



交大材料系電子材料研究介紹

• 潘扶民

自巴丁、布拉頓、蕭克利與美國貝爾實驗室的研究人員於 1947 年發明了第一個電晶體，半導體材料開始對人類文明形成新的科技革命。如今，電子產品微小化已然成為電子產業不可逆轉的趨勢，現在幾乎任何產業，皆必須應用到微電子科技所提供便捷、強大的運算或光電顯示、通訊功能等等，因此微電子科技已被視為人類科技文明最重要的一個環節。

由於電子產品的製造是許多不同材料製程的集成，除了半導體材料外，尚包括了無機材料（如金屬與陶瓷材料），與有機材料（如環氧樹脂與液晶材料），所以一種電子產品的製造，往往牽涉到非常複雜的材料特性，匹配與製程整合的問題；尤其是系統微小化時，次微米尺寸的材料物化光電特性與塊材常有差異。因此為了開發先進產品、解決製程瓶頸，必須對相關的電子材料進行廣泛深入的研究。交大材料系多數老師在電子材料研究領域裡或多或少皆有鑽研，在本文裡，我們僅就從事半導體與無機電子材料研究的老師作簡單的介紹，依序為張翼教授、張立教授、陳智教授、吳耀銓教授、潘扶民教授、呂志鵬教授與謝宗雍教授。

張 翼教授

張翼教授包括三五族（III-V）半導體之高頻覆晶封裝；先進的磷化銮單異質及雙異質界面雙載子電晶體，與砷化鎵變質型高電子遷移率電晶體元件技術，及氮化鎵高功率高電子遷移率功率電晶體。

國內三五族半導體工業，近年來人才輩出。唯三五族半導體工業尚屬新興產業，量產技術仍需研究改進，且目前國內產業業績皆尚未達量產規模，因此無法從事先導性產品技術的研發，尤其在先導性毫米波元件及積體電路、無論在 IC 技術或構裝技術之研發上更付之厥如。

張翼教授結合校內外多位教授，擬以新製程帶動新製程機器之研究，同時輔助業者配合發展相關機械設備，從事 60GHz 以上砷化鎵元件及構裝技術之開發，

以期對國內三五族半導體工業之整體競爭力有所助益。由於 60GHz 的頻段已經進入毫米波範圍，傳統上使用金線連接的封裝方式已經不再適用，覆晶封裝 (flip chip packaging) 由於使晶粒直接朝下且使用錫鉛球或金球取代金線的方式，可大幅將低封裝體積及降低電感，將是未來高頻封裝的趨勢。本研究目標主要為發展 60GHz 之高頻 IC 覆晶構裝技術，並配合交大電資中心無線通訊研發中心之模擬軟體、構裝及測試設備，建立一完整的高頻三五族半導體之製程構裝技術及設備研發中心，並建立一健全的組織架構和一優良的研究環境。本研究將發展 60GHz 的低噪音及高功率 PHEMT 元件，並分析共面波導傳輸線之基本模態與高階模態分析、覆晶構裝與基板間凸塊結構之電器特性分析，與轉態電路設計和垂直連接線分析等。本研究並進行砷化鎵覆晶銅製程整合，低介電材料研發、厚膜光阻及無鉛錫球等技術之建立。另外也針對高頻覆晶封裝的特殊需求，改良現有的覆晶構裝設備，使之適合於三五族材料的製程，這將對我國覆晶封裝技術的發展有極大的貢獻。

此外，張翼教授在先進的磷化銮單異質及雙異質界面雙載子電晶體與砷化鎵變質型高電子遷移率電晶體元件技術亦有深入的研究。所製作之次微米磷化銮雙異質界面雙載子電晶體將具有 200GHz 之最大震盪頻率，而奈米級之砷化鎵變質型高電子遷移率電晶體將具有 500GHz 之最大震盪頻率。他以磷化銮異質界面雙載子電晶體技術平臺，研發出符合毫米波段雙模無線網路的 60GHz 高整合度的單晶無線積體電路收發器，可整合於毫米波段應用之電路。

張翼教授在相關電子材料研究工作之一是研究下世代 (3G、4G 或更高) 無線通訊基地台關鍵零組件 - 氮化鎵高功率高電子遷移率功率電晶體 (Power HEMT)，以供未來數位無線通訊系統基地台使用。

張立教授

張立教授所研究之電子材料以氧化鋅為主。氧化鋅是寬能隙之透明半導體材料(能隙=3.37eV)，因激子結合能大，故雷射效率佳，臨界電壓低，可做為藍光及紫外光雷射二極體或是藍光發光二極體之半導體材料，為了達到元件品質，必須製作出缺陷密度低之磊晶材料。

張教授過去曾經研究過奈米結構之氧化鋅成長現象，發現量子效應要在尺寸小於 5nm 才能顯現。目前採用低溫化學氣相沉積法與雷射蒸鍍法，研究在矽單晶上成長磊晶氧化鋅之適當條件，並研發添加有第三種元素之磊晶氧化鋅三元系統

(ternary system) 之成長方法。研究中需使用大量的分析技術，如電子顯微鏡觀察晶體成長型態、缺陷密度與特徵、界面晶格排列，X 光繞射儀測定晶向及磊晶特徵，二次離子質譜儀及 Auger 電子能譜儀量測摻雜濃度，從而了解磊晶成長機制，並探討其對相關之結構性質、電性及發光等特性之影響。張教授實驗室未來將探討全透明超晶格氧化物量子點製作的可能性。除此之外，氧化鋅添加鎵或鋁，使其電阻係數降低，可製作成透明導電材料，應用於平面顯示器與太陽電池等。

陳 智教授

陳智教授的重點研究方向有二：覆晶銲錫接點的電遷移研究與原子層化學沈積 (Atomic Layer Chemical Vapor Deposition) 技術開發，分別敘述如下。

首先，由於電子元件輕薄短小與功能日新月異的趨勢下，覆晶封裝 (flip chip packaging) 已然成為高階電子元件產品之主要封裝方式。

如今電路設計的要求，每個銲錫球將傳輸約 0.2A 之電流，在不久的將來將會高至 0.4A，以 50 μm 直徑的銲錫球來計算其電流密度將高達 $104\text{A}/\text{cm}^2$ ，在元件操作溫度 100 °C 下 (已超過銲錫球熔點絕對溫度之一半以上)，電子遷移將對銲錫球之可靠度造成危害。

陳教授實驗室的研究針對覆晶封裝中電子遷移對銲錫球之可靠度所造成之危害進行研究並提出解決之道，同時找出銲錫材料有關之電遷移參數如電遷移速率門檻電流與電遷移活化能以作為工業界之參考。

陳教授的研究主要利用覆晶封裝結構 (flip chip solder joints) 與銲錫薄膜 (solder blech structure) 結構，配合 ANSYS 電腦模擬，紅外線溫度量測 (infrared microscopy)，原子力顯微鏡 (atomic force microscopy) 來研究銲錫可靠度與物理特性。其研究成果計分為五大項：一、銲錫球溫度偵測，二、ANSYS 電流分佈，三、共晶錫鉛銲錫薄膜 (solder blech structure) 電遷移研究，四、錫銀銅 (SnAg3.8Cu0.7)，銲錫薄膜 (solder blech structure) 電遷移研究，五、同步輻射對純錫薄膜之研究。

其次，根據 2001 年的國際半導體 roadmap 指出：銅製程中銅導線的擴散阻隔層如鈦、鈦、鎢，雖然還是以使用化學氣相沈積 (CVD) 與物理氣相沈積 (PVD) 為主流，但原子層化學沈積因具有優越的覆蓋能力與厚度控制，將會是沈積阻隔層更理想的方法。目前陳教授實驗室正在研究以原子層化學沈積來鍍 TaN，用於

diffusion barrier 及 metal gate 的研究，做為奈米積體電路製程技術的應用。

吳耀銓教授

吳耀銓教授實驗室的研究，主要是動力學在材料製程上的研究及運用。現階段主要的研究為晶圓接合技術及薄膜電晶體液晶顯示器 (TFT-LCD) 的薄膜電晶體 (TFT) 技術。

吳教授在 TFT 主要研究內容為低溫複晶矽 TFT (low temperature poly-Si, LTPS) 技術。現今非晶矽 (amorphous Si, a-Si) 薄膜電晶體技術為 LCD 的主流，但無法滿足未來平面液晶顯示器之功能要求。主要的原因，在於 a-Si 之高寄生電容 (parasitic capacitance)、本質上的低載子遷移率 (carrier mobility)、及低開口比 (aperture ratio) 且其製程與 CMOS 不能匹配。若用複晶矽 (poly-Si) 來取代 a-Si，則可解決上述各問題，並提供再結晶製程良好的穩定度，使得顯示驅動系統 (driver system) 可被整合於玻璃基板上。由於使用玻璃基板的關係，操作溫度不能超過玻璃基板所能承受的溫度 (500)。

目前最常見的低溫再結晶製程方式包括準分子雷射退火 (excimer laser annealing, ELA) 與金屬誘發非晶矽結晶化 / 金屬誘發側向非晶矽結晶化 (metal induced crystallization of amorphous Si / metal induced lateral crystallization of amorphous Si) (MIC / MILC)。由於 ELA 利用雷射照射在 a-Si 局部區域、短時間加熱不會使玻璃基板軟化，是現今 LTPS 量產之主要技術。不過 ELA 機台昂貴，形成的 poly-Si 晶粒大小 / 電性不均勻，表面粗糙度太大，無法將驅動器 (driver) 做在玻璃基板上。而 MIC 與 MILC 正可解決上述的問題。

MIC/MILC 技術是利用金屬 (大都是用 Ni 金屬) 在低溫下與 Si 反應形成金屬矽化物進而誘發非晶矽結晶。過程中，首先，以低溫 CVD 在玻璃基板上鍍製 a-Si 膜，爾後利用 PVD 在 a-Si 上鍍一層金屬薄膜，接著在 550 下進行熱處理，即可誘發出多晶矽膜，可用以製造薄膜電晶體 (TFT)。其中 MILC 所誘發出的 poly-Si，為沿著特定方向排列之長形針狀晶粒，順著其長軸方向有非常好的電性。

吳教授實驗室同時也進行晶圓接合技術研發，所謂晶圓接合就是將兩片以上的晶圓接在一起，目前已經廣泛地運用於各種半導體的結合，如製作 SiO₂ 薄層於 Si 晶圓與單晶 Si 薄層之間而形成 SOI 晶圓。晶圓接合也可以將兩個相同或不同材料結合在一起，可用在光電材料的集成 (integration) 上，是 OEICs (optoelectronic

integration circuits) 和 MMICs (monolithic microwave integrated circuits) 的關鍵技術及基礎。接合時，沒有磊晶時晶格匹配 (lattice match) 的問題，也沒有缺陷相互傳播的問題。

在此研究領域，吳教授實驗室主要有兩的研究方向：一為配合工業界，做不同晶圓之接合及應用，吳教授歷年來的計畫包括高亮度透明基版的 LED，SOI 及接合在氧化鋁上成長之 GaN 與銅 / 矽基板及後續之剝離等。二則為相關技術的基礎學理研究，例如分析原子在接合界面移動的行為特性，以探討晶圓接合的動力學，這是現今該領域研究者急欲瞭解者。

潘扶民教授

目前 IC 技術發展的一個極重要課題是降低 IC 積體電路連線層的 RC 常數，以 Cu 金屬取代 Al 金屬已是一個既成的趨勢，而當積體電路技術小於 70nm 時，金屬間介電材料介電常數(k)值必須小於 2.1，但是 IC 界目前對金屬間介電層材料的選擇卻依然沒有共識，其中重要的原因之一是現有的 low-k 材料薄膜可靠性尚不足以應用到生產線上。

而多孔性介電材料成為未來世代超低介電 (ultralow-k) 材料的最終選擇已逐漸成為一般研發者的共識。如果將傳統的 SiO₂ 薄膜製作成多孔材料，理論上，其製程不但與現有 IC 的製程技術相容，並可以有遠小於 2.0 的介電係數。潘教授實驗室經由溶膠 - 凝膠反應 (sol-gel reaction) 將四氧烷基矽水解，混合界面活性劑，塗佈此凝膠溶液於矽晶圓上，乾燥並鍛燒後，形成奈米孔薄膜，薄膜的孔洞大小在 5-7 nm 大小，孔洞率在 40 -70% 之間。此 np-SiO₂ 薄膜在經過適當氣相疏水性處理與氫電漿處理後，k 值可降至 1.5 以下。潘教授實驗團隊所配製之自組裝 np-SiO₂ 薄膜的孔洞大小在 3-7nm 範圍，孔洞比率在 40 -70% 之間。初長成之 np-SiO₂ 薄膜之介電常數往往遠大於 4.0，但在經過適當處理後，k 值可降至 1.5 以下。

由於奈米孔介電膜被普遍認為是 70 nm 技術所需的 ultralow-k 介電薄膜，其能被實際整合於量產化的 IC 製程上估計是在 2007 年以後，潘教授期望開發出來分子自組裝 np-SiO₂ 薄膜銅鑲嵌製技術可提供業界一種先進，可行的 ultralow-k IMD 製程技術，可適時切入四年後(2007 年) 65 nm 以下的 IC 量產製程應用。

潘教授亦進行奈米碳管場發射顯示器材料的研發，自奈米碳管被發現以來，其被做為場發射平面顯示器中之電子發射源的應用便成為一個重要的研究領域，

由於 CNT 優異的場發射特性，如很高的長寬比 (aspect ratio)、非常小的尖端曲度半徑、極好的化學惰性與熱穩定度，低起始電壓，高場發射電流密度，使其在小型、可攜式平面顯示器技術領域中，被視為極具應用潛力的重要技術。

潘教授實驗室在六吋矽基板上，製作出陽極氧化鋁 (anodic aluminum oxide, AAO) 膜，並以 AAO 膜之奈米孔洞陣列結構作為版模，製作出高長寬比 (aspect ratio) 及最佳化密度之奈米碳管 (carbon nanotube, CNT) 陣列，以做為平面顯示器之場發射電極，並製作大面積 CNT 場發射三極體結構，藉由整合 AAO、CNT 製程技術與現代 IC 製程技術，展示 CNT 在平面顯示器的實用潛力。

呂志鵬教授

呂志鵬教授是材料系的新生力軍，甫於九十三年八月由美返國就職，呂教授在美期間曾服務於多家國際知名的半導體公司，如 IBM、Motorola 及 Intel 等公司，從事半導體材料及製程研究開發達十三年之久，積體電路技術經驗十分豐富。

在 Intel 公司服務時，任職後段連線 (backend interconnects) 經理，從事 CPU 製程技術中之低介電材料開發及整合，包括了 90/65/42 nm 等技術節點之後段技術研發及轉移，並積極參與產學合作計畫。呂教授的研究方向著重於微電子、光電、奈米及生物科技中材料、製程及整合、連接 / 封裝之探討。目前研究題目包括 (一) 銅及銅合金薄膜電阻於微電子應用之探討，(二) 二相式低介電質材料之探討，(三) 超薄膜及奈米材料特性之測量及探討。

郭正次教授

郭正次教授之研究主要是在材料之電漿輔助化學汽相沉積 (Plasma assisted chemical vapor deposition) 製程技術方面。曾在下列著名國際研究單位從事材料製程技術之研究，如美國 Ames Laboratory-Department of Energy, 德國 Berlin Technical University, 日本國立東北大學及新竹工業技術研究院。

郭教授最早從事形狀記憶合金之製程研究，接著從事超硬寬能隙光電薄膜 (Superhard and wide-band gap optoelectronic thin film materials) 之合成技術，包括 TiN, TiC, TiCN, Al₂O₃, C₃N₄ 和鑽石薄膜製程。其中 C₃N₄ 是世界上並不存在的全

新材料，其機械剛性與光電特性預計可以跟鑽石相抗衡。近年來則偏重在奈米結構材料之製程技術。依近年來的研究結果，與本系朝春光教授合著一本有關奈米結構材料製程技術之新書《奈米結構材料科學》，由全華科技圖書公司今年出版。該書是國內有關奈米結構材料之少數本土著作之一，深入淺出，是有意對奈米科技進一步了解的最佳參考資料。

目前主持國家奈米計畫。計畫內容大致如下：儘管碳基奈米結構材料有很大的應用潛力，但在操控自行組合之奈米結構之進展，以及對結構 - 性質關係之基礎了解，仍然相當有限。郭教授的材料奈米製程實驗室擬經由實驗和學理模擬，開發自組裝製程技術，用以操控包覆合金碳奈米結構陣列。在此，包覆合金碳奈米結構陣列，是擬：(a) 藉包覆磁性合金，設計具奈米解析度之垂直磁性記錄媒體（依文獻報導顯示，當記錄容量 $>40 \text{ Gbit/in}^2$ 時，水平排列之磁性記錄媒體可能已經到達物理學極限），(b) 藉包覆適當相變化合金，設計具奈米解析度之相變化型記錄媒體。每一個或多個奈米結構可以做為一個最小的記憶單位，如此可以達到奈米解析度記錄媒體之目標。

為著利用包覆合金碳奈米結構之獨特特性，做為奈米解析度記錄媒體元件，也將藉助現代積體電路 (IC) 製程技術，用以開發高度有序且週期排列之碳基奈米結構陣列之製程。經由配合積體電路 (IC) 製程技術，則碳奈米結構才易整合成為各種功能元件與實用系統。利用現代微影技術和代表性蝕刻製程，目標是成長奈米結構在定義的百奈米以下面積上。此法，合金觸媒薄膜首先沉積在指定的圖案面積，接著用適當的蝕刻製程以形成觸媒小島。如此則高度整齊排列之包覆合金碳奈米結構陣列，可以用微波電漿化學汽相沉積法 (MPCVD) 和電子 γ 旋共振化學汽相沉積法 (ECR-CVD) 或其他化學汽相沉積法 (CVD)，沉積在觸媒小島上。視需要的尺寸大小，這些合金觸媒面積可以用光學微影術或電子束微影術定義之。當這些奈米結構，依精密設計之圖案幾何形狀，形成群集，則個別的碳奈米結構之磁電特性，便可有效放大和決定之。

有關製程之模擬，將針對反應室級大小做計算，開發模擬法，合併 DSMC (direct simulation Monte Carlo) 和 PIC (particle-in-cell) 混合法，模擬在電漿環境下之稀薄氣體動力學。進而，將針對原子級大小做計算，利用分子動力學 (MD)，模擬奈米結構之自行組合機制。有關結構 - 機械性質之模擬，缺陷，包括外形和化學缺陷，可能是一項重要之結構因素，因為奈米結構之缺陷對於結構之行為、可靠度和穩定度佔重要地位。

謝宗雍教授

電子封裝技術是謝宗雍教授主要的研究領域之一，電子封裝雖屬電子產業之下游，但其對產品之壽命與可靠度有決定性之影響。電子封裝技術目前的研究項目包括有機電致發光元件(organic light-emitting devices, OLED)之密封膠材之開發與封裝技術之開發與高頻通訊元件的覆晶(flip chip)封裝技術，前者利用奈米高分子複合材料的觀念製備具有高阻水阻氧性質之密封膠材以應用於 OLED 元件之氣密性封裝，同時也開發能應用於可撓式 OLED (flexible OLED) 元件之高透明、高阻水性質之封膠材料。覆晶封裝技術之研究包括高深寬比之接合凸塊(bump)之製備、凸塊電鍍製程技術、UBM/TSM 材料與性質、凸塊電遷移及機械性質之分析等。

光電材料之製備與性質分析謝教授另一項研究主力，研究項目包括光記錄媒體與白光 LED。光記錄媒體之研究含藍光記錄層材料、高記錄密度技術、超解析層(super-resolution)材料、光開關(optical switch)材料等；白光 LED 則運用奈米複合材料之觀念，使原本發黃綠光的 ZnO 亦能同時產生藍光光譜而成為發白光之材料，此一研究藉著奈米材料產生之眾多界面調變材料能帶(energy band)結構，進而調變材料之光學性質，亦印證奈米材料在未來之工程之應用潛力。

結語

上文簡述了交大材料系數位教授在半導體及無機電子材料方面的研究工作，報導的研究內容多為近年的研究成果與未來研究目標。材料系尚有多位老師從事有機電子材料的研究工作，有興趣的讀者可以參考交大材料系網站上的資料，或與相關老師聯繫。

潘扶民教授小檔案：

學歷： 美國加州大學(Irvine)物理化學博士
東海大學化學系理學士

經歷： 國科會國家奈米元件實驗室研究員兼任副主任
工研院工業材料研究所研究員
美國西北大學博士後研究

現職： 交通大學材料科學與工程學系教授