

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

新穎材料開發計畫--強化雷射分子束氧化物磊晶平台 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 99-2119-M-009-003-
執行期間：99年08月01日至100年10月31日
執行單位：國立交通大學電子物理學系(所)

計畫主持人：莊振益
共同主持人：張立、朱英豪
計畫參與人員：學士級-專任助理人員：林彥貝

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文
國外研究心得報告

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 101 年 01 月 31 日

中文摘要： 複雜性氧化物材料具有多樣之結構與物理性質，可以形成簡單之二元氧化物，亦可形成複雜之多元氧化物，同時包含許多特殊之優良性質，舉凡超導特性、巨磁阻特性、焦電、壓電、介電、半導、導電、磁性、光性等，幾乎包含所有物理性質。氧化物領域之研究目前正蓬勃發展，期以為下一個世代之電子元件提供另一種解決方案。

本計劃第一年獲補助建立雷射分子束磊晶，藉以提升我國學界與業界在氧化物磊晶研發之實力。建立之系統雷射分子束磊晶平台，具有高工作氣壓之 RHEED 進行臨場薄膜之成長，此一磊晶成長平台之建立，可以快速提昇我國於氧化物磊晶成長之基礎能力，可以繼續利用此平台研發新穎與新功能之材料。第二年補助用以延伸此平台之完整性與功能性，在此系統上增加高真空掃描系統，此系統除了可以解決目前成長系統研發速度受限之缺點，亦可提供另一個快速與安全平台，可以讓成長我之高品質磊晶薄膜立即進行特性之量測，此兩部分相輔相成，可以將我國氧化物磊晶之技術更往前邁進一步。

計畫第三年延續已建構氧化物磊晶平台宗旨，利用所獲補助與前期學習經驗，建立第二套完整之氧化物磊晶研發與分析平台。建立之超高真空雷射分子束磊晶系統除提供國內外氧化物尖端研究領域之先進製程與樣品外，更進一步著重於奈米氧化物結構與多層膜材料系統之研發與研究。建立之掃描探針系統，配合以量測為主之研究群，更進一步延伸與加速氧化物薄膜材料的研發與研究腳步。本研究團隊成功將快速掃描探針系統與雷射分子束磊晶系統穩定整合，建立最快速的檢測平台，部份研究成果已於今年度被世界知名期刊接受或已將寫為論文等待發表。配合雷射分子束磊晶之研究與材料開發也準備以許多論文形式發表。

此系統現已成為國內成長氧化物薄膜之模範平台，進而厚植本國在此領域研發之能力。此一平台亦提供業界快速取得多功能與高品質之氧化物磊晶，有助於縮短業界開發新製程與元件之研發時間，同時間由於各種氧化物搭配亦由此一平台提供，亦提供業界元件製程與整合所遇到困難之解決方案。

中文關鍵詞： 雷射分子束磊晶、氧化物薄膜、多功能奈米結構材料、綠能壓電材料、多鐵材料、多鐵壁域

英文摘要： Oxide materials are gifted systems, providing a variety of physical properties, including superconducting, ferroelectric, piezoelectric,

magnetic, CMR, optical, conducting and et al. The combinations of these properties provide new solutions of next-generation electron devices. The goal of this project is to build up a laser molecule beam epitaxy (MBE) system to fabricate epitaxial oxide heterostructures. Because it has the advantages of high quality epitaxial growth, fast optimization, and good composition and interface control, it has been a core technology on developing oxide heterostructures for many years. Such a platform will greatly promote the ability of studying oxide electronics in academia and industry. Such a system will help us to build up a database for oxide epitaxial growth and to understand the fundamental physics in behind. Such a platform can be used to develop new functional oxide materials and heterostructures. It can also be used to provide high-quality epitaxial oxide films for research groups to do other detail measurements. It can also be used as a platform for industry to develop new oxide devices. It will be an efficient approach to integrate research energy in academia and industry.

First year, we have built up the Laser-MBE system, and it shows the capability to control the film growth. Second year we have built up a high vacuum scanning probe microscope which will provide us an environment to in-situ characterize the quality of the substrates, and to understand the properties of our new functional oxide epitaxial films. The third year we have built up the second Laser-MBE system combined with a fast scanning probe microscopy. The combination of laser MBE and SPM is a powerful and fast tool to develop the basic understanding of oxide films, which will be useful and helpful to academic research and industry.

英文關鍵詞： laser MBE, epitaxial, complex oxide, multifunctional nanostructures, multiferroic materials

中文摘要

複雜性氧化物材料具有多樣之結構與物理性質，可以形成簡單之二元氧化物，亦可形成複雜之多元氧化物，同時包含許多特殊之優良性質，舉凡超導特性、巨磁阻特性、焦電、壓電、介電、半導、導電、磁性、光性等，幾乎包含所有物理性質。氧化物領域之研究目前正蓬勃發展，期以為下一個世代之電子元件提供另一種解決方案。

本計劃第一年獲補助建立雷射分子束磊晶，藉以提升我國學界與業界在氧化物磊晶研發之實力。建立之系統雷射分子束磊晶平台，具有高工作氣壓之 RHEED 進行臨場薄膜之成長，此一磊晶成長平台之建立，可以快速提昇我國於氧化物磊晶成長之基礎能力，可以繼續利用此平台研發新穎與新功能之材料。第二年補助用以延伸此平台之完整性與功能性，在此系統上增加高真空掃描系統，此系統除了可以解決目前成長系統研發速度受限之缺點，亦可提供另一個快速與安全平台，可以讓成長我之高品質磊晶薄膜立即進行特性之量測，此兩部分相輔相成，可以將我國氧化物磊晶之技術更往前邁進一步。

計畫第三年延續已建構氧化物磊晶平台宗旨，利用所獲補助與前期學習經驗，建立第二套完整之氧化物磊晶研發與分析平台。建立之超高真空雷射分子束磊晶系統除提供國內外氧化物尖端研究領域之先進製程與樣品外，更進一步著重於奈米氧化物結構與多層膜材料系統之研發與研究。建立之掃描探針系統，配合以量測為主之研究群，更進一步延伸與加速氧化物薄膜材料的研發與研究腳步。本研究團隊成功將快速掃描探針系統與雷射分子束磊晶系統穩定整合，建立最快速的檢測平台，部份研究成果已於今年度被世界知名期刊接受或已將寫為論文等待發表。配合雷射分子束磊晶之研究與材料開發也準備以許多論文形式發表。

此系統現已成為國內成長氧化物薄膜之模範平台，進而厚植本國在此領域研發之能力。此一平台亦提供業界快速取得多功能與高品質之氧化物磊晶，有助於縮短業界開發新製程與元件之研發時間，同時間由於各種氧化物搭配亦由此一平台提供，亦提供業界元件製程與整合所遇到困難之解決方案。

關鍵字: 雷射分子束磊晶、氧化物薄膜、多功能奈米結構材料、綠能壓電材料、多鐵材料、多鐵壁域

Abstract

Oxide materials are gifted systems, providing a variety of physical properties, including superconducting, ferroelectric, piezoelectric, magnetic, CMR, optical, conducting and et al. The combinations of these properties provide new solutions of next-generation electron devices. The goal of this project is to build up a laser molecule beam epitaxy (MBE) system to fabricate epitaxial oxide heterostructures. Because it has the advantages of high quality epitaxial growth, fast optimization, and good composition and interface control, it has been a core technology on developing oxide heterostructures for many years. Such a platform will greatly promote the ability of studying oxide electronics in academia and industry. Such a system will help us to build up a database for oxide epitaxial growth and to understand the fundamental physics in behind. Such a platform can be used to develop new functional oxide materials and heterostructures. It can also be used to provide high-quality epitaxial oxide films for research groups to do other detail measurements. It can also be used as a platform for industry to develop new oxide devices. It will be an efficient approach to integrate research energy in academia and industry.

First year, we have built up the Laser-MBE system, and it shows the capability to control the film growth. Second year we have built up a high vacuum scanning probe microscope which will provide us an environment to in-situ characterize the quality of the substrates, and to understand the properties of our new functional oxide epitaxial films. The third year we have built up the second Laser-MBE system combined with a fast scanning probe microscopy. The combination of laser MBE and SPM is a powerful and fast tool to develop the basic understanding of oxide films, which will be useful and helpful to academic research and industry.

Keywords: laser MBE, epitaxial, complex oxide, multifunctional nanostructures, multiferroic materials

前言

本年度計劃主要目標為延續第一與第二年計畫補助，利用本研究團隊於近年建立之經驗與能力，進而建立第二套雷射分子束氧化物磊晶平台，圖 1 為平台實驗室之建構平面完成圖，圖 2 為平台主系統，目前此平台持續提供高品質之氧化物磊晶薄膜於國內外超過 20 個研究團體使用，第一二年重要成果包含於國際知名期刊如 Science, Nature Materials 期刊發表多篇論文，成果豐碩，平台功能已達世界級之水準。第三年為滿足國內與業界日漸增進之需求及減輕第一套氧化物磊晶平台之負擔，計畫補助用以建構台灣鎧柏公司之氧化物磊晶平台，配合本實驗室與研究團隊之專業經驗，本團隊迅速整合高氧壓用 RHEED 於系統之上，目前已架設完成，並以開始使用。為加強此平台之研發能力，計畫增購一套高能量準分子雷射，可用以製作低雷射吸收率材料系統之研發，如圖 3 所示，為了擴展其功能性，以利平台之對於新氧化物磊晶薄膜之開發，並提供新的功能性與快速檢測之平台，計畫並添購快速掃描式探針系統(Bruker Multimode XIII)，目前亦已完成建構，如圖 4 所示，並開始使用，提供平台使用者快速檢測之功能。

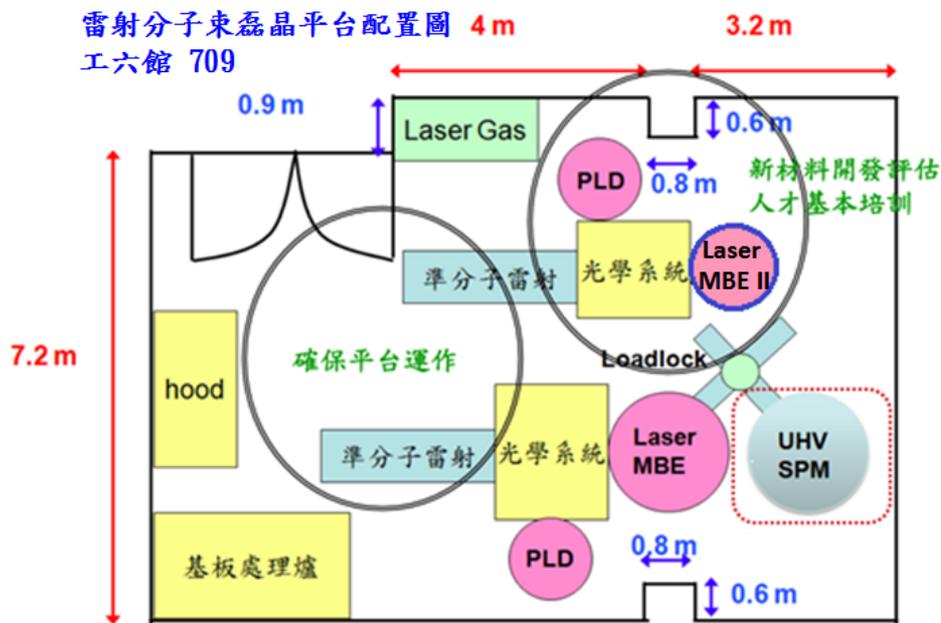


圖 1 雷射分子束氧化物磊晶實驗室平面圖

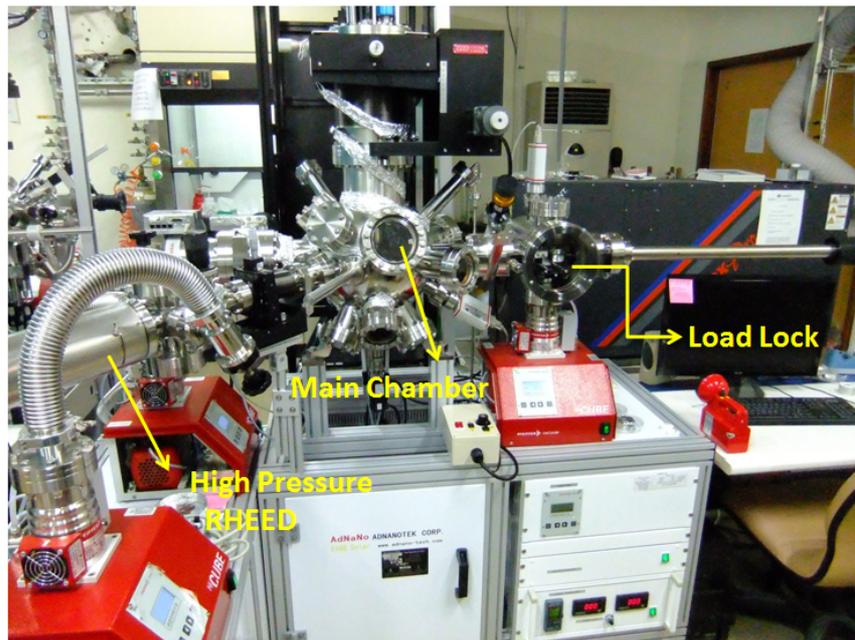
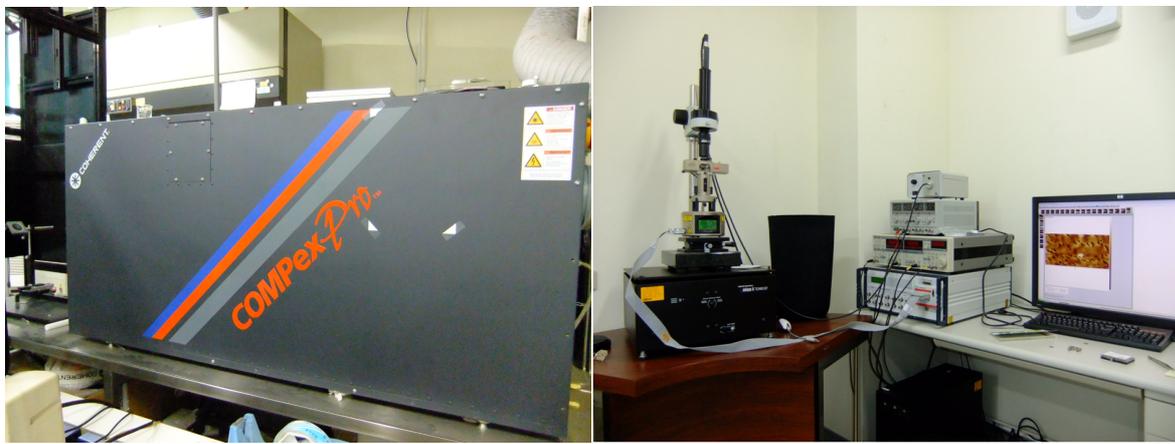


圖 2 雷射分子束氧化物磊晶主系統實圖



單原 圖 4 系統檢測掃描探針系統建構實圖

第一二年之成果主要於 2009 年 1 月在國際知名期刊 Nature Materials 發表[1]，第一個團隊發現多鐵材料之壁域可以導電，提供了奈米材料與研究設計之新思維。接著於 2009 年 6 月又於同本期刊發表新的憶阻器材料[2]。第二年之研究成果，持續以第一年所開發之新穎材料與國內外研究團隊合作，持需探索新的科學。2009 年 11 月於國際知名期刊 Science 刊登新穎無鉛綠能壓電材料，提供了科學與工程對於高效能之壓電材料一種新的思維與選擇[3]。此外，本研究平台合作之研究團隊，發現在於多鐵壁域有一內建電場，利用此電場可以展示新的奈米光伏可控元件，已被 Nature Nano.於 2010 年 3 月發表[4]。本研究團隊在多鐵材料鐵酸鈹之混合相結構中利用光電子能譜與同步光源技術發現於混合相中具有可以電場控制之磁性結構，此結果為磁電耦合材料提供的全新思考觀點與進展，相關成果被 Nature Comm.期刊於 2011 年發表[5]，其他重要結果如圖 5 所示，新穎材料之製程與系統開發將在稍後做一統整敘述。由於計畫主持人在此領域成果卓越，因此被邀請於國際上最好的材料科學期刊，邀請寫 review 文章[6]。除此之外，此平台每年可發表超過 15 篇論文於國際高水準之期刊，本年度計畫也已達原本設定之目標[7-22]。

氧化物磊晶平台主要成果

交大氧化物磊晶平台

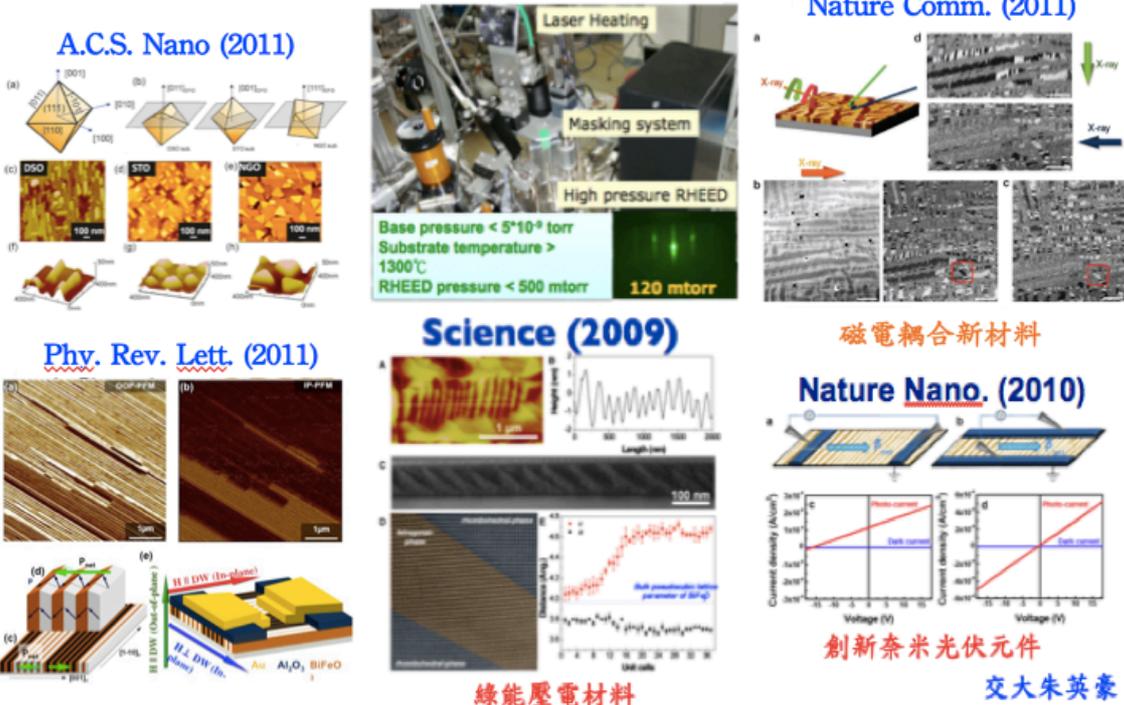


圖 5 雷射分子束氧化物磊晶平台之主要研究果

製程開發

為了得到具有良好磊晶性質的薄膜，基板的選用有以下之考量：1.以單成份階層 (Single-Termination)、單晶且乾淨之材料作為磊晶薄膜之基板。2.基板需要擁有原子階層級平坦之表面，利用其調控薄膜二維成長的模式。3.利用已知表面成份原子之單成份階層以控制薄膜結

構 4.選用與磊晶薄膜晶格常數相近之材料作為基板，可避免磊晶的薄膜與基板介面晶格常數差異所造成的影響。

由此可見，基板處理能力之建立為成長高品質薄膜之關鍵步驟，常用以作為複雜性氧化物磊晶的基板有 YAlO_3 (YAO)、 SrTiO_3 (STO)、 LaAlO_3 (LAO)、 NdGaO_3 (NGO)、 NdScO_3 (NSO)與 DyScO_3 (DSO)...等等，皆屬於鈣鈦礦(Pervoskite)之晶體結構。本計畫第一步開始建立基板處理之資料庫。而因晶棒切割完後，因有不完美切割(Miscut)存在，為此，未處理的基板表面為混合之原子台階層，為了得到具有良好磊晶性質的薄膜，控制基板為特殊成份之單一原子台階層是相當重要的。本實驗室結合多年來經驗加以不斷改進，利用適當的化學蝕刻步驟搭配高溫退火，可以對基板表面作有效的表面階層控制。現已有重大突破可處理多數氧化物基板進而達到單一原子階層，成功建立此一技術之資料庫。圖 6 為於本研究中之處理流程與將不同晶格常數基板經過化學蝕刻後，在高溫退火完之表面影像圖，可以看見原子台階，證明本研究團隊已有基板處理能力，可以控制基板表面之 termination。

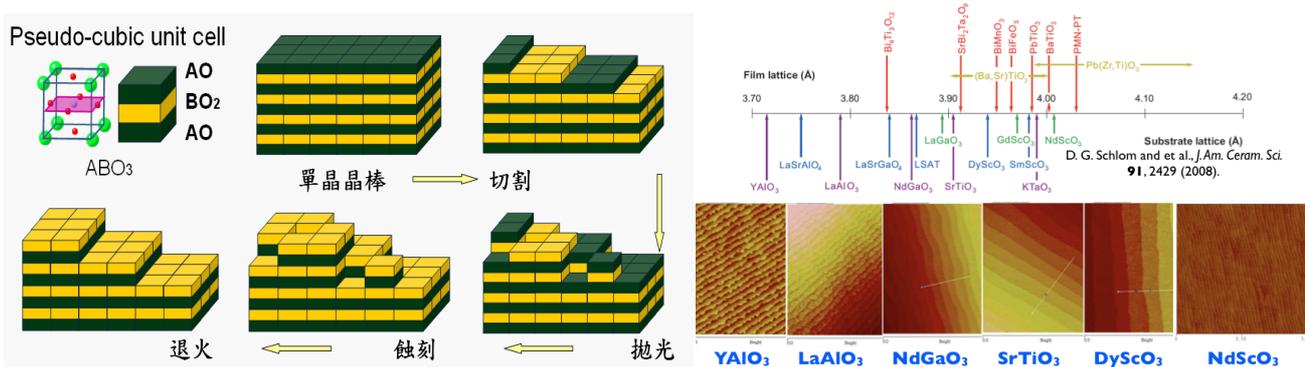


圖 6 基板處理流程圖與不同晶格常數基板經過化學蝕刻後在高溫退火完之表面影像圖

利用已建立之基板處理能力，開始利用已建好之系統，進行氧化物薄膜與奈米結構之開發。計畫主持人利用本身之經驗，已陸續完成幾種關鍵材料之製程優化，如： CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , YBCO , $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, BiFeO_3 , LaMnO_3 , LiMn_2O_4 , SrTiO_3 , LaAlO_3 與相關材料之特殊奈米結構，並以開始提供平台初期參與之研究群高品質之薄膜，以利研究群進行下一步之研究。除此之外，本平台亦開發出一些新型之氧化物材料結構，將依類別簡述如下，相關成果已被許多相關知名期刊接受或撰寫論文中，準備發表。

在單相材料之開發上，計畫總主持人在 BiFeO_3 薄膜之成長為國際權威，因此在此關鍵材料之開發上持續進展，以供研究群團隊之使用。目前本實驗室率先利用適當之基板拉應力，配合 Phase Field Simulation 模擬結果，創造出全新 Orthorhombic 相之鐵酸鈹材料，結果如圖 7 所示。

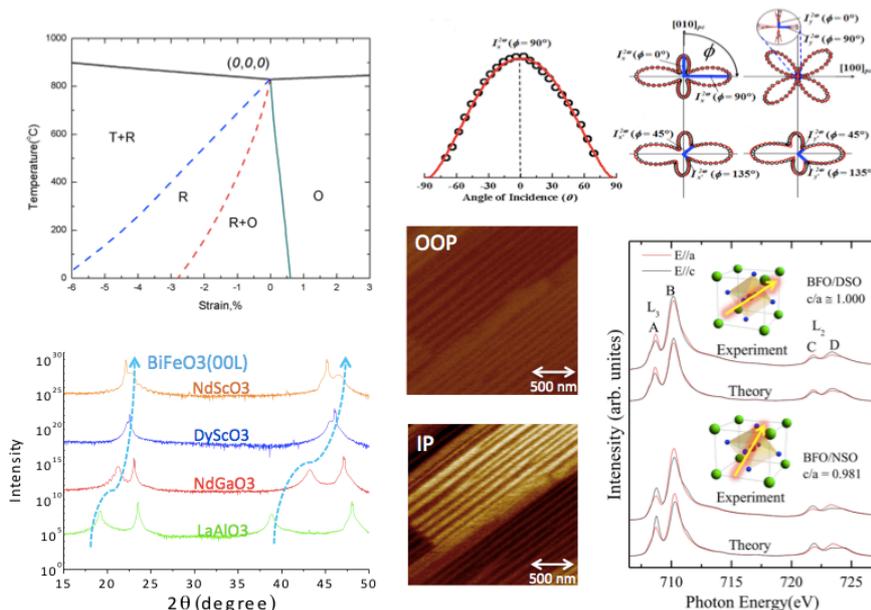


圖 7 利用基板拉應力成長全新 O 相鐵酸鈹材料

此外本實驗室利用正交晶系材料之邊長不等長之特性，輔以適當之應力調控變化，可以成功控制鐵酸鈹之多鐵壁域之成長方向與壁域種類。鐵酸鈹之壁域具有多元功能性，先前計畫總主持人已在 2009 Nature Mater. 發表鐵酸鈹之 109° 與 180° 壁域具有可調變之導電特性，而現在本實驗室已可成功成長出規則排列之 109° 與 71° 壁域結構，成長技術領先全球。此外，本實驗室進一步將此技術應用於提供拉應力之基版上，率先成功成長規則排列之 90° 壁域結構。此項突破於多鐵領域中相當重要，因為規則排列且單一支壁域結構突破現有之量測限制，令我們得以深入了解多鐵壁域之物理特性與應用，部分突破與實驗成果如圖 8 與 9 所示。目前本項成果在整理階段，準備發表論文[23-24]。

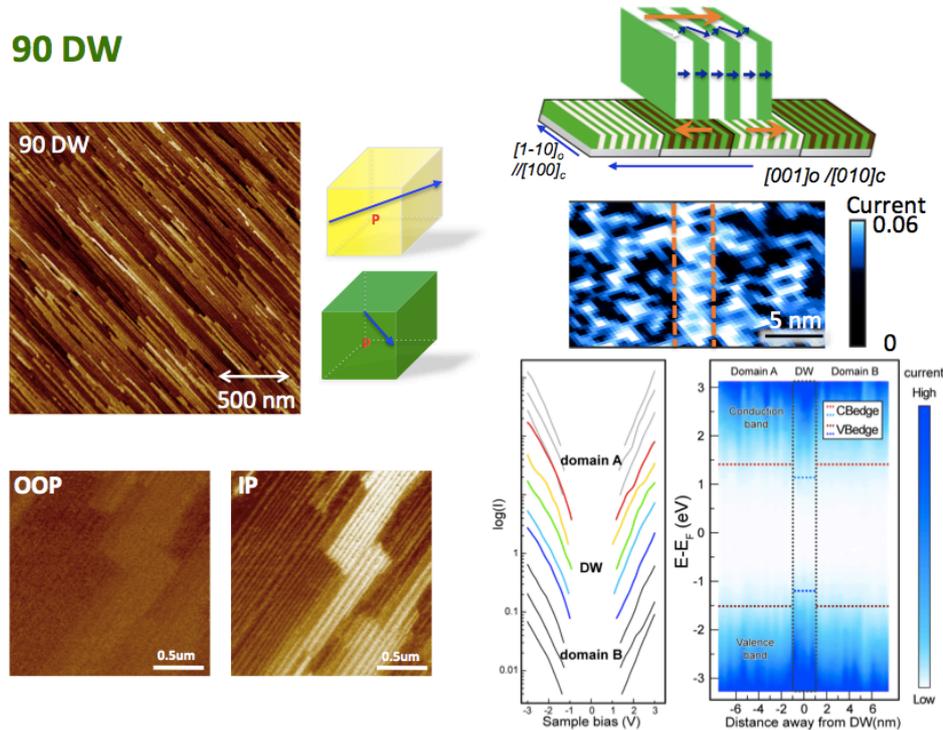


圖 8 利用正交晶系基板調控新穎鐵酸鈹壁域結構與功能性

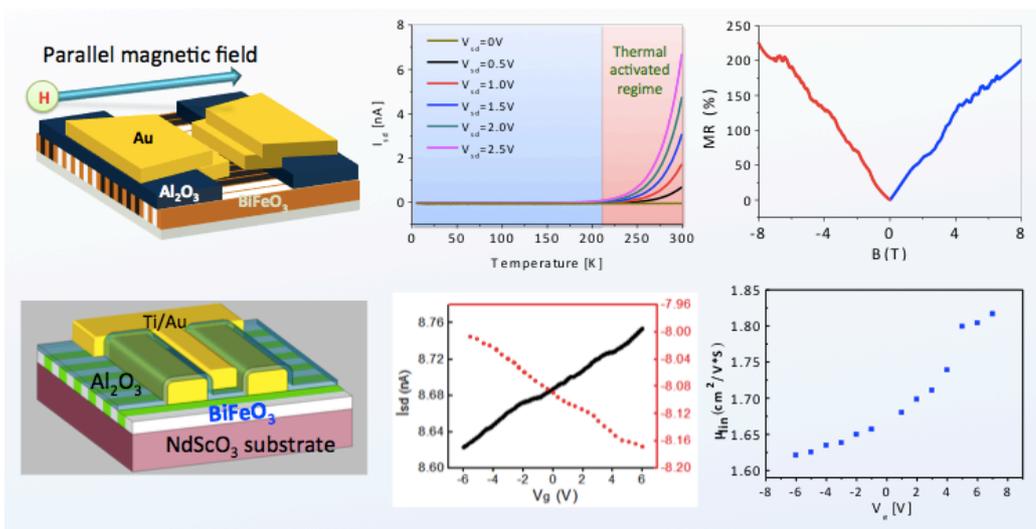


圖 9 調控不同相之 BiFeO_3 薄膜其鐵電方向

本實驗室亦延續多年來對於應力於鐵酸鈹鐵電薄膜之控制，利用多元之研究方法探討鐵酸鈹之 Tetragonal 與 Rhombohedral 兩相共存時之結構演化與壓電特性變化。利用 X 光繞射技術配合高溫壓電力顯微鏡研究中發現，於壓應力中成長之鐵酸鈹薄膜於高溫時會有 Mc 至 Ma 之結構轉變，並具有對應之晶格變化，藉以我們得以將成功且完整建構於壓應力基版上成長之鐵酸鈹薄膜之厚度溫度對應相圖，本項成果於 2011 年被 Phys. Rev. B 期刊接受[25]，部分結果節錄於圖 10 所示。

本實驗室另外聚焦於 BiFeO_3 薄膜於 LaAlO_3 材料之磊晶成長，目前發現可以利用薄膜厚度來控制相的穩定，在很薄的時候為 tetragonal 相，在厚度很厚時則因為應變鬆弛而回到菱形母相，在中間的厚度，則會形成兩相共存，本實驗室所提供之薄膜品質目前領先世界，實驗成果已整理成論文，即將投稿[24]，這樣的系統以提供給世界數個研究群進行實驗，目前發現具有超高的壓電特性與特殊的磁性，將於國際合作部分展現成果。為了將其更進一步推進至實際應用，我們與美國 Cornell University 之 Prof. D. G. Schlom 合作，由其提供利用分子束磊晶成長 LAO/Si 基板，本實驗室則將在 LaAlO_3 之成果成功複製於此基板上，並且讓兩項共存更多更密，將有助於特形之提昇，目前此部份之成果已經開始整理，如圖 11 所示，即將投稿於國際期刊[26]。

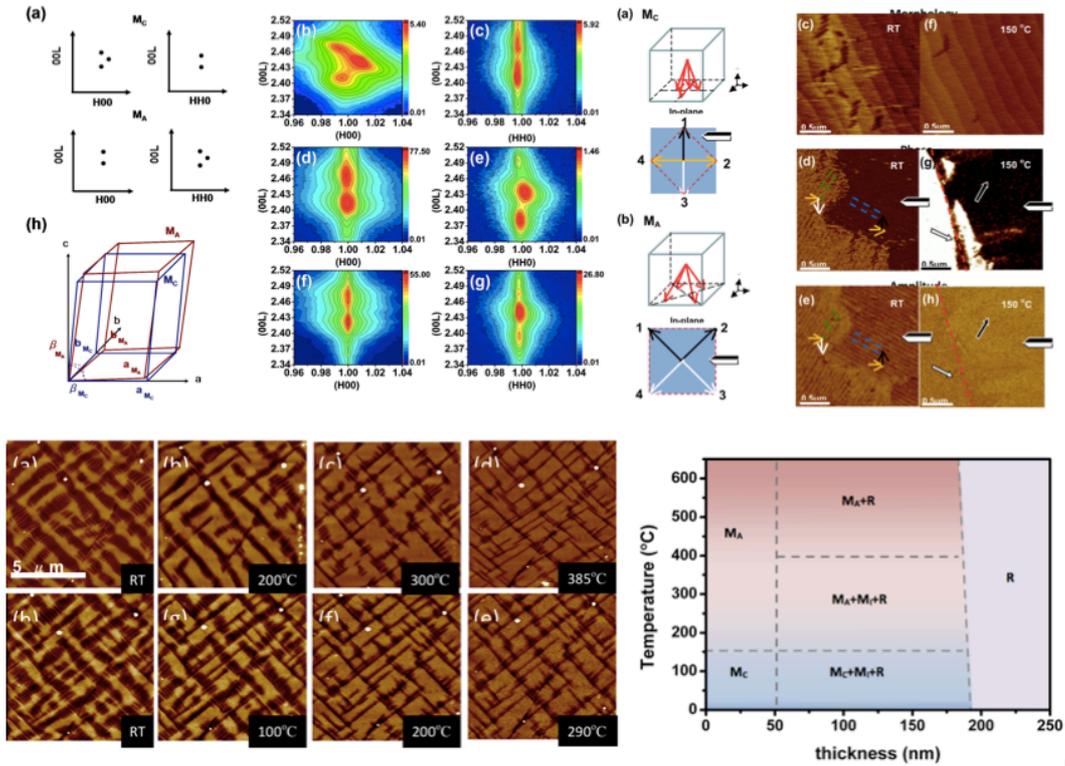


圖 10 鐵酸鈹薄膜成長於壓應利基板上相變化研究

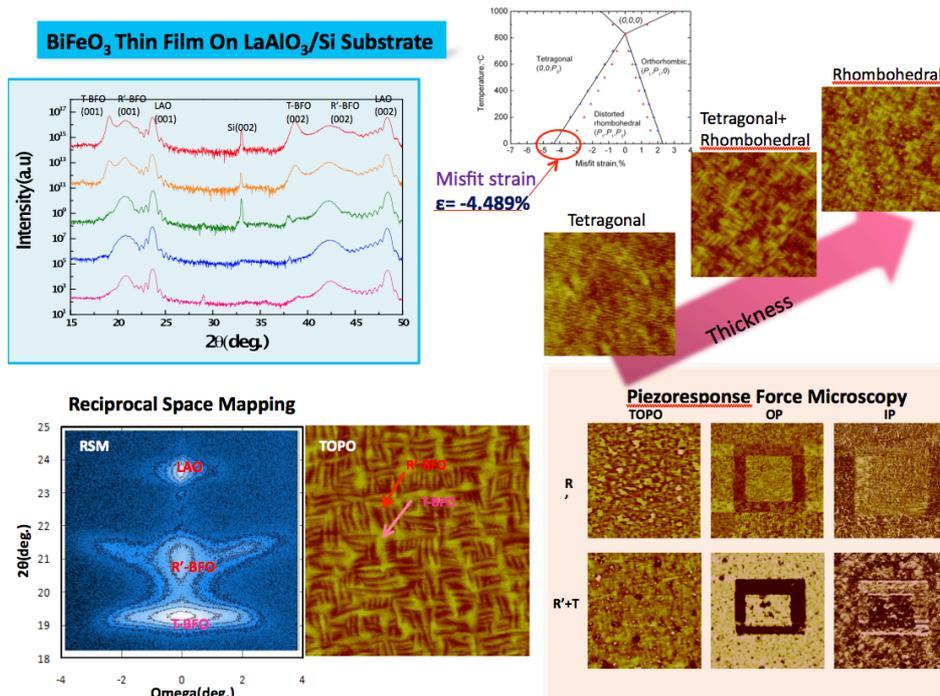


圖 11 在 LaAlO_3/Si 基板上利用厚度控制 tetragonal 相與菱形晶相共存之部分實驗成果

如先前所述，當施加適當之壓應利於鐵酸鈹材料上，可使之形成一 Tetragonal 相結構，此一結構在適當之厚度內可與原本菱方晶之鐵酸鈹相共存，形成一型態相邊界，本研究團隊早期已發現此一型態相邊界具有遠大於 PZT 之壓電特性。在本計劃補助之下，本新穎雷射分子束磊晶平台不斷提供高品質之樣品成長，並利用同步輻射光源 XMCD 技術，本研究團隊更進一步發現此一型態相邊界具有一自發之磁性質，且經多步實驗證實此一自發磁矩可利用外加電場加以控制，更可配合壓電力顯微鏡做出寫入與抹除之動作，此一成果除了將磁電耦合之領域所知相前推進之外，更為磁電耦合材料之應用寫出一番新頁，相關成果於 2011 年被 Nature Communication 期刊接受[27]，部分成果統整於圖 12 所示。

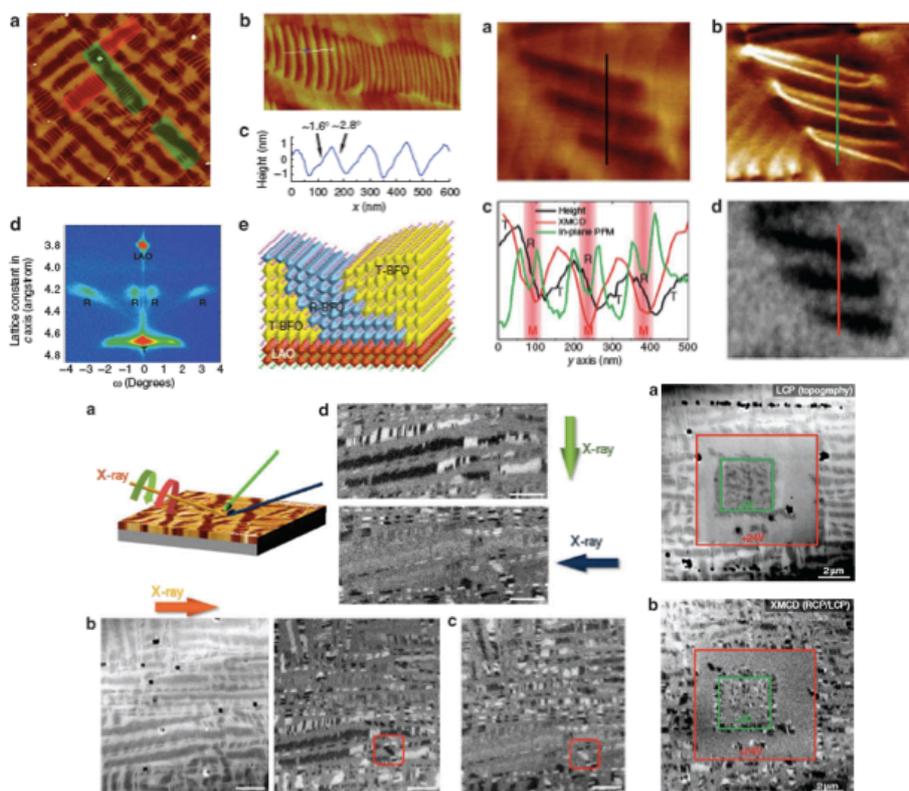


圖 12 磁電耦合與電場調控之型態相邊界研究成果

除了 BiFeO₃ 薄膜之外，本實驗室亦積極開發新的材料系統與結構，其中尤以多功能氧化物複合奈米結構成果斐然，是以利用兩種或兩種以上之功能性氧化物材料，利用材料成長方式將兩材料製作為具有奈米結構之材料，使其在奈米尺度之接近下，兩功能性材料互相耦合，進而創造出新穎且多元之多鐵材料系統。此一領域目前為世界氧化物界之熱門題目，現今研究之瓶頸正是材料系統之成長，本實驗室在此方面成果領先世界，期以之開創下一階段之新穎物理與材料領域之研究。

在氧化物特殊奈米結構之研發上，計畫主持人所帶領之研究團隊，利用不同之基板表面，具有不同之表面能與晶格常數，以之成長鈣鈦礦與尖晶石結構材料系統，可以製作出不同形狀之奈米結構。

成長初期選用 BiFeO₃-CoFe₂O₄ 兩相材料，CoFe₂O₄ 為一磁伸縮材料，BiFeO₃ 則為一鐵電材料，利用將兩相製作奈米結構後之耦合特性，可利用電場控制之磁場反轉，進而達成磁電耦合的新境地。與此基礎上，本實驗室更利用不同晶格常數之氧化物基板，進而調控製作不同軸相之 BiFeO₃-CoFe₂O₄ 奈米結構，使得測量團隊有更多元的材料可以進一步的探討磁伸縮材料之物理性質與耦合特性，相關成果已於 2011 被 ACS. Nano.期刊接受[28]。部分成果如圖 13 所示。

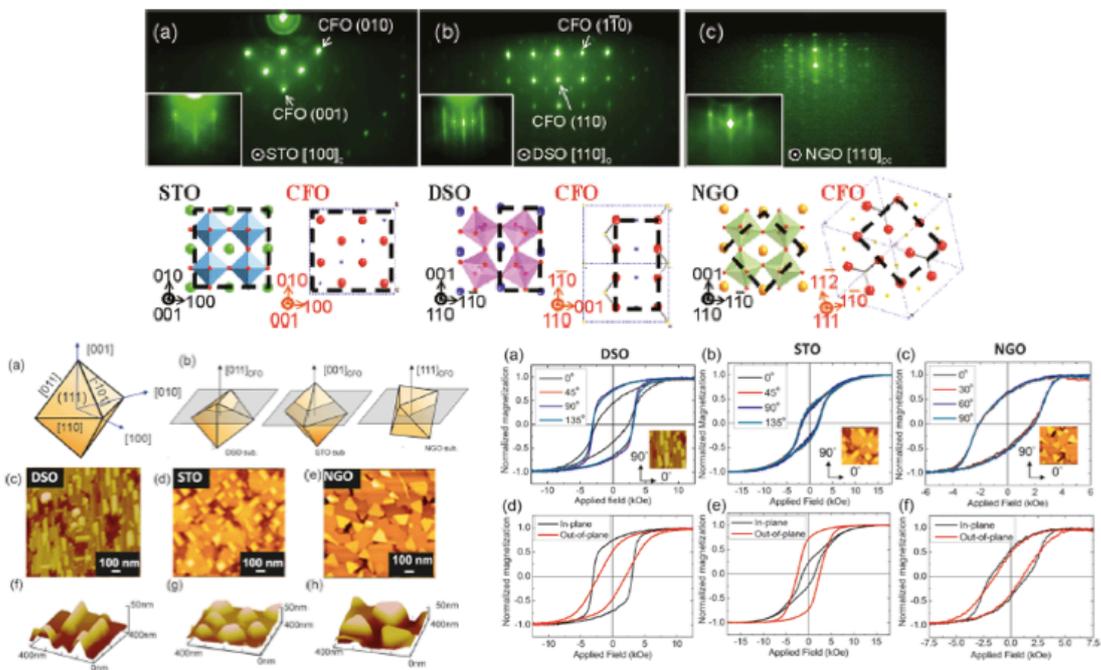


圖 13 控制不同奈米結構之 $\text{BiFeO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ 薄膜之部分研究成果

目前更與 Prof. Long-Qing Chen (Penn State U.) 與清大材料賴志煌教授進行合作，由該團隊進行模擬，另一團隊進行磁性量測，並配合研究團隊利用高解析 TEM 與同步光源進而了解其形成之細部過程與磁性質晶體場學。

將此部分製程與構想加以延伸，我們得以創造出許多具有多元功能性之氧化物材料，上述我們選用具有磁伸縮與鐵電特性之兩種材料加以搭配，製作出可以電場控制磁性之材料結構。本實驗室更將此製程加以推廣，應用於光拉伸材料與磁伸縮材料之搭配，提出以光性質控制磁性材料之構想，此類材料系統由 $\text{SrRuO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ 構成，當光照到 SRO 材料將會給予其約兩個百分比之晶格常數拉伸變化，此一拉伸長度變化再次拉伸磁伸縮材料，使其受到應力後將此外力刺激轉為磁矩扭轉之動力。藉以達到光磁耦合的目標，現今本實驗室於此已有重大突破，研究成果如圖 14 所示，成果在正整理中以待發表。

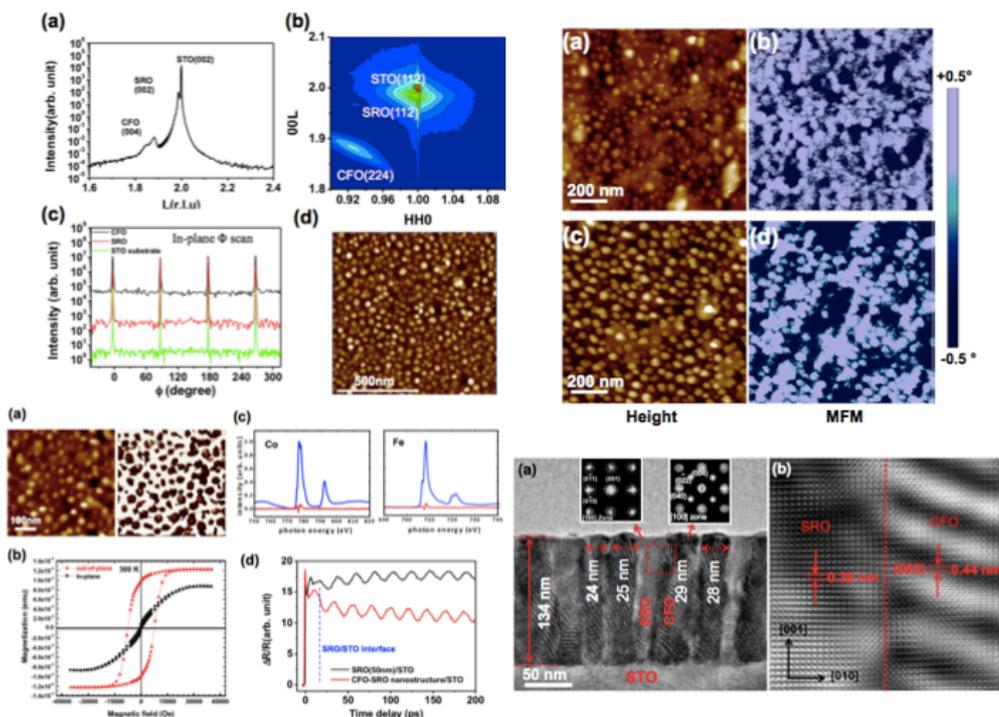


圖 13 光磁奈米米結構之 $\text{SrRuO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ 薄膜之部分研究成果

除此之外，本實驗室亦發展其他材料之奈米結構，目前較有成果的為起始化合物為鈹之化合物之奈米晶體，主要利用氧化鈹於高溫會與他相材料進入固液兩相區，配合高溫製程，將融點較低的氧化鈹成分去除，進而留下自組裝之奈米單軸晶體，奈米單軸晶體可用以提供一純化之材料系統，藉之我們得以進一步了解許多複雜氧化物之物理特性。此類之成長方式更可以進一步推廣至多種氧化物晶體之製作與成長，包含氧化錳，四氧化三鐵，三氧化二鐵，氧化鎳與二氧化鈦等奈米晶體製作，此部分成果如圖 15 所示。目前成果正在整理，將撰寫論文投稿[29]。這個部分之突破在於將目前之方法延伸至多元系統之材料，目前實驗室將會以此為基準，積極開發奈米晶體之異質結構，希望可以利用此製程製作簡化之材料系統，除了解其物理特性外，更可進而利用奈米結構改造其特性，創造出新的材料物性。

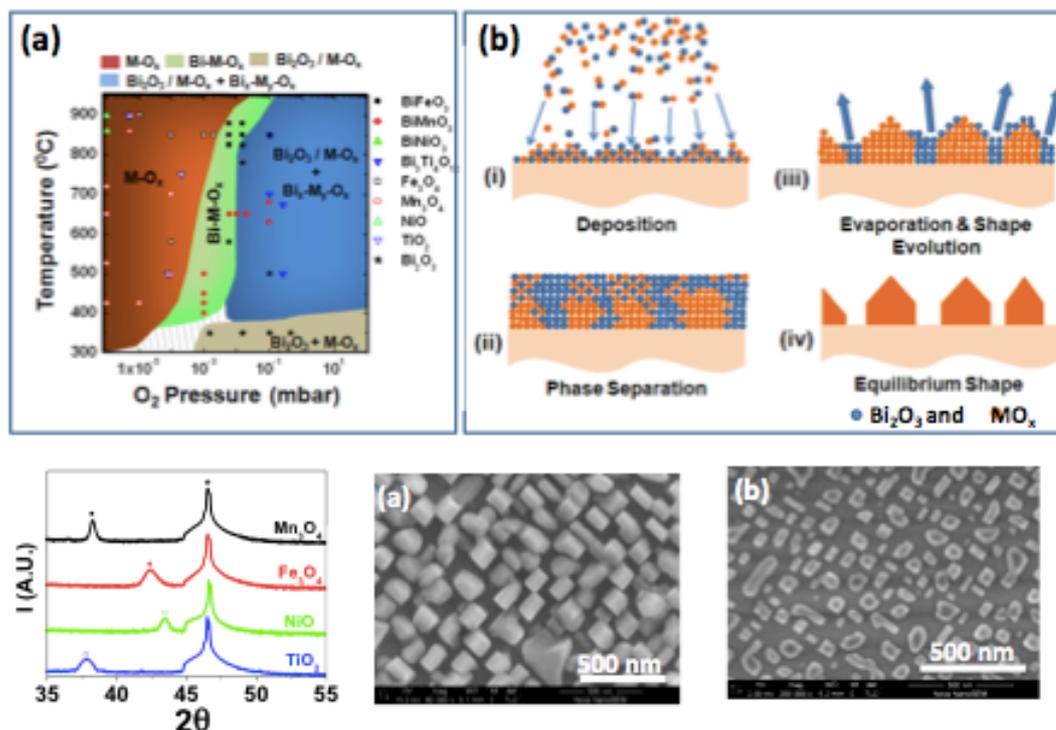


圖 15 多元奈米晶體之新穎成長方式成果

上述主要在於單一材料於薄膜或奈米結構之開發，目前多數元件多需要多層結構，為了得到良好的介面，必須要即時監測薄膜成長時發生的變化，本研究團隊於脈衝雷射沈積系統上加裝反射式高能電子繞射裝置 (RHEED)，利用繞射的圖形與強度加以辨別薄膜成長的模式、厚度變化與表面狀況。進而可以達到精準的厚度與原子階層控制，得到磊晶性質良好的薄膜。本年度計劃中此類研究之關鍵材料為 LaAlO₃ 與 SrTiO₃，圖 16 為利用 RHEED 監控 LaAlO₃ 薄膜之成長在 LAO 基板上，可以將薄膜之成長模式調成 layer by layer，以確保表面單一之 termination。甚至可進一步製作超晶格結構，便利進行介面二微電子氣之物理現象探討，部分成果也於在國際知名期刊審核中。

最後實驗所要製作之結構為超晶格，除了 LAO/STO 之外我們亦成功成長出 SMO/LMO 超晶格結構，相關結果在於整理階段，等待後續發表中。本研究團隊亦開發具有 unit cell 控制能力之 YBCO/LCMO 超晶格結構，利用 RHEED 分別監測 LCMO 與 YBCO 之成長模式與速率，可以確定 layer by layer 之成長模式，進而將兩材料製作為超晶格結構，這種控制的開發展現了本研究團隊具有能力開發出領先國際水準之氧化物磊晶薄膜。進一步之 XRD 與 X-ray 反射率之量測都可以證明超晶格結構之準確與平整之介面。軟 X 光共振散射實驗已開始進行，數據整理中尚待發表。

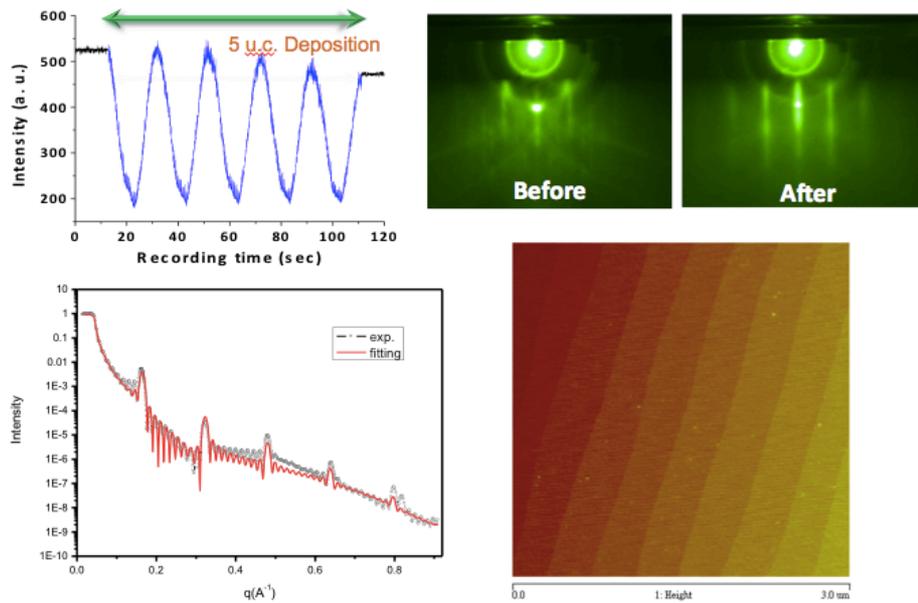


圖 16 利用 RHEED 監控 LAO 薄膜之成長在 STO 基板上

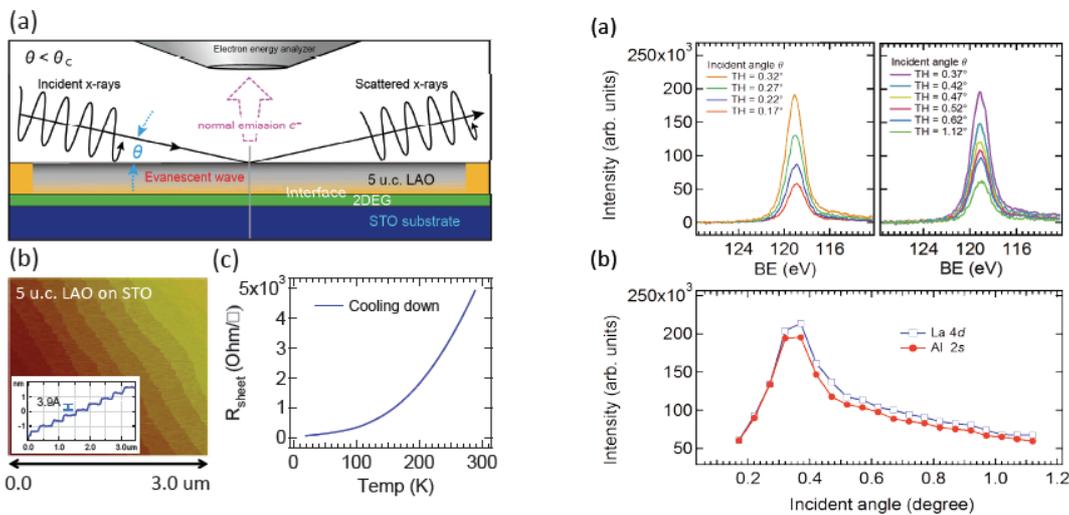


圖 17 以同步輻射光源探討 LAO/STO 介面電荷轉移研究成果

本研究團隊在系統設置之初，積極成長了許多高品質的氧化物薄膜與研發新製程，本研究團隊目前已成功建立單一薄膜之介面控制能力，兩種鈣鈦礦結構材料在接合時有兩種不同之接法，本研究團隊在對此控制上，亦有成果。在薄膜介面之控制亦有所成，相關研究成果與量測皆持續進行中。

研究合作

新穎核心設施之計畫概念，在於建立可以提供高品質之材料，以厚植本國在該領域之研發實力。在培養實力之過程，與國外學者之研究合作至為重要。計畫總主持人回國時間不長，但是在國外就與數十個知名之研究團體進行合作，因此在推廣平台之過程，一開始之主要對象亦與國外為主。計畫推廣後到目前為止主要的以發表成果，可以在之前的部份找到，目前仍有需多在進行的題目，以下將大概描述，以確定平台與國際合作之活力。計畫主持人於寒暑假都前往 UC Berkeley Ramesh's group 進行技術交流。由於計畫主持人具有成長 BiFeO₃ 磊晶薄膜之關鍵技術，因此在寒暑假都指導 UC Berkeley 之研究群成長該薄膜，同時也利用台灣現有之系統，提供薄膜與該研究團體。計畫主持人與美國 Prof. L. W. Martin 合作多年，目前美國伊利諾大學香檳校區將投入資源建立氧化物磊晶平台，並聘任 Prof. Martin 為計畫領導人，所已計畫主持人持續與 Prof. Martin 合作。為了要確保平台於氧化物介面之研究方向，可以在最短之時間展現成果，本平台亦與荷蘭 Twente 大學的 Dr. M. Huijben 合作，並進行 LSMO/BiFeO₃ 之介面控制。在

掃描探針技術之合作團隊亦沒有因為主持人回台灣而中斷掉，主持人利用磊晶平台，再度提供高品質之 BiFeO_3 薄膜於美國 Oak Ridge 國家實驗室之 Prof. Kalinin，該研究團隊研究鐵電材料的尺寸效應與電極材料間之耦合作用。另一個掃描探針之合作對象為美國康乃狄克大學之 Prof. Huey，主要是由平台提供高品質 PZT 與 BiFeO_3 鐵電薄膜，由該研究群進行超高速壓電力顯微鏡之研究。在 TEM 的部份，本平台與美國 Oak Ridge 國家實驗室 Prof. Pennycook 有密切合作，目前利用掃描式穿透電子顯微技術(STEM)研究 BiFeO_3 與 LSMO 的介面，可以發現在 BiFeO_3 氧的八面體在接近介面時其旋轉消失會造成 BiFeO_3 變成導電之特性。另外一個重要的合作對象為澳洲新南斯威爾大學之 Prof. Vanaloor，雙方平台之交流相當廣泛，薄膜成長、TEM 觀察、掃描探針技術、奈米結構成長。在電性量測上，目前國外主要之合作對象為首爾國立大學的 Prof. Kim，雙方合作的題目相當廣泛，基本上只要是本平台開發出來之新式薄膜，該研究團隊都有興趣進行量測。理論的計算主要與美國加州大學 Santa Barbara 分校之 Prof. Spaldin，還有新加坡南洋理工大學之 Prof. Lang Chen。除了以上之外，仍有多個國外研究群與本計劃平台合作，目前正進行實驗中，尚未有具體成果，另有數個研究群向計畫總主持人請求信件證明，以保證此平台將會提供其高品質之磊晶薄膜，以利該研究群計畫之申請，因此證明目前之磊晶平台已具有國際之水準，可以提供國外研究團隊高品質磊晶薄膜，以厚植本國在氧化物磊晶薄膜之研發能力。

本計劃平台在成長關鍵新穎薄膜時需要靶材，但是一些新穎材料並無商用靶材，因此必須與國內製作陶瓷材料之研究團隊合作開發靶材，目前主要的合作對象為海洋大學之張宏宜教授，由其實驗室提供特殊靶材。本平台之重點希望可以培養出國內之研發團隊，所以國內合作之研究亦為重要指標。國內之研究起步比較晚，主要是因為計畫主持人剛回國不久。最早之合作對象為清華大學吳泰伯教授，另一個主要合作對象為成大物理系陳宜君教授，該研究團體主要專注於掃描探針系統，因此由本計畫之主系統，提供高品質之 BiFeO_3 材料，利用壓電力顯微鏡對 BiFeO_3 材料進行奈米尺度鐵電行為的了解。本研究平台亦與中山大學物理系邱雅萍教授合作利用 STM 研究 BiFeO_3 薄膜內之鐵電域壁，可以得知域壁之能隙較小，因此造成域壁之導電性較高，亦為此領域突破之研究。目前能源議題發燒，鐵電光伏元件為太陽能發電提供一個新的選擇，為了了解鐵電材料與電極材料介面的能帶之變化，本平台與成大物理吳忠霖教授合作，由本研究平台提供樣品，利用 photoemission electron spectroscopy 來了解改變鐵電極化方向對於介面能帶之影響。與師大物理系劉祥麟教授合作研究 iso-symmetric 相的 BiFeO_3 之光學性質，同系列之樣品亦跟同步輻射林宏基博士合作，由其進行軟 X 光吸收之量測。交通大學電物系由小林孝嘉教授與吳光雄教授帶領目前正在建立飛秒雷射系統以進行相關材料超快動力學之研究，本研究平台亦與其結合，提供高品質樣品於吳教授與羅志偉教授所帶領之研究團隊，進行多樣化 BiFeO_3 薄膜超快動力學之研究。本研究平台除了積極建立基礎研究平台之外，亦希望可以將所開發之材料推往應用之範圍，因此亦花很多時間在建立跟電機電子元件相關研究團隊之研究。本研究平台與清大電子邱博文教授合作，結合其在傳輸量測上之專長，共同研究 BiFeO_3 薄膜內，鐵電域壁之磁阻行為，目前看到約 60% 之變化，亦為此領域研究上之突破。上述幾個研究群皆是已有成果產出，因此與這些研究群之合作關係，會將持續，陸續會有成果產出。另外還有許多國內之研究群之合作屬於起始階段，待雙方磨合期結束，便開始會有實質之數據產出，以提高平台之利用效率。綜合以上所述，可以得知此平台無論在國外與國內都相當活躍，提供許多研究群高品質之氧化物薄膜，除此外還結合各個領域之研究人才，發表高品質之論文於頂尖期刊[30-57]，提昇我國在此領域之研究總能量。

參考資料

1. J. Seidel et al., *Nature Mater.* **8**, 229 (2009).
2. C.-H. Yang et al., *Nature Mater.* **8**, 485 (2009).
3. R. J. Zeches et al., *Science* **326**, 977 (2009).
4. S. Y. Yang et al., *Nature Nanotechnology* **5**, 143-147 (2010).
5. Q. He et al., *Nature Communication* **2**, 225 (2011).
6. L. W. Martin, Y. H. Chu, and R. Ramesh, "Advances in the Growth and Characterization of Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Oxide Thin Films", *Mater. Sci. Eng. R.* accepted (2010).
7. C. L. Wu et al., *Phys. Rev. B* **83**, 020103 (2011).

8. J. X. Zhang et al., *Nature Nanotechnology* **6**, 98 (2011).
9. R. K. Vasudevan et al., *ACS Nano*. **5** 879 (2011).
10. Y. P. Chiu et al., *Adv. Mater.* **23**, 1530 (2011).
11. S. Y. Zhou et al., *Phys. Rev. Lett.* **106** 186404 (2011).
12. P. Maksymovych et al., *Nano Lett.* **11**, 1906 (2011).
13. L. Y. Chen et al., *J. Supercond. Nov. Magn.* **24**, 731 (2011).
14. Y. C. Chen et al., *Nanotechnology* **22**, 254030 (2011).
15. H. J. Chang et al., *Adv. Mater.* **23**, 2474 (2011).
16. A. Damodaran et al., *Adv. Mater.* **23**, 3170 (2011).
17. R. K. Vasudevan et al., *Nano Lett.* **11**, 3346 (2011).
18. J. X. Zhang et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 147602 (2011).
19. H. Y. Kuo et al., *J. Eur. Ceram. Soc.* **31**, 3063 (2011).
20. J. T. Heron et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 217202 (2011).
21. K. T. Ko et al., *Nature Commun.* **2**, 567 (2011).
22. Y. Y. Chu et al., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 262101 (2011).
23. J. C. Yang et al., "Orthorhombic BiFeO₃ Multiferroic Thin Films", to be submitted.
24. J. C. Yang et al., "Electronic Transport on 90 Degree Domain Wall in Multiferroic BiFeO₃", to be submitted.
25. H. J. Liu et al., "Strain Driven Phase Boundaries in BiFeO₃ Thin Films Studied by Atomic Force Microscopy and X-ray Diffraction", *Phys. Rev. B* accepted.
26. W. I. Liang et al., "Integration of Iso-symmetric Phase Boundaries in Multiferroic BiFeO₃ Thin films on Si Substrates", to be submitted.
27. Q. He et al., *Nature Commun.* **2**, 225 (2011).
28. S. C. Laio et al., *ACS Nano*. **5** 4118 (2011).
29. K. A. Bogle et al., "Exploiting Universal Behavior of Bismuth Perovskites for Fabrication of Epitaxial Metal Oxide Nanostructure", *Nano Lett.* to be submitted.
30. P. Yu et al., "Interface ferromagnetism and orbital reconstruction in BiFeO₃-La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ heterostructures", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 027201 (2010).
31. J. Seidel et al., "Tuning Conductivity at Domain Walls in BiFeO₃ Thin Films" *Phys. Rev. Lett.* accepted.
32. Q. He et al., "Domain Wall Magnetism and Magnetotransport in Multiferroic BiFeO₃", *Nature Mater.* revised.
33. Q. He et al., "Electrically controllable magnetic isosymmetric phase boundary in multiferroic BiFeO₃ thin films", *Nature Communications* revised.
34. Q. He et al., "Electrically Controllable Iso-Symmetric Phase Transition in Multiferroic BiFeO₃ Thin Films", to be submitted.
35. J. X. Zhang et al., "A road to Giant Displacement in Lead-Free Multiferroic Thin Films", *Nature Nanotechnology*.
36. L. W. Martin et al., "Nanoscale Domain Control of BiFeO₃ and Exchange Interactions by Thin Film Growth Modes", *Adv. Mater.* under review (2010).
37. M. Huijben et al., "Electrically controlled magnetization in an oxide multiferroic/ferromagnet heterostructure", *Nature Mater.* revised (2009).
38. P. Maksymovych et al., "The Ultrathin Limit and Dead-Layer Effects in Polarization Switching of BiFeO₃", *Phys. Rev. Lett.* under review.
39. N. Balke et al., "Direct observation of capacitor switching using planar electrodes", *Adv. Funct. Mater.* **20**, 3466 (2010).
40. R. Nath et al., "High Speed SPM for Direct Nanoscale Mapping of Nucleation and Growth", *ACS Nano* submitted (2009).
41. N. A. Polomoff et al., "Correlation between nanoscale and nanosecond resolved ferroelectric domain dynamics and local mechanical compliance", *J. App. Phys.* under review (2010).
42. A. Borisevich et al., "Direct observation of the novel interface-mediated mesoscopic phase transition in multiferroic BiFeO₃ by STEM-EELS imaging", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 087204.
43. R. K. Vasudevan et al., "Unambiguous discovery of vortex and antivortex states in BiFeO₃ Thin-Film", *Nano Lett.* submitted.
44. K. Bogle et al., "Single-crystalline metal oxide nanostructures via phase separation approach" *ACS Nano* **4**, 5139 (2010).

45. Y. S. Oh et al., "Quantitative determination of anisotropic magnetoelectric coupling in BiFeO₃-CoFe₂O₄ nanostructures", *Appl. Phys. Lett.* **97**, 052902 (2010).
46. C. W. Huang et al., "Strain-driven phase transition and associated dielectric/piezoelectric anomalies for BiFeO₃ thin films", *Appl. Phys. Lett.* **97**, 152901.
47. H. H. Liu et al., "Kinetics on strain-driven Iso-Symmetric Phase Transition in BiFeO₃ Thin Films", to be submitted.
48. W. Y. Chang et al., "Resistive Switching Characteristics of BiFeO₃ Thin Films", to be submitted.
49. Y. C. Chen et al., "Domain structure of strain driven isosymmetric phase boundary in multiferroic BiFeO₃ thin films", to be submitted
50. Y. C. Chen et al., "Nanoscale domain switching kinetics in epitaxial BiFeO₃", to be submitted.
51. Y. C. Chen et al., "Dynamics of domain relaxation in BiFeO₃: Role of surface charge effects", to be submitted.
52. Y. P. Chiu et al., "Local Electronic Evolution Across Multiferroic Domain Walls", to be submitted.
53. C. L. Wu et al., "Direct Investigation of Reversible Interface Band Bending at Ferroelectric Heterojunction", to be submitted.
54. M. K. Lin et al., "Optical properties of iso-symmetric multiferroic BiFeO₃ Thin Films", to be submitted.
55. C. Y. Kuo et al., "Determination of the orientation of magnetic moment and crystal field distortion of strain driven isosymmetric phase transition in multiferroic BiFeO₃ thin films", to be submitted.
56. L. Y. Chen et al., "Ultrafast dynamics of BiFeO₃ thin films by dual-color femtosecond spectroscopy", to be submitted.
57. M. G. Chen et al., "An investigation on the leakage current and the time dependent dielectric breakdown properties of ferroelectric (BiFeO₃) thin film capacitors", *to be submitted*.

國科會補助專題研究計畫項下國際合作研究計畫國外研究報告

日期：99年10月27日

計畫編號	NSC 99 - 2811 - M - 009 - 003 -		
計畫名稱	強化雷射分子束氧化物磊晶平台		
出國人員姓名	朱英豪	服務機構及職稱	國立交通大學材料系 助理教授
合作國家	美國	合作機構	UC Berkeley Lawrence Berkeley National Laboratory
出國時間	98年6月17日至 98年9月17日	出國地點	美國加州柏克萊

一、國際合作研究過程

本報告內容主要為申請人暑假期間至 UC Berkeley 與美國勞倫斯國家實驗室進行短期研究之主要成果。該研究內容以了解 BiFeO_3 關鍵多鐵材料 domain wall 之傳輸特性。

二、研究成果

請參閱已發表論文

Q. He, C. H. Yeh, J. C. Yang, G. Singh-Bhalla, C. W. Laing, P. W. Chiu, G. Catalan, L. W. Martin, **Y. H. Chu**, J. F. Scott, and R. Ramesh, "Magnetotransport at domain walls in BiFeO_3 ", *Phys. Rev. Lett.*, accepted (2011).

三、建議

這樣的國際合作可以截長補短，實質上可以增進雙方研究人員之交流，經驗的分享，進而達到高品質研究之輸出，因此建議國科會多補助此類合作案。

國科會補助專題研究計畫項下出席國際學術會議心得報告

日期：101年01月16日

計畫編號	NSC 99 - 2811 - M - 009 - 003 -		
計畫名稱	強化雷射分子束氧化物磊晶平台		
出國人員 姓名	朱英豪	服務機構 及職稱	國立交通大學材料系 助理教授
會議時間	99年8月14日至 99年8月17日	會議地點	Mexico, Cancun
會議名稱	The International Materials Research Congress XIX		
發表論文 題目	2 Invited Talks 1. Domain control in multiferroic BiFeO ₃ thin films 2. Understanding ferroelectric and piezoelectric properties of strain-driven iso-symmetric phase boundaries in multiferroic BiFeO ₃ thin films		

一、參加會議經過

本人整個暑假於UC Berkeley短暫訪問與交流研究，所以由舊金山出發前往Mexico Cancun，此地方為墨西哥著名觀光勝地，風景優美，但是消費極高。本人到達此地後即待在房間準備talks。第一天我並沒有talk，因此前往聆聽許多專家學者之演講收穫很多。晚上與認識之學者一起用餐，並商討合作事宜。第二天一早為我第一個邀請演講，主要講述BFO mixed phase的鐵電與壓電特性，與會學者反應熱烈，問了許多尖銳好問題，讓本人多了幾個思考方向。下午為第二個演講，主要講BFO domain wall，由於本實驗室為此題目之領導研究團隊，所以在此會議又發表許多驚人成果，包含transport、XSTM結果，會中學者反應熱烈，演講完後討論很久，也讓本人學到很多。

二、與會心得

這是在材料相當重要的會議，可以發現台灣在此領域的參加者並不多，如果無法與國際進行交流，是很難知道目前國際在此領域的走向，因此深深覺得台灣學者應該多出國看看。整個領域的發展是相當快速的，一下子沒注意，別人就追上了。這種場合也是認識人的好地方，尤其是像我這樣的新進學者，建立人脈是相當重要的，所以花了很多時間在與其他研究學者建立關係。這次收穫比較多的在於domain wall的部份，此次會議不僅找了鐵電domain wall專家，也找了磁domain wall專家，讓兩個不同領域的專家學者互動，可以提供很多不同的思考模式，有助於往日研究成果之突破。

三、考察參觀活動(無是項活動者略)

無 略

四、建議

這類會議對於新進人員幫忙相當大，應該多進行補助。

五、攜回資料名稱及內容

論文摘要集

國科會補助專題研究計畫項下出席國際學術會議心得報告

日期：101年01月16日

計畫編號	NSC 99 - 2811 - M - 009 - 003 -		
計畫名稱	強化雷射分子束氧化物磊晶平台		
出國人員姓名	朱英豪	服務機構及職稱	國立交通大學材料系 助理教授
會議時間	99年12月05日至 99年12月10日	會議地點	Korea, Jeju
會議名稱	International Conference of The Asian Union of Magnetic Society		
發表論文題目	Invited Talk Multifunctional Domain Walls in Multiferroic BiFeO ₃		

一、參加會議經過

這次除了參加會議，還受到韓國Seoul大學物理系邀請，進行訪問與專題演講。從台灣出發經由Seoul轉機前往Jeju島，第一天晚上遇到session組織人首爾大學Prof. Kee-Hoon Kim，即邀請本人出外用餐，因為Jeju是個小海島，島上盛產海鮮，所以點了很多很多生魚片，本人平常並不食用生魚片，但是所有餐點皆為生魚片，因此吃了不少。隔天開始，肚子開始不舒服腹瀉，整天腹瀉不止，所以都在飯店休息。第二天為我的邀請演講，強忍著腹痛完成我的演講，主要講題為BiFeO₃ domain wall的特殊物性，引起熱烈討論，也增加許多合作的可能性。結束演講後，還當了一個session chair，然後才又回飯店休息。會議中遇到許多來自臺灣的老師，如：中研院姚永德教授、彰師大張文成教授、台大張慶瑞教授。與他們亦有廣泛的交流。

二、與會心得

這是我多年出國開會遇到台灣教授最多的一次，顯示台灣在磁性研究上的一定熱度。本人為新進學者很高興有這個機會可以跟國內外資深學者交流，本人主要的領域在於氧化物薄膜成長與鐵電材料，對於磁性著墨並不多，藉由此次機會學到很多東西。

三、考察參觀活動(無是項活動者略)

會議結束，本人前往Seoul大學物理系進行專題演講主要為氧化物磊晶薄膜成長，順便與seoul大學建立合作關係。

四、建議

這類會議對於新進人員幫忙相當大，應該多進行補助。

五、攜回資料名稱及內容

論文摘要

國科會補助專題研究計畫項下出席國際學術會議心得報告

日期：100 年 3 月 25 日

計畫編號	NSC 99 - 2811 - M - 009 - 003 -		
計畫名稱	強化雷射分子束氧化物磊晶平台		
出國人員姓名	楊展其	服務機構及職稱	國立交通大學材料科學與工程學系博士班二年級
會議時間	2011 年 3 月 21 日至 3 月 25 日	會議地點	Dallas, Texas, U.S.A.
會議名稱	(中文) 2011 美國物理年會 (英文) American Physical Society March Meeting 2011		
發表論文題目	(中文) 多鐵材料鈹鐵氧之新穎疇壁結構 (英文) Emergence of 90 Degree Domain Walls in Multiferroic BiFeO ₃ Thin Film		

一、參加會議經過

會議前一天，學生到達會場參加由氧化物大師 Prof. R. Ramesh 所講述之複雜性氧化物課程教學與討論會，會議中 Prof. R. Ramesh 由簡入深，由氧化物的演進，講述至其對於科學與工業應用之重要性，並於討論會其中，引入一代表性之鐵電材料，BiFeO₃，此材料也為學生於學校研究所之主要研究材料，會議中學生亦提出問題，期以得到學術界專家的看法與解釋說明，令人受教甚深。

會議第一天，在已經相當龐大的會場中湧入了滿滿的人潮，仔細搜尋一番，不難發現發現許多物理大師與諾貝爾得主的身影，如伊利諾大學，Prof. Lane Martin，英國劍橋大學，Prof. James Scott，與新科諾貝爾獎得主等等...會議第一天早上八點學生完成註冊後，便於各大 Session 中聽取來自世界各地之傑出教授，博士後，博士生之論文發表與討論，第一天包涵邀請演講與論文發表在內，約有一千兩百人次之講座，為此過程中學生僅挑出同領域中代表性之演說與發表參加，有問題的地方學生會加以提出並尋求專家

之意見，第一天會議結束於約下午五點半，令人獲益良多。

會議第二天，學生挑戰最新學術與工業界研究都相當熱門之 graphene 議題參加，過程中學生聽取了三個邀請演講與約十個發表演講，獲益極多，也因此學生在會議中得到一些結合 graphene 與學生現今研究之議題之想法，並與同樣參與本次會議的指導老師討論，獲得指導老師相當正面之評價。學生並於第二天晚上參加由國家同步輻射中心，台灣大學，清華大學與成功大學共同舉辦之台灣之夜晚宴，晚宴中，由許多學術界中大名鼎鼎之前輩發表演說與鼓勵，中研院，國科會也藉此發表正在興建中之國家光子源之願景與建構過程。交通大學物理所所長林老師也於其中分享本校之成功經驗與願景，相當精采。

會議第三天，學生於上午十點三十六分發表論文演說，演說題目為：

Emergence of 90 Degree Domain Walls in Multiferroic BiFeO₃ Thin Film

演說過程順利，並成功獲得台下專家的共鳴，其中，值得一提的為演講過後，氧化物界權威 Prof. R. Ramesh 於發表過後親自找學生討論，並邀請學生到其位於柏克萊的實驗室做交換研究生，而費用由柏克萊校方提供，為對學生之一重要之肯定與收穫。

會議第四天，有了第三天的成功經驗，學生對自我更加抱有信心與期待，於第四天的會議期間，再次挑出兩個邀請演說與十一個發表演說參加學習，於第四天也遇到來自成大物理與中山物理的陳宜君老師與邱雅萍老師，兩位老師邀請學生與其研究生一同參加晚餐，並於晚餐過程中與台灣的學術前輩熱烈討論，也藉此經驗認識不少同年齡層之研究夥伴。

會議第五天，亦是會議的最後一天，學生再次選擇一個邀請演講與五個發表論文演講參加，整個會議於下午結束，為大會畫下完美句點，與指導老師與會議中認識的老師與同學們先約下次再見。

二、與會心得

此次會議為學生第一次到美國參與世界級頂級會議，會議中，除了聽取世界各大物理領域的專家演說以外，也聽取世界各地的教授們，博士後與博士的發表演說，除了學習到各種不同的演說技巧與方法，更跨領域地學到不同領域的專業知識，為學生的研究生涯注入活血。

而會議中，與柏克萊大學物理系教授 Prof. Ramesh 的多次會面，Prof. Ramesh 更於學生演講完畢後，主動提出建議邀請學生於往後的幾年研究生涯中，到柏克萊的實驗室與其團隊共同研究學習，為學生之一大肯定與收穫。再者，此次國際會議參與人數甚多，約有上萬人與會，但會議期間與會議規劃相當完善，大會提供之服務也先當充足，為一國際會議舉辦之典範希望未來學生還有機會參與類似之大型會議活動。

三、考察參觀活動(無是項活動者略)

無

四、建議

此次會議為學生第一次參加超大型國際會議，學生相當感謝學校與教育部的補助與資助，唯跨州至歐美之機票，註冊費用與生活費用皆偏高，為此即使學生得到相對高額之補助，但對於家境較困難之學生則仍然吃力許多，希望學校與相關單位，能適量的提高，或修改相關的補助規範，讓表現優良但經濟環境吃緊的學生可以有更多躍上國際舞台的機會。

五、攜回資料名稱及內容

此次學生攜回之資料為大會的會議手冊與秩序冊，以及與與會者討論交換之名片與聯絡資訊。而網路上亦可下載相關教學課程的投影片。

國科會補助專題研究計畫項下國際合作研究計畫國外研究報告

日期：99年10月27日

計畫編號	NSC 99 - 2811 - M - 009 - 003 -		
計畫名稱	強化雷射分子束氧化物磊晶平台		
出國人員姓名	朱英豪	服務機構及職稱	國立交通大學材料系 助理教授
合作國家	美國	合作機構	UC Berkeley Lawrence Berkeley National Laboratory
出國時間	98年6月17日至 98年9月17日	出國地點	美國加州柏克萊

一、國際合作研究過程

本報告內容主要為申請人暑假期間至 UC Berkeley 與美國勞倫斯國家實驗室進行短期研究之主要成果。該研究內容以了解 BiFeO_3 關鍵多鐵材料 domain wall 之傳輸特性。

二、研究成果

請參閱已發表論文

Q. He, C. H. Yeh, J. C. Yang, G. Singh-Bhalla, C. W. Laing, P. W. Chiu, G. Catalan, L. W. Martin, **Y. H. Chu**, J. F. Scott, and R. Ramesh, "Magnetotransport at domain walls in BiFeO_3 ", *Phys. Rev. Lett.*, accepted (2011).

三、建議

這樣的國際合作可以截長補短，實質上可以增進雙方研究人員之交流，經驗的分享，進而達到高品質研究之輸出，因此建議國科會多補助此類合作案。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/01/31

國科會補助計畫	計畫名稱: 強化雷射分子束氧化物磊晶平台
	計畫主持人: 莊振益
	計畫編號: 99-2119-M-009-003- 學門領域: 新穎材料核心設施-物理
無研發成果推廣資料	

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：莊振益		計畫編號：99-2119-M-009-003-					
計畫名稱：新穎材料開發計畫--強化雷射分子束氧化物磊晶平台							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	4	0	100%	人次	
		博士生	2	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	1	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	15	10	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

新穎核心設施之計畫概念，在於建立可以提供高品質之材料，以厚植本國在該領域之研發實力。在培養實力之過程，與國外學者之研究合作至為重要。計畫總主持人回國時間不長，但是在國外就與數十個知名之研究團體進行合作，因此在推廣平台之過程，一開始之主要對象亦與國外為主。計畫推廣後到目前為止主要的以發表成果，可以在之前的部份找到，目前仍有需多在進行的題目，以下將大概描述，以確定平台與國際合作之活力。計畫主持人於寒暑假都前往 UC Berkeley Ramesh' s group 進行技術交流。由於計畫主持人具有成長 BiFeO₃ 磊晶薄膜之關鍵技術，因此在寒暑假都指導 UC Berkeley 之研究群成長該薄膜，同時也利用台灣現有之系統，提供薄膜與該研究團體。計畫主持人與美國 Prof. L. W. Martin 合作多年，目前美國伊利諾大學香檳校區將投入資源建立氧化物磊晶平台，並聘任 Prof. Martin 為計畫領導人，所已計畫主持人持續與 Prof. Martin 合作。為了要確保平台於氧化物介面之研究方向，可以在最短之時間展現成果，本平台亦與荷蘭 Twente 大學的 Dr. M. Huijben 合作，並進行 LSMO/BiFeO₃ 之介面控制。在掃描探針技術之合作團隊亦沒有因為主持人回台灣而中斷掉，主持人利用磊晶平台，再度提供高品質之 BiFeO₃ 薄膜於美國 Oak Ridge 國家實驗室之 Prof. Kalinin，該研究團隊研究鐵電材料的尺寸效應與電極材料間之耦合作用。另一個掃描探針之合作對象為美國康乃狄克大學之 Prof. Huey，主要是由平台提供高品質 PZT 與 BiFeO₃ 鐵電薄膜，由該研究群進行超高速壓電力顯微鏡之研究。在 TEM 的部份，本平台與美國 Oak Ridge 國家實驗室 Prof. Pennycook 有密切合作，目前利用掃描式穿透電子顯微技術(STEM)研究 BiFeO₃ 與 LSMO 的介面，可以發現在 BiFeO₃ 氧的八面體在接近介面時其旋轉消失會造成 BiFeO₃ 變成導電之特性。另外一個重要的合作對象為澳洲新南斯威爾大學之 Prof. Vanaloor，雙方平台之交流相當廣泛，薄膜成長、TEM 觀察、掃描探針技術、奈米結構成長。在電性量測上，目前國外主要之合作對象為首爾國立大學的 Prof. Kim，雙方合作的題目相當廣泛，基本上只要是本平台開發出來之新式薄膜，該研究團隊都有興趣進行量測。理論的計算主要與美國加州大學 Santa Barbara 分校之 Prof. Spaldin，還有新加坡南洋理工大學之 Prof. Lang Chen。除了以上之外，仍有多個國外研究群與本計畫平台合作，目前正進行實驗中，尚未有具體成果，另有數個研究群向計畫總主持人請求信件證明，以保證此平台將會提供其高品質之磊晶薄膜，以利該研究群計畫之申請，因此證明目前之磊晶平台已具有國際之水準，可以提供國外研究團隊高品質磊晶薄膜，以厚植本國在氧化物磊晶薄膜之研發能力。

其他成果

(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

本計畫在學術期刊發表成果斐然，詳細成果茲列於成果報告中

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫延續已建構氧化物磊晶平台宗旨，利用所獲補助與前期學習經驗，建立第二套完整之氧化物磊晶研發與分析平台。建立之超高真空雷射分子束磊晶系統除提供國內外氧化物尖端研究領域之先進製程與樣品外，更進一步著重於奈米氧化物結構與多層膜材料系統之研發與研究。建立之掃描探針系統，配合以量測為主之研究群，更進一步延伸與加速氧化物薄膜材料的研發與研究腳步。本研究團隊成功將快速掃描探針系統與雷射分子束磊晶系統穩定整合，建立最快速的檢測平台，部份研究成果已於今年度被世界知名期刊接受或已將寫為論文等待發表。配合雷射分子束磊晶之研究與材料開發也準備以許多論文形式發表。

此系統現已成為國內成長氧化物薄膜之模範平台，進而厚植本國在此領域研發之能力。此一平台亦提供業界快速取得多功能與高品質之氧化物磊晶，有助於縮短業界開發新製程與元件之研發時間，同時間由於各種氧化物搭配亦由此一平台提供，亦提供業界元件製程與整合所遇到困難之解決方案。