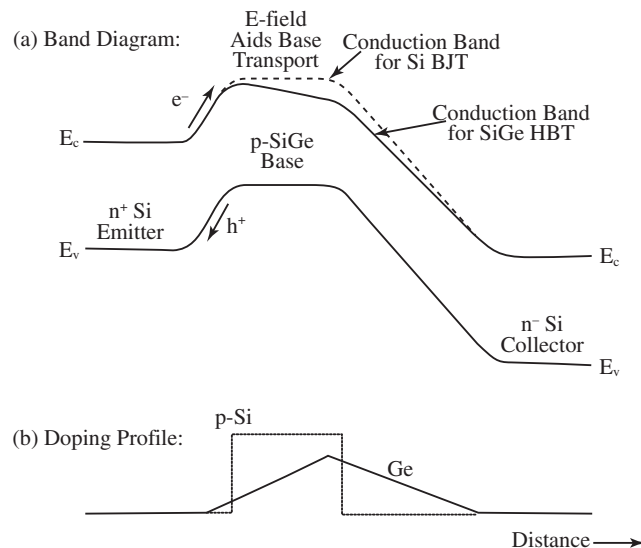
節作較詳盡的介紹。

SiGe HBT原理及製作

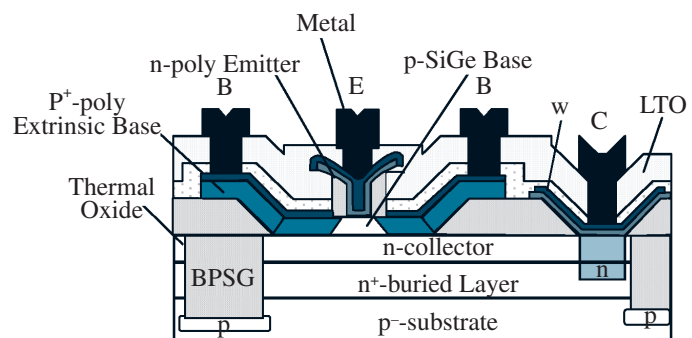
圖三為寬能隙射極異質結構電晶體能帶圖^[4]。射極(Emitter)和基極(Base)間的價帶位障可以阻擋基極的電洞與射極電子復合，提高射極的注入效率，增大電流增益，電流增益的提高與 $n\text{-Si}$ 及 $p\text{-SiGe}$ 之價帶差 ΔE_v 成指數關係^[5]。在寬頻網路的應用上，此結構主要目的並不只是為了獲得很高的電流增益，而是可以把電流增益與其他的參數進行最佳化。SiGe HBT可在基極提高摻雜濃度，如此可以降低基極的電阻，獲得較高電流增益及截止頻率，並改進高頻噪音及低功率特性。若在基極SiGe材料中的Ge組成以梯度的形式增至一定值後，再以梯度形式降至零，則會造成能帶變化，引入內建電場，如此可提高載子漂移速度，減少電子穿越時間，如圖三(b)例。在寬頻網路應用上，矽鍺異質結構電晶體其薄基區的設計都是採梯度形式，因受限於在數百埃厚度內需完成Ge梯度分佈，且符合臨界厚度的要求，其含量都低於25%。

自從1987年第一顆具有基本電雙極特性的SiGe HBT^[6]發表以來，隨著磊晶機台及技術不斷的精進，使得SiGe HBT的性能快速的提昇。1990年可說是SiGe HBT的重要里程碑，IBM發表了截止頻率為75GHz的HBT^[7]，自此之後，元件的研究水準迅速提高。

典型寬頻網路應用之矽鍺異質結構電晶體其結構如圖四所示，依製程方式又可稱之為自我對準結構。元件以SiGe為基極，其中Ge含量為25%，以梯度形式選擇性成長(SEG)，其優點為：不需使用太複雜的微影技術，便可使射極寬度大幅減小，以增進截止頻率；適於整合CMOS於同一矽基板上，進而達到系統晶片SoC之境界。自



▲圖三 矽鍺異質結構電晶體能帶圖



▲圖四 自我對準 SiGe HBT結構

我對準 HBT 製程上採用低溫氧化物 (LTO) 為覆蓋層，利用即時摻雜 (In-situ Dopping) 達到 n 型及 p 型摻雜，這些方法都可以有效的降低磊晶後元件的高溫製程。另外，此結構採用 n 型複晶矽 (Poly Si) 為射極，其目的為降低金屬與半導體接觸時之導帶不連續，提高電子之注入效應；另一目的是 n 型複晶矽成長為低溫製程，而其缺點為技術層面較高不容易達成。

SiGe HBT 之應用

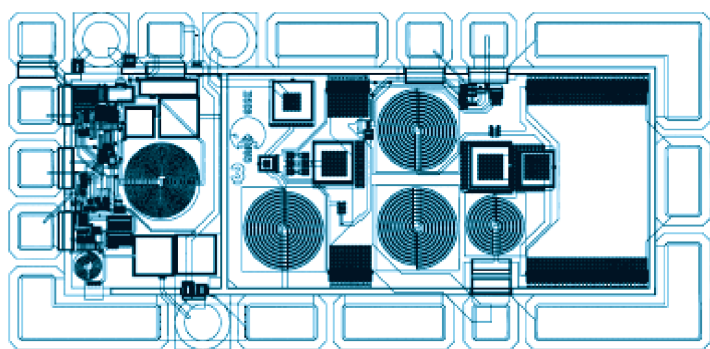
SiGe HBT 目前在寬頻網路上的應用可分為兩大類：(1) 無線通訊，(2) 光纖網路通訊。2002 年 IBM 和 SiGe 公司合作研製的首批功率放大器 (PA) 正式上市，其輸出功率為 +28dBm，PAE 為 40%，ACPR 為 -50dBc，AMPS 模式的效率為 51%。放大器採用 IBM 的 0.5 微米製程開發，工作電壓為 3.4V，消耗電流為 65mA，備用模式下電流消耗小於 2 μ A，這正式開啓了 SiGe 在無線寬頻

網路功率放大器的應用大門。在無線通訊之應用上，低噪音放大器 (LNA) 是無線通訊接收器的前端。用 SiGe HBT 製作的低噪音放大器已經達到很高的水準^[8]。目前行動通訊的頻率在 900MHz 和 1.8/ 1.9GHz 範圍，此頻段內 SiGe HBT 噪音係數在 1dB 以下。圖五為利用 SiGe HBT 和參數匹配的元件在 1.89GHz 下工作的傳送接收 IC (Transceiver IC)^[9]。此電路可獲得 23.5dB 線性增益，在 1.89GHz 時功率輸出增益為 27dBm，LNA 最小噪音係數為 1.8dB。在這個例子中採用了量產的 SiGe 元件，所製作的 LNA PA 線路其噪音值、功率值完全可符合商業應用的規格，因此可以應用到實際產品之中。

在光纖網路通訊應用方面，目前已經有許多以 SiGe HBTs 積體電路發展出來的光纖連接系統^[10]。表二為一些以 SiGe HBTs 積體電路製造出來的光纖網路通訊系統線路及規格。圖六為光纖網路通訊系統線路應用之示意方塊圖^[11]，包含了訊號傳送器 (Transmitter) 及接受器積體線路 (Receiver)。

結語

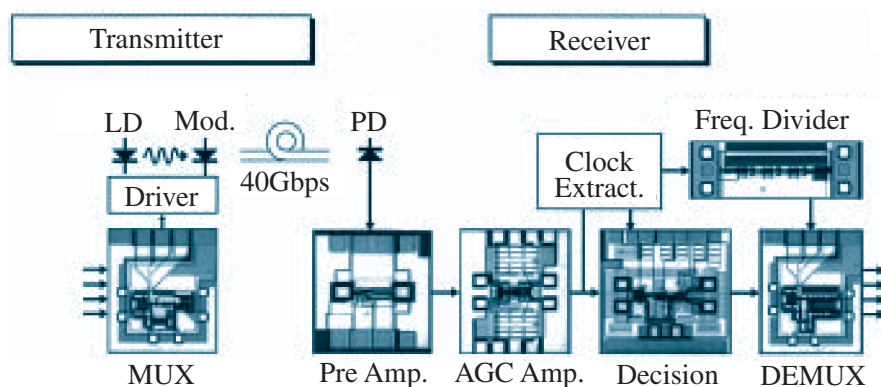
歷經近十五年的研發，矽鍺 (SiGe) 材料與 SiGe HBT 技術已經趨於成熟生產階段，在無線通訊及光纖通訊、高速寬頻網路應用上已經是市場上一種重要的解決方案。在無線網路通訊方面，SiGe HBT 能在高頻操作下，提供



▲圖五 1.89GHz TDMA 系統中包含 PA 及 LNA SiGe Front-end 設計圖

表二 以SiGe HBTs積體電路製造出來的光纖網路通訊系統線路及規格

Circuit	Max Speed/Bandwidth	Remarks
Multiplexer	40Gbps	2:1, 40GHz DFF
Preamplifier	35.1 GHz	$Z_T=48.7 \text{ dB } \Omega$
AGC Amplifier	31.6-32.7 GHz	Dynamic Range=19 dB
Decision	40 Gbps	
Demultiplexer	40 Gbps	1:2, 40Gbps DFF
Static Frequency Divider	50 GHz	



圖六 光纖網路通訊系統線路應用之示意方塊圖

優異微波特性，效能不僅超越矽元件技術，更挑戰著目前執牛耳地位的III-V族化合物半導體元件。而目前以SiGe HBT 製作之光纖網路通訊系統，其傳輸速度則達40Gbps以上。又因其能與CMOS整合在同一矽晶片上，更可將整個晶片系統結合在同一晶片實現 SoC之理想。因此就製造成本及系統整合性而言，矽鍺元件可說是高速寬頻網路半導體元件之必然趨勢一點也不為過。

參考文獻

1. J. C. Bean, Appl. Phys. Lett. Vol. 44, pp. 102-104, 1984
2. R. People Appl. Phys. Lett. 1986, vol. 48 (8), pp.538-540
3. W. Shockley, U.S. Patent# 02569347, filed June26, 1948
4. H.Kroemer, "Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits," Proc. IEEE, vol. 70, no.1, pp.13-25, Jan, 1982
5. D. L. Harnage, J. H. Comfort, et al. IEEE Trans. On Electron Devices, 1995, vol. 42 (3), pp. 455-467
6. S. S. Iyer, et al. in IEDM Tech. Dig, pp. 874-876, Dec. 1987
7. G. L. Patton et al., IEEE Electron Device Letter, 1990 vol. 11 (4), pp. 171-173
8. U. Erben et al., Electronics Lett, vol. 34, no. 15, Jul. 1998, pp. 1498-1500
9. Washio K, et al., ISSCC Dig. Tech Papers 1998:312-3
10. Masuda T, et al., ISSCC Dig of Tech. Papers 1998:314-5
11. Katsuyoshi Washio, Solid-State Electronics 43 (1999) 1619-1625