

我在電機系經歷的 三五族化合物半導體研究

文・圖／林浩雄

過去數十年來，電子與資訊產業的開展都是植基於半導體技術之上。三五族化合物半導體是目前僅次於矽基半導體的重要半導體材料。

三五族化合物半導體材料

三五族化合物半導體的開發起源很早，與矽基材料不同的是三五材料可由多種三族與五族元素構成，種類多，而且能夠形成合金，具有不同的晶格（lattice constant）與能隙（energy gap）大小。矽單晶半導體積體電路技術中最重要的結構就是由金屬、氧化物與半導體所構成的MOS結構，這個結構可由外加電壓來控制氧化物與半導體界面的電荷載子，達到電晶體操作的功能，進而構成電路與系統的操作。而在三五族化合物的元件中，卻是靠不同合金成長在一起形成多層合金的異質結構（heterostructure）或是量子結構，利用各層介面，或做為電荷載子的通道，或做為電子、電洞的局限層或量子井層、或做為光學波導結構；具有相當的多樣性。過去數十年間，隨著矽積體電路的推展，三五材料一直被視為繼矽之後的下一個半導體，加上有許多特殊的性質，在學界被廣泛研究。現今在矽基材料之外，主要的光電元件包括通訊、DVD/CD以至於雷射指示器的各式雷射、各式發光二極體、手機、無線通信用的電晶體、放大器大都是使用三五材料所製

成的。公元2000年諾貝爾物理獎有一半是頒給J. S. Kilby，理由是對積體電路的貢獻；另一半頒給Z. I. Alferov以及H. Kromer，理由是對半導體異質結構的貢獻。目前三五材料的應用僅限於矽基材料之外的通信前級與光電領域，未來在矽積體電路到達其物理極限之後，或仍有可能進入積體電路的領域。

液態磊晶法的時代

本校電機系對三五材料的研究始於施敏與馮武雄兩位教授。施敏教授當時服務於貝爾電話實驗室，曾多次回國擔任客座教授。大約在1975年到電機系任教時，指導馮武雄教授（當時為講師）進行博士論文研究，研究的主題就是現今非常熱門的三五族異質接面太陽能電池。當時因阿拉伯國家的石油禁運，太陽能電池成了熱門的研究主題，沉寂了一段時日之後，最近因能源議題又被炒熱。由於三五族元件的主要功能是來自多層異質結構，因此採用磊晶法，當時主要的技術是液態磊晶法（liquid phase epitaxy），利用鎵或銦作為溶液，把要成長的薄膜材料當作溶質，於高溫配成溶液，利用降溫在基板上析出薄膜。而今業界與學界所使用的有機金屬化學沉積法（metal-organic chemical vapor deposition）與分子束磊晶法（molecular beam epitaxy）在當時才剛萌芽。馮教授也在慶齡工業中心4樓實驗室裝設了一套用以成

長砷化鋁鎵（AlGaAs）的液態磊晶系統。筆者在1978年進入電機研究所碩士班就讀，當年冬天到馮教授的實驗室進行磊晶成長的研究。在筆者到達之前有一位曾訓華學長（現於原委會核能所任職）也隨馮教授進行研究，他的碩士論文可能是本校第一篇三五材料的研究論文。筆者到實驗室約半年，馮教授即負笈到Stanford大學Prof. Pearson的研究室進修。筆者則在實驗室繼續利用這套磊晶系統完成砷化鋁鎵太陽電池的碩士論文研究。



液態磊晶系統所使用的石墨槽（1985）。

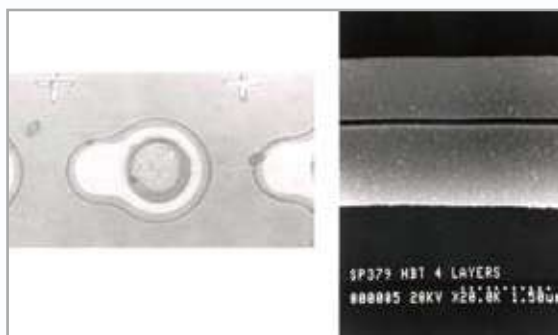
筆者畢業後在系上擔任助教，之後接受邱雲磊教授指導攻讀博士。原先轉到矽基材料的領域。但邱教授在1982年獲得電信局電信研究所（現中華電信電信研究所）支助研究計畫，要開發砷化鋁鎵雷射二極體，因而又轉回三五材料的領域。那年暑假就在電機一館的3樓實驗室與學弟楊賜麟（現為交大電物系教授）自行設計組裝一套液態磊晶系統。由於經費並不充裕，於是僅購買爐體、幫浦與必要的材料，PID溫控器則自行以類比計算的方式設計並購買零件組裝。第一個石墨槽在後火車站的車床車製，石英治具則委請物理系的許玉釧先生吹製。同年李嗣涔校長應聘回到系上擔任客座副教授。李校長在Stanford大學時隨Prof. Pearson進行博士論文研究，主題也是砷

化鋁鎵太陽電池。後來邱教授在1983年離校應聘到美國南佛羅里達大學任教，李校長就接續主持計畫、實驗室的研究工作。這個計畫除了液態磊晶之外，還包括雷射元件的製作、鏡面的剝製。因為對雷射元件的特性經驗不夠，我們還特地到當時的中華商場舊貨攤找尋雷射二極體買回來量測。由於這些雷射的起振電流都非常大，我們使用矽控整流器及高壓電源自製雷射的脈衝觸發電路，在最後階段，對於元件是否達到雷射震盪一直難以確認，最後就把夜視鏡（image finder）湊在單光儀的出口，在暗房中，筆者與李校長一人慢慢轉單光儀，另一人用肉眼辨識夜視鏡幕屏上的影像以驗證雷射的縱模發光。之後才買矽偵測二極體來量測雷射的光譜。

異質接面雙極電晶體 (HBT) 的研究

1984年李校長從劉華光客座教授那邊得知IBM正在發展異質接面雙極電晶體（HBT）。這種電晶體很早就由W. Shockley與H. Kromer提出，不過到1980年代研究論文還不很多。在實驗室裡，最早由碩士班研究生高昭男用自組的液態磊晶系統成長，並完成電晶體的元件製作。這個電晶體的特性與矽電晶體的特性極不相同，具有很大的抵補電壓，李校長由此現象的研究開始，提出一連串相關的論文，最後提出了完整解釋異質接面電流傳導的電晶體直流模型。高君畢業之後，就由筆者繼續以此主題作博士論文研究。當時UIUC Prof. Morko的研究群發表了一篇論文，他們在HBT的接面邊緣加上了保護環（guard ring）並用第四個電極來控制保護環的電位，在小電流範圍獲得良好的電流增益。由於這種結構需要複雜的製程

步驟，筆者因而嘗試利用砷化鎵表面缺陷能階所造成的空乏區、電晶體射極與基極接面空乏區，互相夾止的方式，來代替保護環的功能。這種方式相當簡單，只需要把射基極接面的邊緣用化學蝕刻減薄，使其夾止即可，不需要額外的電極。李校長將之命名為射極邊緣減薄結構，結果製出的電晶體增益非常地高。我們將之發表在 Appl. Phys. Lett.。現今業界製作HBT就是使用這種結構，其做法是將成長很薄的InGaP射極，直接去除射極邊緣InGaP上面的GaAs，利用GaAs與InGaP良好的選擇性蝕刻做較精密的控制。目前手機中推動天線的放大器晶片就是用具有這種結構的HBT製作。1990年後，呂學士所長應聘回到系上服務，就持續以這種結構開發研究InGaP/GaAs異質接面電晶體。雖然目前業界大都是使用InGaP電晶體，但仍有少部分的公司使用AlGaAs電晶體。



早期HBT磊晶結構的電子顯微鏡照片與顯微鏡照片（1985）。

分子束磊晶法時代

液態磊晶法在接近熱力學平衡的狀況下成長，在薄膜厚度的控制上，難以達成到量子井的奈米尺度。1990年電機系獲得校方經費購置固態源分子束磊晶機。分子束磊晶法係在超高真空環境中，利用加熱管（Knudsen cells）將固體材料加

熱蒸發，射到基板上進行薄膜成長。在高真空環境下，蒸發氣體分子的平均自由路徑非常長，其前進方式類似光束，所以稱為分子束。其流量可以用溫度精密控制，加上成長室處於高真空，可以同時進行材料的分析；因此不論在學術研究或產業研發，分子束磊晶機都是重要的磊晶工具。這一部磊晶機還是以砷化鎵系統為主要的成長材料，不過在完成機器安裝、進行試長時，筆者發現工作人員具有成長磷化銻系統的專長，於是要求改成示範成長與磷化銻匹配的InAlAs與InGaAs材料。之後這部分子束磊晶機就同時進行這兩種材料系統的成長，初期完成這兩種材料系統的HBT成長與製作，均達到極高的電流增益。之後在1998年加裝銻的加熱管後，進行GaAsSb材料的成長，用於量子點、量子環結構以及雷射二極體的成長。1993年在當時凝態中心黃昭淵主任以及教務長的支持之下，獲得經費購置另一套氣態源分子束磊晶機。這套系統使用擴散幫浦，可以通入氣體與電漿反應物。除了可以成長磷化物與氮化物之外，氣體的流量控制比加熱管的溫度控制要迅速，更適於精密的異質接面成份轉換。氣態源磊晶機剛到時，限於經費，只有四個加熱管，兩條氣體線，我們用於磷



固態源分子束磊晶機。



氣態源分子束磊晶機。

化銦系統的四元化合物InGaAsP成長；其後再陸續加上氮的電漿源與銻的加熱管，以進行低含氮化合物（dilute nitrides）、銻化合物材料與元件的成長。

在這個時期，筆者覺得較有特色的部分是GaAsSb/GaAs第二型量子井雷射、InAs自組成量子點雷射、以及InAsN dilute nitride雷射。其中最後一項雷射的波長在中紅外線波段，筆者以此為契機，開展了與英國Lancaster Univ. Prof. Krier中紅外線研究群的長期合作，陸續開展在InAsSb, InAsPSb系列的窄能隙材料的成長與物理特性測定。20年來，這兩套磊晶機廠商經歷多次產業景氣循環與被併購，原先人員多已離開，而由實驗室研究生擔負起改裝、維護與運轉的工作，迄今共成長了5千餘片樣本。而在同時，校內研究三五乃至二六化合物半導體領域的同仁逐漸增多，有多位利用這些樣本進行三五材料的物理或元件方面的研究；最早是已故的詹國禎教授進行反射調制光譜

的測定，其後則包括物理系的陳永芳、張顏暉、梁啟德等教授，凝態中心的白偉武、張玉明研究員，電資學院的呂學士、楊志忠、楊英杰、林清富、孫啟光、毛明華等教授，利用這些樣本進行研究，增綴他們的成果。限於篇幅，對他們的研究就不再贅述。

後記

30年來，電機系以及後來的電機學群培育了許多以三五族為研究主題的研究生，包括筆者在內。畢業生除了留在學界與研究單位之外，大部分都進入產業界服務。事實上，國內的三五族產業遲至1990年代末期才開始萌芽，早期的畢業生只能進入矽積體電路產業，他們在校以三五材料進入研究的堂奧，到了業界多能活學活用，並卓然有成；後來三五族的產業逐漸興起，主要為砷化鎵電子元件、磷化銦鋁鎵與氮化鎵發光二極體。但規模仍小於矽電子與後起的面板產業，因此有許多畢業生還是繼續進入矽積體電路產業乃至於面板產業。而國內的三五產業，大致可分為磊晶廠（epi-house）與晶片代工廠（foundry），我們的畢業生在三五HBT異質接面電晶體的磊晶廠也有非常優異的表現，已占有一席之地。

筆者應電機系胡主任邀請，就這30年來三五族化合物半導體研究發展，以一己管見作一記述；撫今追昔，能就業於多位師長，並與各同仁、研究生共事，實與有榮焉。（本專題策畫／電機系林茂昭教授&胡振國主任）



林浩雄小檔案

1978年臺大電機系畢業，1980年臺大電機所碩士畢業，1985年臺大電機所博士畢業。碩士畢業後，於1980年獲聘為電機系助教，1981年聘任講師，1985年聘任副教授。1985-1986到Stanford大學訪問進修。1992年升任教授迄今。