

經過三年的默默耕耘，由國立清華大學材料系洪銘輝教授（台積電講座教授），以及國立清華大學物理系郭瑞年主任（傑出人才講座教授）所領導的先驅研究，已在研發新穎電晶體的領域得到極大的尊崇，並藉此將台灣推向世界領先的地位，這些新電晶體是利用高介電係數閘極氧化物與截然不同於傳統的半導體來製造的。

這研究群包含有國家同步輻射研究中心梁耕三主任、徐嘉鴻博士、李信義博士、台灣大學凝態中心陳正弦主任、朱明文博士、中山大學賴聰賢教授、清華大學張石麟教授、黃振昌教授、羅榮立教授、吳泰伯教授、台灣大學劉致為教授、交通大學荆鳳德教授、以及成功大學王永和教授。本研究團隊過去和現在已接受多項計畫的資助，如國科會兩項國家型奈米計畫、個人計畫，教育部五年五百億清華大學拔尖計畫，經濟部學界科專，工研院自主性前瞻計畫以及台聯大奈米中心的支持。

藉由此等新式電晶體所延伸出的科學與技術將強烈的衝擊著未來的電子產業。本研究的主要骨幹乃是一架構於工研院奈米科技研發中心（前台積電一廠）的多功能—多腔體分子束磊晶以及原子層沉積系統。洪銘輝教授與郭瑞年教授在台灣所帶領的研究團隊相繼地發表了許多重要且具有突破性的成果並申請了國內外之專利，並已成功的開發出結合砷化鎵、砷化銾以及高介電閘極氧化物的金氧半場效電晶體(MOSFET)。

如果這個由清華大學、台灣大學、交通大學、成功大學以及同步輻射研究中心所組成的團隊以及其他國內外的研究團隊可以克服一些重要的製程挑戰，這項革命性的創新將可實現手機單晶片（cellphone-on-a-chip）以及即時的類比數位轉換。當矽晶片在 22 奈米製程技術之後無法再更進一步地縮小時（見附圖一），此技術更將使得晶片製造商可以繼續提高處理器之運算速度與效能。甚者，這亦將使結合奈米電子以及奈米光學於一個單晶片上的夢幻組合成真。要曉得據直接能隙的矽是無法發光的。

這項開創性的研究在 1990 年代發源於座落在美國新澤西州的科技重地貝爾實驗室。就是在這個地方，洪教授與郭教授（當時兩位是貝爾實驗室的 Distinguished Member of Technical Staff）以及他們兩位卓越的團隊開始了對於高介電係數氧化物與砷化鎵之介面執著的追求，這是極端細膩次奈米級的剪裁工程（見附錄：[milestone research results on realizing III-V MOSFET](#); 實現 III-V MOSFET 之里程碑），這也終將使砷化鎵數位積體電路得以實現。

在 2003 年暑假，他們回到台灣來啓發並教育清華大學的學生，（他們認為這些學生是台灣未來極需要的年輕一代科學家以及工程師），以達到更高的水準與發展；並且，也幫助台灣的大學，特別是清華大學，追求世界卓越。

在許多方面，像是發光二極體以及雷射等，砷化鎵以及其他的三五族半導體都是比矽半導體更好的選擇。這些結合週期表中三族以及五族元素所形成之化合物，傳導電子的速度可達矽的 20 倍之快。

儘管有著這麼多的優點，砷化鎵從未被製成微處理器或記憶電路等商品。這是因為在洪教授與郭教授有了重大突破之前，這些材料都無法被用來製作金氧半場效電晶體（MOSFETs）。而金氧半場效電晶體是用在微處理器以及微控制晶片電路中之互補式金氧半場效電晶體（CMOS）元件的基礎。在一個金氧半場效電晶體中，於閘極施加偏壓會在通道中形成一電場而讓電流通過；這閘極就像水龍頭的開關一般。在他們的發現之前，一直沒有找到可作為閘極與通道間有效保護層的材料。

1993 年，洪教授、郭教授以及他們的同事決定要製作一個砷化鎵金氧半場效電晶體。郭教授說：「這真的是一個科技上的關鍵」，「自從 1960 年代以來（30 年來），橫跨表面物理、表面化學、電漿物理、材料科學到電子工程等科學以及工程領域的研究者，都一直追求著砷化鎵金氧半場效電晶體的實現。不幸地，幾乎沒有人成功，包括許多有名的科學家在內，但是，許多科學的研究是極其寶貴。我們非常感激能幸運地發現了一個先進的氧化物剛好可以解開氧化物與砷化鎵介面間的費米能階制釘札（Fermi-level pinning）」。

為了製作出如此高品質的氧化物／半導體結構，洪教授、郭教授以及同僚們首創以超高真空多腔體分子束磊晶系統來沉積此一特殊氧化物於砷化鎵基板，此一方法迄今仍為公認最佳的成長方式之一。他們使用電子束蒸發單晶的鈾鎵氧化物（ $Gd_3Ga_5O_{12}$ ）並沉積奈米尺度的單晶氧化鈾（ Gd_2O_3 ）薄膜於砷化鎵表面可以得到極佳的介電保護層。成長超過一個奈米之後，氧化鎵（ Ga_2O_3 ）分子一同

加入而形成了非晶質的混合氧化物薄膜。

以此為基礎，貝爾實驗室的研究群在 1996 年首先研發出全世界第一個反轉通道的金氧半場效電晶體(inversion-channel MOSFET)，進一步地證明了其日後發展的可能性。他們的研究成果發表在重要的科學期刊與雜誌，譬如，*Science*, *Applied Physics Letters*, *Physical Review*, *IEEE Electron Device Letters*, and *International Electron Devices Meeting*。一年後，Motorola 的研究群在 1997 年才設法做出一類似的金氧半異質場效電晶體(MOS- hetero-junction FET)

儘管有了持續不斷好的研究成果，但三五族電晶體真正受到關注是在 2005，被英特爾(Intel) 加入其 CMOS 發展計畫(Roadmap)後。就這樣地，在很短的時間裡，無論是美國、日本、歐洲或是中國都爭相投入到與此相關的研究，無論是業界或是學術機構都在進行著新的研究，為了以現有的 CMOS 科技製作出三五族金氧半場效電晶體 (MOSFET)。

與其他研究團隊不同的是，早在 2003 年，洪教授、郭教授與他們所帶領專注與能幹的清華學生，即便是在令人恐慌的 SARS 期間，仍舊以迅雷不及掩耳的速度，經由國科會、教育部、工研院、經濟部等的資助下，重新建立起由美國貝爾實驗室捐贈給兩位教授所帶回台灣，價值超過新台幣兩億元的多功能、多腔體分子束奈米磊晶系統，隨後亦增添了更多實驗設備來增強此系統的功能性(見附圖二)。

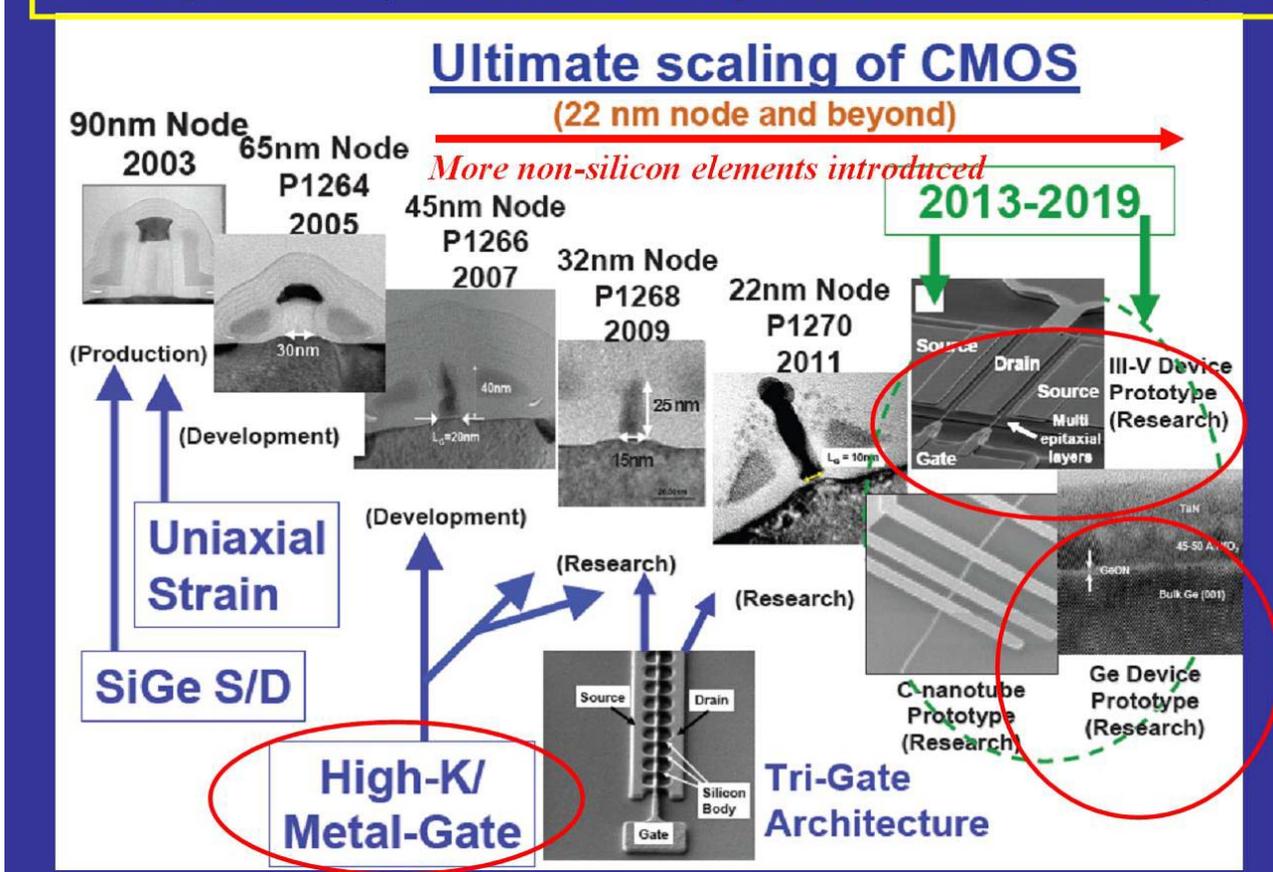
像是新增的 X 光光電子能譜分析儀(XPS)與掃描式原子探測顯微鏡(SPM)，便可以用來分析在三五化合物半導體上沉積的初始氧化物情形，進一步地了解費米能階為何不會有釘扎效應 (Fermi level pinning) 的機制。另外，他們在實驗室中建立起台灣自製的原子層沉積(ALD)系統。也研究出在三五半導體上具有良好熱穩定性的氧化物，這對於反轉型金氧半場效電晶體 (MOSFET) 的製作是不可或缺的。而砷化鎵與砷化銦鎵上，以原子層沉積法所成長的氧化鋁及氧化鉛所引起的費米能階釘紮效應 (Fermi level pinning) 也藉由台灣團隊獨特的研究而有了答案。

由於三五族半導體 CMOS 元件的優越性及其高度被看好之前景，近年來國內外許多頂尖之研究機構如 Intel、IBM、Freescale (Motorola)、IMEC、SEMATECH 以及許多學術單位接爭相投入此一領域。由於洪教授與郭教授等人所組成的研究團隊在此領域具有非常深入的瞭解與相當傑出的研究成果，因此獲得世界半導體產業龍頭英特爾 (Intel) 的高度認同並提供研究經費，也已經展開與美國耶魯大學、普渡大學、伊利諾大學等世界一流大學頂尖研究室的緊密合作，近期也將陸續發表一系列合作的研究成果。此外，包括台積電和 IMEC、以及 IBM 等研究機構都展現出高度的興趣，並且已經進一步地討論合作細節。

到目前為止，洪教授、郭教授與他們所帶領的團隊已製作出獨立的電晶體元件，若要將其應用到積體電路中，雖然是相當地困難但不無可能，但是若一旦將此類砷化鎵金氧半場效電晶體 (MOSFET) 整合至現今的積體電路中的話，那將使很多東西變得可能，像是可以取代基地台中作為能量放大器的邊擴散矽微波能量電晶體，也可用來製作超省電手機，讓你一個月充一次電便足夠。事實上，藉由整合能量放大器、訊號發送與接受裝置，以及晶片上的電源控制設計，砷化鎵金氧半場效電晶體 (MOSFET) 將可以徹底改變當今手機的設計與製造，此外，使用砷化鎵積體電路能有效地改善手機上往往傳輸速度較慢的多媒體功能，若是手機在較高頻率接收訊號時，類比訊號能直接轉換成數位訊號，則將可以避免掉基站與無線電頻率區間大量的雜訊。

“你能想像一個擁有速度 40GHz 中央處理器的功能但又不貴的個人電腦多有用麼?”洪教授笑著說。“其實我們深知道，在將砷化鎵 MOSFET 推向市場上前，還有一條很長的路要走，但即便如此，清華帶領的研究團隊仍帶頭實現了應用三五半導體 MOSFET 的可能性，並且使得台灣在各界都積極地研究發展此技術的同時，佔有一席相當重要的領先地位。”

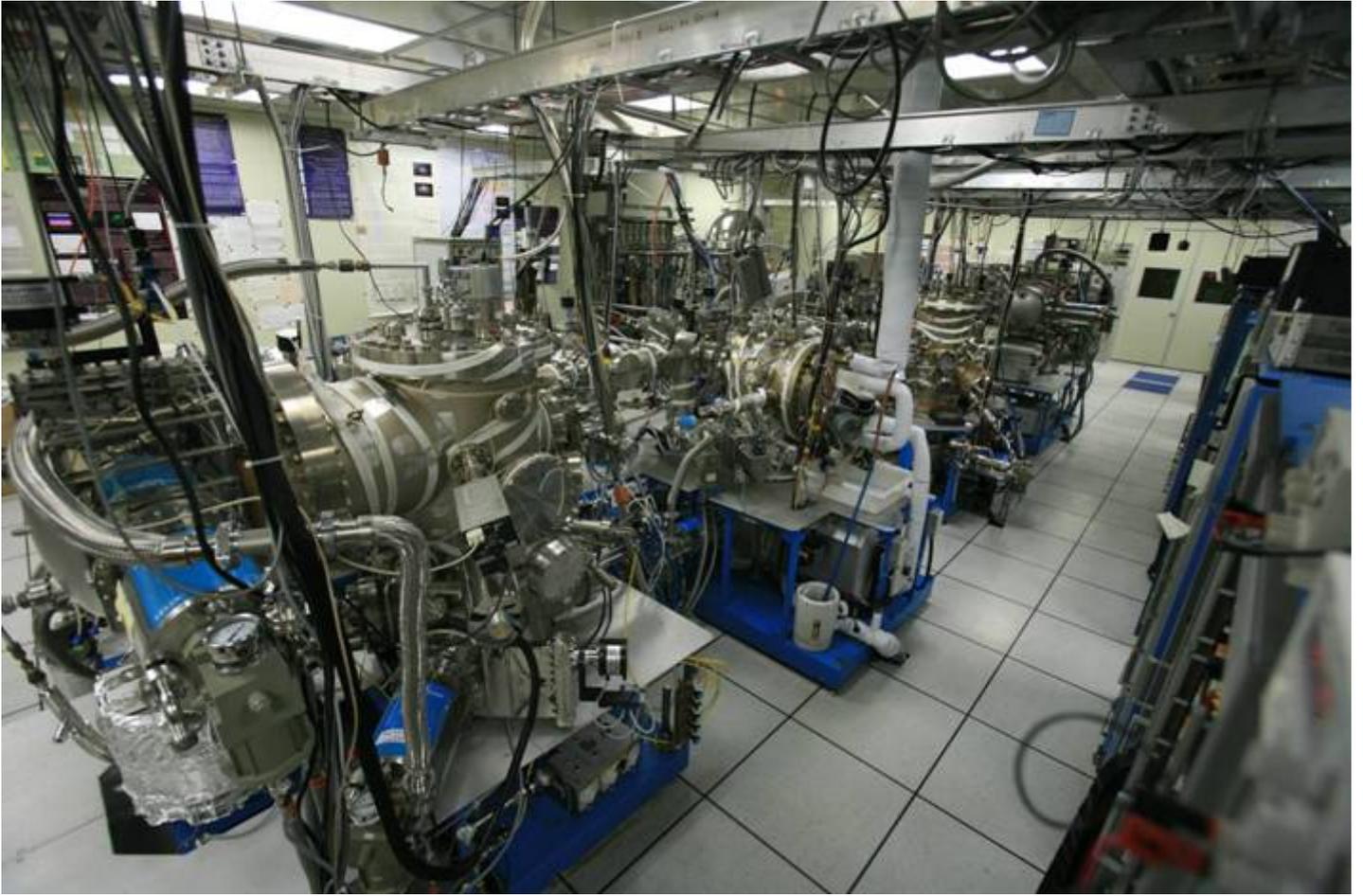
Intel (Sematech) Transistor Scaling and Research Roadmap



附圖一

實現III-V MOSFET之里程碑

- 1994
 - novel oxide Ga₂O₃(Gd₂O₃) to effectively passivate GaAs surfaces
 - demonstration of low interfacial recombination velocities using PL
- 1995
 - establishment of accumulation and inversion in p- and n-channels in Ga₂O₃(Gd₂O₃)-GaAs MOS diodes with a low D_{it} of 2-3 x 10¹⁰ cm⁻² eV⁻¹ (IEDM)
- 1996
 - first e-mode GaAs MOSFETs in p- and n-channels with inversion (IEDM)
 - Thermodynamically stable
- 1997
 - e-mode inversion-channel n-InGaAs/InP MOSFET with g_m= 190 mS/mm, and mobility of 470 cm²/Vs (DRC, EDL)
- 1998
 - d-mode GaAs MOSFETs with negligible drain current drift and hysteresis (IEDM)
 - e-mode GaAs MOSFETs with improved drain current (over 100 times)
 - Dense, uniform microstructures; smooth, atomically sharp interface; low leakage currents
- 1999
 - GaAs power MOSFET
 - Single-crystal, single-domain Gd₂O₃ epitaxially grown on GaAs
- 2000
 - demonstration of GaAs CMOS inverter
- 2001-2002
 - Design of high-speed and high-power devices; reliability of devices



附圖二