

化合物半導體之分子束磊晶技術

Molecular Beam Epitaxial System for III-V Compound Semiconductor

林浩雄、劉珀璋、張福裕

Hao-Hsiung Lin, Po-Wei Liu, Fu-Yu Chang

分子束磊晶法為重要的三五族化合物半導體研發與生產技術，尤其適於精密、複雜的量子結構成長。本文介紹三五族化合物半導體分子束磊晶系統的裝置設備，包括真空系統、分子束源、基板操控器與即時量測設備。本文同時也介紹了兩項近期的發展，包括含銻化合物半導體與砷化銻量子點的成長與應用。

Molecular beam epitaxy has been one of the important epitaxial techniques for III-V compound semiconductor both in scientific research and industrial production. We introduce the details of the molecular beam epitaxial system including vacuum chambers, Knudsen cells, manipulator, and in situ measurement tools. Two applications, Sb-based quantum well and InGaAs quantum dot grown by molecular beam epitaxy, are also reported.

一、前言

分子束磊晶技術 (molecular beam epitaxy, MBE)^(1,2) 係於高真空度 (high vacuum, HV) 之下，將分子束 (molecular beam) 或化學束 (chemical beam) 直接照射到成長之基板上，以形成磊晶薄膜。由於成長時，真空室所處的真空度範圍為分子流區域 (molecular flow region)，即分子的平均自由路徑遠大於真空器物的尺寸，因此被稱為分子束磊晶。目前在化合物半導體上，分子束磊晶技術可依其分子束源分為傳統的固態源分子束磊晶 (solid source MBE)、氣態源分子束磊晶 (gas source MBE) 以及化學束磊晶 (chemical beam epitaxy, CBE)。固態源

分子束磊晶以基本元素經過精密的溫度控制產生分子束源，目前三五族元素除了氮之外在室溫之下均為固態，故稱之。然而在成長中以五族元素的消耗最快，因此便有以五族的氫化物，例如砷化氫、磷化氫等在室溫下為氣體的材料，經過流量控制以及裂解產生分子束的方式。這便是氣態源分子束磊晶。這種方式的優點在於氣體的流量控制較溫度的控制快速，而且氣源裝置在真空腔體之外，便於更換。最後，若連三族的材料也以其有機金屬化合物取代，便稱為化學束磊晶或有機金屬分子束磊晶 (MOMBE)。由於有機金屬含碳，其化學束一般未經裂解便直接射入基板，靠基板的溫度裂解脫去有機基以形成磊晶薄膜。因此這種成長方式與基板溫

度有相當大的關係。目前僅有傳統的固態源分子束磊晶有商用的生產型機種。

在化合物半導體領域，除了分子束磊晶技術之外，另一個重要的技術是有機金屬化學沈積法 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)⁽³⁾。目前國內的化合物半導體業界係以有機金屬化學沈積法為主。分子束磊晶法與有機金屬化學沈積法相較，最主要的不同點在於成長環境的真空度。後者處於黏滯流區域 (viscous flow region)，氣體分子在到達基板之前，已歷經多次的分子間碰撞，因此其溫度分佈與裂解機制均遠較分子束磊晶法複雜。此外，分子束磊晶法為了維持分子流的真空度，所使用的分子束通量通常比有機金屬化學沈積法要小。用以保護晶體表面的五族氣源較小，加以分子束並不需要靠基板溫度裂解 (除了化學束磊晶的情形之外)，因此成長的溫度也比較低，可以成長較為陡峭的成份或雜質介面。此外，分子束磊晶因為在高真空進行，可以同時使用一些即時量測的儀器。主要使用的量測儀器包括反射式高能電子繞射儀 (reflection high energy electron diffraction, RHEED)、四極質譜儀 (quadrupole mass spectrometer) 以及其他量測儀器。其中反射式高能電子繞射儀是非常有用的即時量測設備，可以進行單原子層級的

觀察，確認基板表面的狀況以及成長的狀況，甚至可以與成長的控制同步鎖定，進行所謂的相位鎖定成長 (phase-locked epitaxy, PLE)⁽⁴⁾。

現階段國內化合物半導體業界主要使用的技術為有機金屬化學沈積法，粗估應該在兩百套左右。有機金屬化學沈積法有快速成長、高溫成長以及大量生產的優點，尤其在氮化鎵材料的部分。分子束磊晶法的優點在於成長機制較為簡單，加上具有即時量測技術，因此對材料結構可以快速地達到精密的控制，特別適於多層複雜結構的成長，例如量子串接雷射結構一類具有數百層複雜量子井的結構。⁽⁵⁾

二、分子束磊晶系統的設備

分子束磊晶雖然在高真空 (HV) 的範圍 (10^{-4} - 10^{-7} mbar) 進行成長，但是系統成長室 (deposition chamber) 的真空度規格卻是在超高真空 (UHV) 的範圍 ($< 5 \times 10^{-11}$ mbar)。事實上，成長時之高真空範圍的氣壓係來自於分子束材料自身所造成的，而超高真空的規格來自於磊晶純度的要求。簡言之，高真空範圍是以氣體分子平均自由路徑超過真空器物尺寸來界定；而超高真空是以基板表面黏著一單

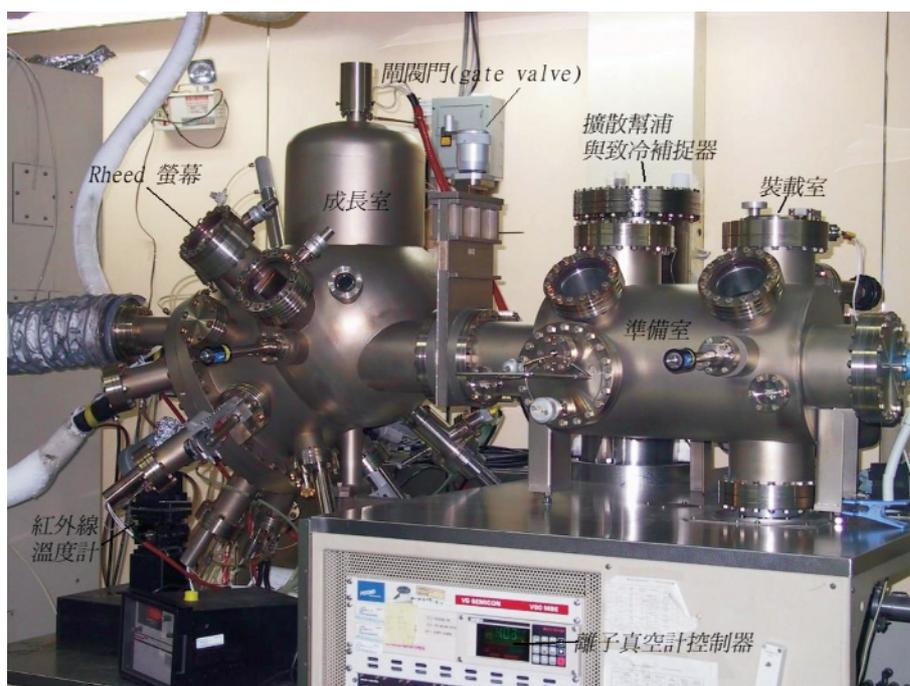


圖 1. VG SEMICON V80 氣態源分子束磊晶機。

層殘氣所需的時間超過實驗或控制時間來界定。由此我們可以瞭解為何需要進入超高真空的範圍。

1. 真空系統

要達成成長室的超高真空要求，系統從大氣起抽之後，必須經過長期的真空室烘烤 (bake-out)，才能獲致如此的真空度。因為無法經常洩至大氣，分子束磊晶系統通常區隔為多個真空室。如圖 1 所示的 VG V-80 系統有三個真空室，除了成長室之外，分別為準備室 (preparation chamber) 與裝載室 (fast entry lock)。平時只有裝載室會洩至大氣以裝卸成長基板。準備室則用於烘烤由裝載室傳送過來的基板。成長室與準備室通常維持在超高真空的範圍，三者之間有傳送系統以進行基板晶片的傳送。有的系統另外還有分析室 (analysis chamber)，可以對成長完畢或中斷的樣本在高真空中直接進行材料分析量測。成長室通常視所採用的分子束源而使用不同的幫浦。傳統的固態源分子束磊晶，因為蒸出的分子束會凝結在腔壁，所以使用離子幫浦 (ion pump) 與鈦昇華幫浦 (Ti sublimation pump) 即可。使用砷化氫或磷化氫的氣態源分子束磊晶以及使用有機金屬氣體的化學束磊晶，因為會有氣體的副產物，所以必須使用渦輪幫浦 (turbo pump) 或擴散幫浦 (diffusion pump) 將這些氣體排出。準備室則使用離子幫浦。裝載室粗抽幫浦通常使用吸附幫浦 (sorption pump) 配上隔膜幫浦 (diaphragm pump) 作為粗抽，然後用渦輪幫浦或冷凍幫浦 (cryopump)

將裝載室吸入高真空的範圍。

2. 分子束源

分子束磊晶系統的成長室除了幫浦及晶片傳送裝置之外，還包括分子束源、基板操控器、量測設備等。傳統的分束源係一個能夠精密控制材料源溫度的加熱管，又稱為努森管 (Knudsen cell 或 K-cell)。如圖 2 所示，為一 VG 的三族努森管，固體材料被放置在管頭的氮化硼容器內 (PBN crucible)，旁邊則為鈹薄片所構成的電阻式加熱片。更外圍則為冷卻水管，用以隔絕各加熱管間之熱耦合，並能提供熱損以利快速達成溫控變化。容器的底部束以熱電偶，其下則以多層鈹反射片作為隔熱裝置，以屏蔽末端用以饋通冷卻水、熱電耦與電源的真空饋通器 (feed-through)。由於在真空中的熱傳主要為輻射，所以使用多層高溫金屬反射片即可達到隔熱的目的。

努森管以溫度控制容器內的材料蒸氣壓，依據熱力學，照射到基板表面的分子束通量可寫為：

$$F \propto \frac{1}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

其中 T 為絕對溫度， B 係數與材料有關。由此式可知分子束通量與溫度是因次的關係。就常用的三族材料銻、鎘、鋁而言，雖然它們的蒸氣壓與溫度的關係不同，不過當分子束通量相近的時候，性質卻

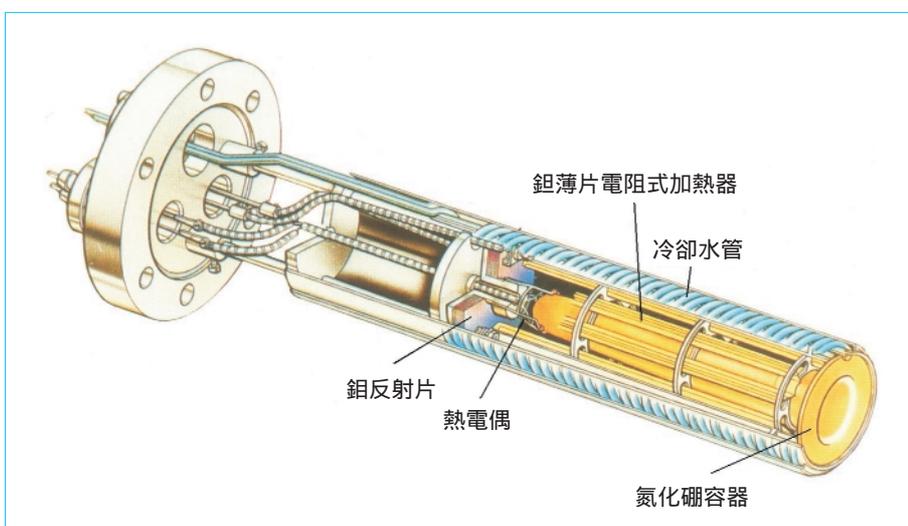


圖 2. VG 的三族努森管圖。

類似。在接近成長速率為 $1 \mu\text{m/hr}$ 的條件下，大約每提昇 $35 - 40^\circ\text{C}$ ，它們的分子束通量可以加倍。對於這些材料，有的努森管還有熱舌式 (hot-lip) 與冷舌式 (cold-lip) 的設計。熱舌式是在容器 (crucible) 的出口附近加上特別的熱絲，提高溫度，避免蒸出的材料在管口附近凝結。對於鎵而言，這樣可以避免卵型缺陷 (oval defect) 的產生。冷舌式的設計通常用於鋁，主要是避免鋁爬出容器 (crucible)。

在三五價化合物半導體的分子束磊晶成長中，五族砷、磷其努森管的原始蒸發溫度遠低於基板的溫度，因此五族分子到達較熱的基板時應該難以附著。不過當基板上尚有尚未鍵結完全的三族原子時，五族分子會分解嵌入，因此其黏著係數 (sticking coefficient) 視三族原子的嵌入速率而定。對於三族分子而言，通常在適當的基板成長溫度下，其基板黏著係數可以視為一，因此磊晶的速率是由三族分子源的通量來決定的。這個溫度對砷化鎵的上限是 650°C ，而對砷化鎵鋁與砷化鎵鎵是 550°C ，超過上限溫度，鎵與鎵便會顯著地脫離基板表面，而使黏著係數小於一。在不超過上限溫度的情況下，對三三五型三元化合物半導體如砷化鎵鋁等而言，三族蒸發源的通量比值決定了成長材料的莫耳成份比，而通量的總和則決定了成長材料的成長速率。對五族分子而言，只需要分子束通量超過三族原子即可。通常兩者之分子束的比值被稱為五三比。其比值通常都大於一，比值愈大，三族原子在基板上的遷移率愈小。此外，將五族砷直接加熱，蒸發的是四個砷原子構成的四聚物 (tetramer) 分子。四聚

物分子在磊晶成長時的嵌入效率最高僅有 50%^(6,7)。如果將四聚物分子再加以高溫裂解，可以產生由兩個砷原子構成的二聚物分子。二聚物分子不僅嵌入效率最高可達 100%，許多研究顯示也能達成較佳的磊晶品質^(6,7)。

除了成長時五三比值大於一，在加溫時也需要使用五族保護基板表面，因此五族材料源的消耗量較大。一般的分子束磊晶系統的五族材料都使用容量較大的努森管，大容量會導致溫度難以迅速達到穩定，蒸氣壓的控制較為困難。有兩種方法用以解決這個問題。較早使用的是氣態源的磊晶法，改用五族的氫化物，即砷化氫 (arsine) 與磷化氫 (phosphine)。這兩種氫化物在室溫之下為氣體，並已普遍用於有機金屬化學沈積法。一般以質流控制器 (mass flow controller) 或以控制閥 (control valve) 與壓力計 (Baratron gauge) 構成迴授式壓力控制系統，來調控進入氣體管 (gas K-cell) 的流量。圖 3 所示為 VG 的氣體管設計，氫化物氣體被加入一根細管，其管口刻出微米尺寸的小孔作為漏洩口。漏洩的氫化物進入加熱區裂解成砷的二聚物，再照射到基板。在加熱區中有氮化硼 (PBN) 的折流裝置 (baffle)，讓氫化物必須碰觸到氮化硼以裂解。在這種狀況下，二聚物的分子束通量係由加到氣體管的氫化物氣壓所決定。由於氣壓的控制是經由控制閥的電磁機械性地調控，速度遠比溫度的調控要快。通常在一、二秒的範圍即可達到大範圍的壓力變化，因此使用單一氣體管便可因應大範圍的分子束通量變化，這是使用加熱式的努森管所難以達成的。其次由於氣源鋼瓶是在系統之外，更換氣源並

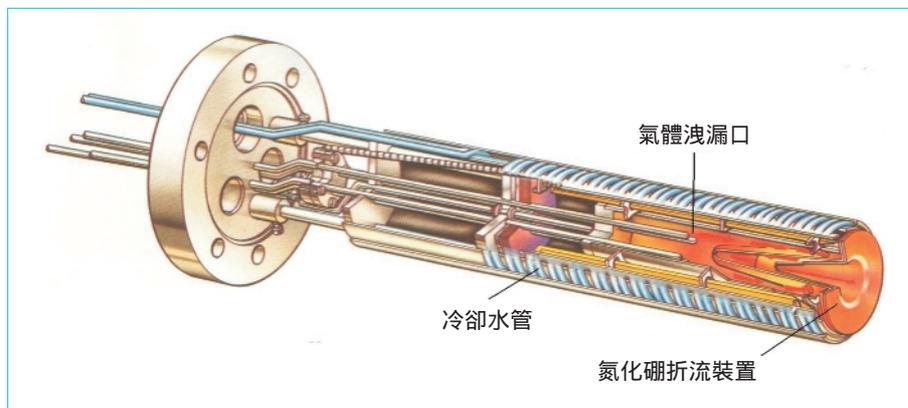


圖 3.
VG 的氣體努森管圖。

不需要破壞成長室的真空，可以避免下抽成長室的耗時程序步驟。此外，由於分子束磊晶在分子流的範圍進行，照射的二聚物直接行進碰撞基板，使用效率較高。實際使用的氣體流量遠較有機金屬化學沈積法為低。以 VG V-80H 系統而言，對應 $1 \mu\text{m/hr}$ 的成長，所需的砷化氫流量不超過 2 sccm，其消耗量大約只有有機金屬化學沈積法的十分之一到百分之一。而且因為裂解完全，所需處理的殘氣極少。唯一的缺點是裂解的過程會出現副產物氫氣，必須使用排氣式的幫浦，例如擴散幫浦或渦輪幫浦，加以抽除。而所使用幫浦的排氣量便決定了最大可使用的分子束通量。

另一種處理五族材料的方法是使用閥控裂解管 (valved cracker)。這種努森管也是藉著閥門的大小來調控分子束通量，所以也可以快速地達到分子束通量的變化。以砷的閥控裂解管為例，可分為三個部分：材料室、控制閥與裂解管。圖 4 所示即為一 Riber 的砷閥控裂解管。砷在材料室內蒸發成四聚物，然後經由控制閥進入裂解管，裂解成二聚物再照射到基板。加熱室的溫度固定不變，藉著控制閥的開口大小來調整分子束通量。為了避免砷的沈積，控制閥也必須加熱。磷的閥控裂解管則較為複雜，有兩個材料室，分別貯放紅磷以及由紅磷轉換

的白磷，再經由控制閥門進入裂解管。由於不必使用劇毒的氫化物氣體，而且沒有副產物氫氣所造成的分子束通量限制，閥控裂解管的使用相當普遍。

由於在分子流的真空範圍下進行磊晶成長，分子的平均自由路徑遠長於努森管到基板的距離，對於蒸氣壓低的分子束使用檔板 (shutter) 遮斷分子束便可停止照射。檔板的機械動作相當迅速，反應時間可達 100 ms 的範圍，低於成長一個單層的時間，因此可以得到非常陡峭的異質磊晶介面成長。事實上，在成長三五族材料的時候，還可以利用檔板控制成長中斷 (interruption) 三族分子，讓磊晶表面遷移平整，達到陡峭介面的目的⁽⁸⁾。從這種方式衍生出相位鎖定成長技術 (PLE)。此外，由於努森管溫度變化慢，為了成長成份漸變的介面層，可以利用檔板週期性地控制各個分子束的開啟時間比例，成長厚度變化的多層疊晶格 (chirped superlattice) 結構，以模擬成份漸變介面層⁽⁹⁾。

3. 基板操控器

成長室內以操控器 (manipulator) 安放基板。操控器可以調整基板面對努森管的角度。在基板的後面有熱片及熱電偶，用以控制基板的溫度。通常在真空中，熱電偶不一定與基板有良好穩定的接觸，

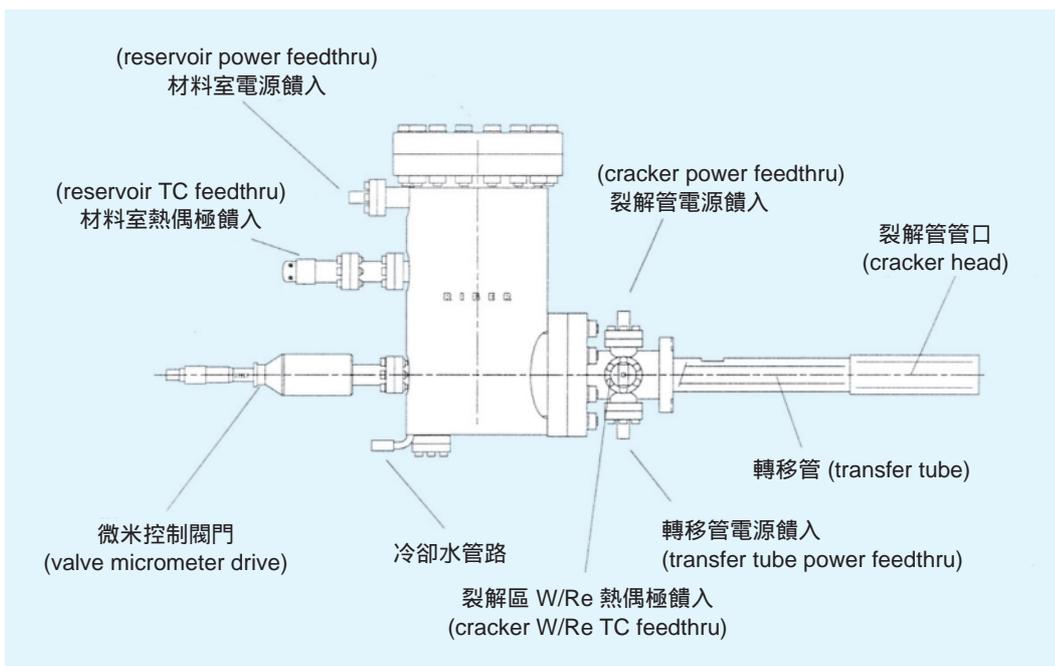


圖 4. Riber 的砷閥控裂解加熱管 (valved cracker) 圖。

其用途僅是提供一個溫控迴授所需的相對溫度訊號。基板的溫度通常還是使用紅外線溫度計 (pyrometer) 經由真空視埠 (view port) 量測。用以量測砷化鎵基板的紅外線溫度計通常使用矽二極體做為偵測器，僅量測矽的紅外線波段，再據以求得黑體輻射的對應溫度。如果在基板上成長不同成分的材料層，會對此波段的紅外線產生干涉現象，有可能造成溫度的不準確，因此溫度的測定應該在成長磊晶層之前進行。但同時這種干涉現象也可以用來做磊晶層厚度或結構的即時監控。通常會造成溫度的上下振盪，振盪週期與磊晶層厚度有關，這種震盪稱之為紅外線溫度計振盪 (pyrometer oscillation)⁽¹⁰⁾。

操控器的一端通常還會安裝一個裸露的離子真空計 (ion gauge)。轉動操控器可以把離子真空計放在基板的成長位置。打開努森管的檔板，將分子束照射到離子真空計，這時可以讀出由分子束所造成的等效壓力 (beam equivalent pressure, BEP)。由等效壓力可以調整努森管的溫度，以達到所需的分子束通量或不同分子束通量間之比值。這是一種有效控制磊晶層三族成分的方法。然而等效壓力與真實的分子束通量之間需要經過實際的實驗來校準。

4. 即時量測設備

成長室內通常至少有兩項量測設備，其一為四極質譜儀 (quadrupole mass spectrometer)，用以分析成長室的殘氣。質譜儀可以兼用為系統的測漏儀。另一則為反射式高能電子繞射儀 (RHEED)。由電子槍發射的電子束以極小的角度擦射基板表面，經繞射後在系統另一側的螢光幕產生圖案。由於擦射的角度很小，能夠參與繞射的原子僅有表層的原子。若考慮僅有表層的二維晶體結構，其在倒置空間的結構為柱狀結構。因此對於平整的表面，其 RHEED 繞射圖案應為柱狀，如圖 5 所示。對於粗糙的表面，電子束等效上看到三維的原子結構。三維原子結構的倒置晶格仍為三維點狀結構，因此其 RHEED 繞射圖案應為點狀。反射式高能電子繞射儀有多種功能，首先是確認基板表面的潔淨度。一般基板在大氣中裝置到系統中，表面會自然成長氧化層。在磊晶成長前必須以加熱的方式或以原子氫

予以清除。以砷化鎵為例，在清除前，由於表面氧化層的存在，無法觀察到柱狀甚至點狀的 RHEED 圖案。然而一旦表面氧化層蒸發殆盡，基板的原子露出，RHEED 圖案便會出現。因此藉著圖案可以確認基板表面的狀況。其次 RHEED 圖案也可以點狀或柱狀來判斷基板表面的平整度⁽¹¹⁾。對於基板表面而言，表層的原子結構會視成長的狀態發生表面重組 (surface reconstruction) 的現象，因此由觀察到的 RHEED 圖案可以由表面重組的情形確認。表面的狀態，通常是指五族過量或三族過量的情形⁽¹²⁾。最後，RHEED 圖案的反射點 (specular point) 強度與基板表面的粗糙度有關。當表面平整時，進行成長，可以藉由反射點強度的上下振盪，觀察到單層的成長，稱之為 RHEED 振盪 (RHEED oscillation)，每一個週期對應一個單層的成長。由週期可以估算成長速率⁽¹³⁾。

三、分子束磊晶在化合物半導體之應用

關於分子束磊晶在化合物半導體方面近期的發展的應用，舉兩例說明之。其一是銻化合物材料的成長與研究，其二是砷化銻 / 砷化銻鎵量子點的成長與研究。銻化合物半導體的應用，不僅在傳統的中、遠紅外線範圍，近年來在微波電子與光纖通信元件方面也逐漸受到重視。在電子元件方面，利用 InP/GaAsSb/InP 雙異質結構的異質界面雙極電晶體 (HBT)，可以避免繁複的基集極介面成分控制的問

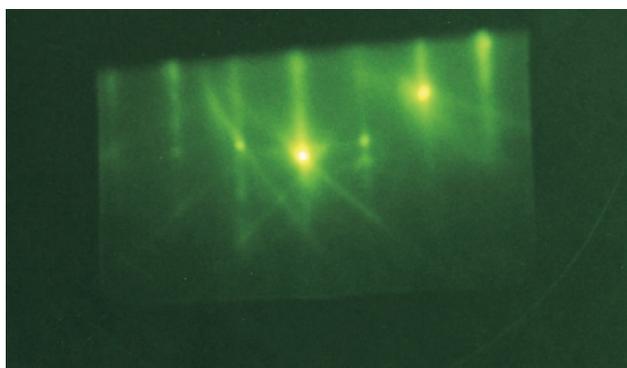


圖 5. 平整的表面，其所對應之 RHEED 繞射圖案為柱狀。

題。因為這是一種第二型的異質結構，沒有位障突起 (energy spike) 導致電流阻塞 (current blocking) 的問題^(14,15)。在光電元件方面，成長於 GaAs 基板之上的 GaAsSb/GaAs 第二型量子井，也具有作為 1.3 μm 雷射光源的可能。在含銻材料的分子束磊晶技術方面，也有銻的裂解加熱管，例如 EPI 的 Model 175 Standard Cracker。藉著控制裂解區的溫度，可以操控各種銻的分子束種類，包括由完全未裂解之銻的四聚物分子 (tetramer) 到二聚物分子 (dimmer)，甚至到完全裂解的銻單原子，以及他們的比例⁽¹⁶⁾。以下是我們成長 GaAsSb/GaAs 五層多量子井結構的實例。這是一種第二型的異質界面結構。長晶時基板溫度為 500 $^{\circ}\text{C}$ ，成長速率約 1 $\mu\text{m}/\text{hr}$ ，成長 GaAsSb 量子井厚度為 5 nm，GaAs 障壁層為 30 nm。圖 6 所示為銻砷化鎵 / 砷化鎵多層量子井的 X 光繞射圖譜，其中上面的實驗曲線與下面的模擬曲線相當地吻合，顯示樣品有相當好的磊晶品質。由模擬曲線可得銻砷化鎵中銻化鎵的莫爾分率為 0.33。我們也成長了銻砷化鎵 / 銻化鎵雙量子井雷射結構，其中銻砷化鎵量子井厚度增加到 7 nm，銻砷化鎵中銻化鎵含量為 0.34。圖 7 為所製作之寬面積雷射在室溫下的光輸出與注入電流圖，由圖中可得知其雷射起振電流密度為 210 A/cm^2 ，與目前文獻中銻砷化鎵 / 砷化鎵量子井雷射最好的結果相當⁽¹⁷⁾。而圖 7 中的插圖為雷射樣品的放光頻譜，其

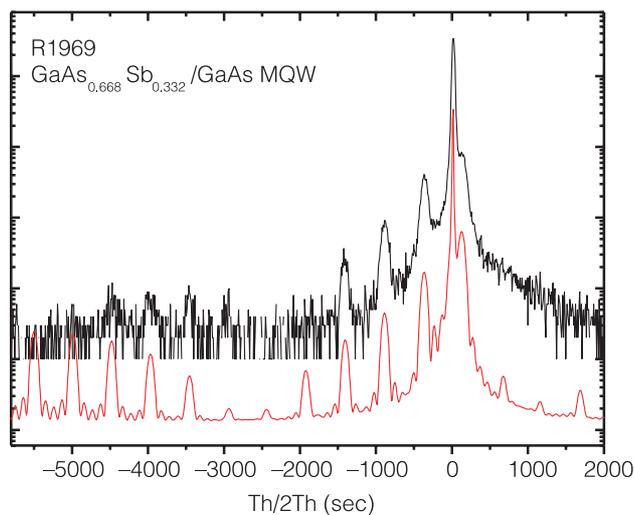


圖 6. 以固態源分子束磊晶所成長的銻砷化鎵 / 砷化鎵多層量子井的 X 光繞射圖譜。

共振腔長度為 1.54 mm，雷射放光波長在 1.28 μm 。

利用 Stranski-Krastanov 成長模態⁽¹⁸⁾所成長的自組成量子點 (self-assembled quantum dot) 奈米結構，近年來已經逐漸受到重視。成長於 GaAs 基板的 InAs/InGaAs 量子點雷射其波長已可超過 1.3 μm ⁽¹⁹⁻²²⁾，與 GaAsSb/GaAs 第二型量子井雷射⁽²³⁾、InGaAsN 量子井雷射同為未來可能用於光纖網路的低成本 1.3 μm 雷射。這種成長模態是利用 InAs 或 InGaAs 與 GaAs 的晶格不匹配累積應變，造成自組合的三維點狀結構。我們以氣態源分子束磊晶機於 n^+ 型 (100) 砷化鎵基板上成長砷化銻 / 砷化銲

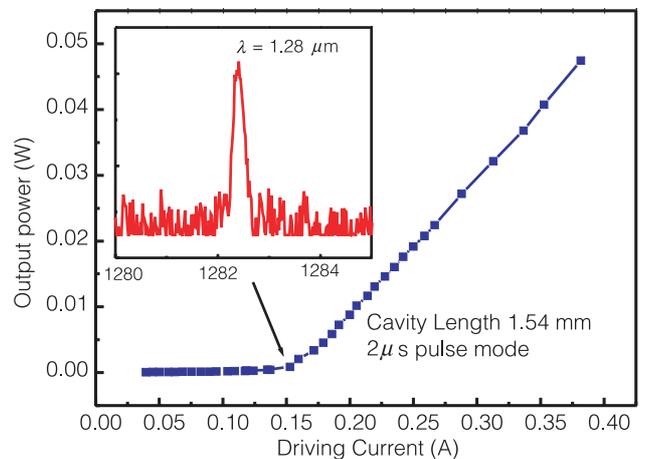


圖 7. 銻砷化鎵 / 砷化鎵量子井雷射的光輸出 注入電流圖譜。插圖為共振腔長度為 1540 μm 的雷射放光頻譜圖，其注入電流為起振電流。

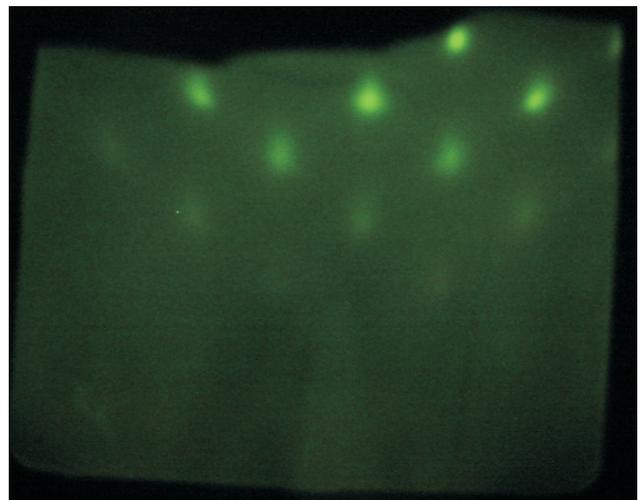


圖 8. 量子點形成時，RHEED 圖案成點狀的情形。

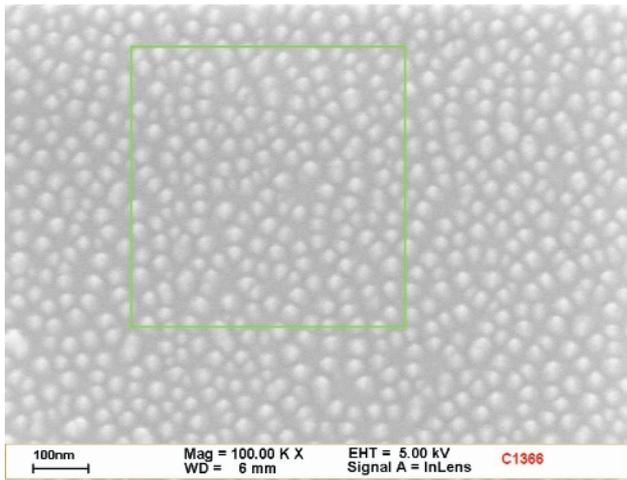


圖 9. 量子點 SEM 照片。量子點密度為 7.64×10^{10} ($1/\text{cm}^2$)。

鎵量子點與多層量子點雷射。成長量子點的長晶溫度為 500°C ，砷化銻的長晶速率為 0.085 分子層 ML/s，五族對三族的分子束通量比為 2。圖 8 為量子點形成時，RHEED 圖案成點狀的情形。圖 9 則為利用場發射掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀測量子點測試樣品的照片，其量子點密度為 $7.6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 。圖 10 為雷射樣品室溫下的光激螢光頻譜 (PL) 和不同電流灌入後的螢光頻譜。由 PL 顯示此雷射為基態 (ground state) 振盪，放光波長在 $1.307 \mu\text{m}$ ，已經超過 $1.3 \mu\text{m}$ 。

四、結語

本文介紹三五族化合物半導體分子束磊晶系統的裝置設備，包括真空系統、分子束源、基板操控器與即時量測設備。分子束磊晶技術由於具有超高真空、精密控制的分子束源，加上即時量測的 RHEED 裝置，已成為極重要的三五族化合物半導體的研究利器，尤其適於複雜量子結構的成長。本文同時也介紹了兩項近期的發展，包括含銻化合物半導體與砷化銻鎵量子點的成長與應用。

參考文獻

1. M. B. Panish and H. Temkin, *Gas source molecular beam epitaxy*, Springer-Verlag (1993).

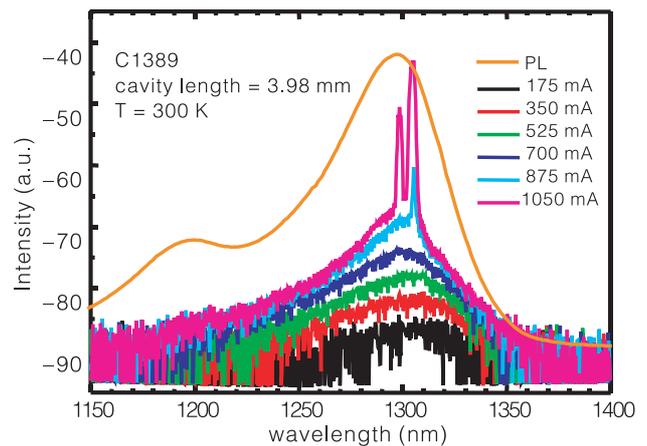


圖 10. 雷射樣品室溫下的 PL 與不同灌入電流的放光頻譜。

2. M. A. Herman and H. Sitter, *Molecular Beam Epitaxy*, 2nd ed., Springer-Verlag (1996).

3. A. Katz, *Indium Phosphide and Related Materials: Processing, Technology, and Devices*, Ch. 4, Artech House (1992).

4. T. Sakamoto, H. Funabashi, K. Ohta, T. Nakagawa, J. J. Kaway, T. Kojima, and Y. Bando, *Superlattices and Microstructures*, **1**, 347 (1985).

5. C. Sirtori, J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, *J. Quantum Electron.*, **33**, 89 (1997).

6. C. T. Foxon and B. A. Joyce, *Surf. Sci.*, **50**, 434 (1975).

7. C. T. Foxon and B. A. Joyce, *Surf. Sci.*, **64**, 293 (1977).

8. M. Tanaka and H. Sakaki, *J. Cryst. Growth*, **81**, 153 (1987).

9. L. G. Mourokh, L. Malikova, F. H. Pollak, B. Q. Shi, and C. Nguyen, *J. Appl. Physics*, **89**, 2500 (2001).

10. A. J. SpringThorpe and A. Majeed, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8**, 266 (1990).

11. A. Y. Cho, *J. Vac. Sci. Technol.*, **8**, S31 (1971).

12. A. J. SpringThorpe, T. P. Humphreys, A. Majeed, and W. T. Moore, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 2138 (1989).

13. J. H. Neave, B. A. Joyce, P. J. Dobson, and N. Norton, *Appl. Phys. A*, **31**, 1 (1983).

14. C. R. Bolognesi, M. W. Dvorak, O. Pitts, S. P. Watkins, and T. W. MacElwee, *2001 IEDM Technical Digest*, 35.2.1 (2001).

15. C. R. Bolognesi, N. Matine, M. W. Dvorak, X. G. Xu, and S. P. Watkins, *Proceeding of 11th IPRM*, 63 (1999).

16. Y. Rouillard, B. Lambert, Y. Toudic, M. Baudet, and M. Gauneau, *J. Cryst. Growth*, **156**, 30 (1995).

17. S. W. Ryu and P. D. Dapkus, *Electron. Lett.*, **36**, 1387 (2000).

18. J. A. Venables, G. D. T. Spiller, and M. Hanbuecken, *Rep. Prog. Phys.*, **47**, 399 (1984).

19. D. L. Huffaker and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 520 (1998).

20. D. L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O. B. Shchekin, and D. Deppe, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2564 (1998).

21. G. Park, D. L. Huffaker, Z. Zou, O. B. Shchekin, and D. Deppe, *IEEE Photonics Technology Letters*, **11**, 301 (1999).
 22. Y. Qiu, P. Gogna, S. Forouhar, A. Stintz, and L. F. Lester, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3570 (2001).
 23. N. Tansu and J. L. Mawst, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14**, 444 (2002).
-

林浩雄先生為國立台灣大學電機工程博士。現任國立台灣大學電機系暨電子工程研究所教授。

劉珀璋先生畢業於國立台灣大學電機系。現正就讀於國立台灣大學電機所博士班。

張福裕先生畢業於國立台灣大學電機系。現正就讀於國立台灣大學電機所博士班。

Hao-Hsiung Lin received his Ph.D. in electrical engineering from National Taiwan University. He is currently a professor in the department of electrical engineering and graduate institute of electronics engineering at National Taiwan University.

Po-Wei Liu received his B.S in electrical engineering from National Taiwan University. He is a Ph.D. candidate in the department of electrical engineering at National Taiwan University.

Fu-Yu Chang received his B.S in electrical engineering from National Taiwan University. He is a Ph.D. candidate in the department of electrical engineering at National Taiwan University.