

國立交通大學  
*National Chiao Tung University*

出國報告（出國類別：出國短期研究）

## 銅銦鎵硒太陽能電學習與開發

服務機關：交通大學 光電所

姓名職稱：蔡柏全 博士生

派赴國家：美國 香檳 伊利諾大學香檳分校

出國期間：101/05/14~101/12/31

報告日期：102/03/18

## 摘要

有幸獲得頂尖大學補助博士生赴國外研究的補助，使我有這個機會在博士生涯中到美國伊利諾大學香檳分校作為十二個月的訪問學生，**Dr. Angus Rockett** 為學生在伊利諾大學香檳分校的指導教授，其專業領域為薄膜太陽能電池元件製作、微結構的材料分析與半導體相關的模擬程式撰寫。學生在這邊除了跟這邊的老師學習在材料分析上的技巧，也會充分的利用這裡的分析設備得到更完整的實驗結果，豐富自己的博士論文。而出國當交換學生最令人興奮的就是可以到新的環境體驗新的生活，不管是文化、語言、飲食和娛樂，希望能夠帶給自己的人生有新的啟發，有句話是這麼說的：「讀萬卷書不如行萬里路」，這次能夠有這個機會，希望可以好好享受個精彩。

# 目次

一、 目的.....	04
1. 研究相關.....	04
2. 語言學習.....	04
3. 日常生活體驗.....	04
二、 過程.....	05
1. 出國先行準備.....	05
2. 新環境適應.....	06
3. 開啟研究學習之旅.....	07
4. 異國風味的文化體驗.....	08
5. 研究結果概論.....	10
三、 心得及建議.....	14
四、 附錄.....	16

# 本文

## 一、目的

### 1. 研究相關：

由於 Prof. Angus Rockett 所帶領的實驗室長期研究薄膜太陽能電池的研究，使用的基臺設備也和臺灣自己所用的類似，所以此計畫的目的主要是要訓練自己在材料分析上的方法和觀念，補齊自己在交大光電所略顯不足的材料知識背景，並利用較齊全的材料分析儀器，對自己的製程進行優化，並探討其影響。也利用這個機會希望為在臺灣的實驗室甚至是交大建立起合作的橋梁，實驗室的學弟妹們都可以利用到這邊齊全的設備，甚至也和我一樣有機會來到這個學校作交換的計畫。最後希望利用在這邊短暫一年的訓練下，可以產出更多的期刊論文甚至是專利發表，以期達到交大和實驗室的畢業門檻，早早畢業進入業界，為太陽能產業貢獻一己之力。

### 2. 語言學習：

語言學習一直是此行最大的目的，以前在臺灣總消極地提及沒有環境的我終於到了一個真的需要開口閉口用英文表達與用英語邏輯思考事情的地方，所以為了讓自己的英文能夠在短短一年內突飛猛進，除了平常利用報紙或是電視多加練習以外，自己也打算請家教來讓自己的英語能力能夠獲得修正的機會，以糾正自己在聽說讀寫上的錯誤，不然平常在跟朋友即使練習英文，他們也不太會糾正你在用字文法上的錯誤，他們還是聽的懂，讓溝通上也比較難會有真正的問題。

### 3. 日常生活體驗：

美國一直以來是我夢寐以求的旅遊和留學首選，體驗這裡的生活方式才是讓我這個在臺灣土生土長大的臺灣人更加著迷，開放的校園，多元的文化，盛行的運動風氣，豐富的地理歷史旅遊，更讓我這個熱愛運動熱愛旅遊的小留學生可以開拓更廣更遠的視野，在歷史和地理課本外學習與不同文化和習俗，到各地去探險去結交來自世界各地的朋友，讓自己已經精彩的故事更添色彩。

## 二、過程

### 1. 出國先行準備：

出國進修、學習並開闊自己的視野一直是自己在修讀博士班的規劃中最重要的一個目標之一，所以當初在選擇交大博士班指導老師的時候，有幸遇到了光電所謝漢萍教授，他要求博士班學生必須在取得博士學位前出國開闊學習視野，體驗異國經歷，故就在謝漢萍教授的指導下開啟自己博士班的學習和訓練。在長達三年半的學習及訓練下之後(中間經歷半年鴻海太陽能事業部的實習)，100年12月柏全便大膽的向謝教授提出前往美國作短期研究的想法，並獲得謝教授積極的鼓勵和協助挑選適合的頂尖大學實驗室：伊利諾大學香檳分校材料系，該系在美國大學材料領域為數一數二的頂尖科系，而所挑選的實驗室又長期致力於研究薄膜銅銦鎵硒 CIGS 太陽能電池元件的開發和其材料特性的探討，故在主動聯繫該實驗室指導教授 Prof. Angus Rockett<sup>1</sup>後，隨即得到正面的回覆。在幾次溝通後便敲定了為期一年(101/05~102/05)的伊利諾大學交換學生之旅。在謝教授的建議下得知學校的邁向頂尖大學計畫有提供經費補助給想出國研究的學生，故在得到伊利諾大學香檳分校交換計畫同意後，柏全並開始申請該經費補助，經過所辦小姐的幫忙，有幸地得到的此邁向頂尖大學計畫的補助。

在研究部分，在獲得交換計畫同意後，柏全隨即研讀了該實驗室近幾年的期刊發表，該實驗室在製程上主要以濺鍍的方式鍍膜，與我們在臺灣新竹交通大學所使用的機臺類似，而研究方向為在砷化鎵的基板上，利用高溫與共濺鍍的方式進行銅銦鎵硒磊晶層的鍍膜，比較單晶與多晶銅銦鎵硒薄膜的差異，以期探討晶界與缺陷在此材料下所扮演的角色以及對於元件特性的影響。並利用鈉元素與氬氣的參雜，開發出高效率的磊晶銅銦鎵硒太陽能電池元件。其中，該材料在缺陷上的研究以及鈉元素參雜後的在提高效率上的影響在該薄膜太陽能電池領域還未有統一的解釋說法，故在一年的交換期間中，柏全希望能在伊利諾大學香檳分校對這個方向和主題進行深入的研究。

---

<sup>1</sup> 資料來源：<http://www.matse.illinois.edu/faculty/Rockett.html>

## 2. 新環境適應：

在一切先前準備就緒後，五月隨即出發前往美國伊利諾大學香檳分校，即使相當不捨這個長大的土地和師長朋友們。一到美國香檳後，發現雖然整個城市被玉米田所包圍，但是相當吵鬧，在同學會的解釋後，才發現原來五月初為美國大學的期末考時間，而我到達的時間剛好是期末考完的第二天，故大家都在慶祝暑假的到來，不過後來才發現因為暑假的到來，較少學生待在學校，提供了柏全較多的空間和時間上熟悉這個未知的環境，未嘗不是一件壞事。

出外靠朋友這句話真的所言不假，在臺灣同學會的協助下，其實很快的對學校的環境就步上了軌道。並在材料系所辦先生的協助下，順利的取得學生証，而學校提供的校區巴士就是只要出示此張學生証就可以免費搭乘，不管是到系館或是到超市甚至是這邊大型百貨其實都變得相當方便，在沒有交通工具前，這張卡真的是提供了相當大的便利性。

在一周的環境適應後，Prof. Angus Rockett 帶我參觀了實驗室，介紹了設備齊全的材料分析中心，許多在交大奈米中心屬於貴重儀器的設備這裡都好幾臺，包括像 SIMS、XPS、TEM 等，該材料分析中心為了讓所有學生都可以親自動手了解儀器設備特性，所有機臺不管昂貴與否都可以給受過考核的學生包括大學生進行使用，這跟臺灣所多研究中心其實有相當程度的差異。Prof. Angus Rockett 並介紹了實驗室的夥伴，這個實驗室的成員有美國人，有加拿大人，巴西人，印度人以及中國人，組成相當多元，而這裡比較不同於臺灣研究室的現象則是幾乎所有的博士班研究生都已經結婚甚至有了小孩，所以因為有家庭的關係他們在下班後也比較少待在實驗室裡做研究，我想這跟西方人比較重視家庭生活應當有很大的關係。

伊利諾州位於美國中北部，夏天與臺灣天氣類似但是較為短暫，冬天會飄雪，平均溫度也在攝氏零度以下。在飲食上，由於這邊的亞洲區的國際學生頗多，故校園周遭即有三家以上的中國餐館，兩家以上的韓國餐館，校區外還有越南與印度甚至臺灣味的臺灣餐館，故在飲食上較無太大的問題。住宿方面，為了有類似的生活習慣，找了三個同樣是臺灣的留學生一起分租一個四人房的社區，雖然練

習語言的機會減少了，但是在生活上大家互相照應，還頗有家的感覺。

### 3. 開啟研究學習之旅：

開始進實驗室後，隨即就展開了一連串的儀器訓練，包括材料分析常用的 SEM、XRD、四點探針、橢圓儀、AFM、AES、XPS 以及 SIMS。每個機臺幾乎都由一位博士級的研究人員所負責，他們的工作就是教會你能夠親自操作機臺，假設遇到了材料分析上的問題，他們也會不吝惜的撥空指導，為除了自己指導教授外另外一個可以討論研究結果的管道。研究生沒有寒暑假，所以這裡的實驗室也是固定一個禮拜開組會一次，是屬於公開討論的方式，除了可以瞭解組內每一個成員的進度以外，這也是一個很好學習英文的方式，多聽多講，也練習聽懂每個人的口音和說話方式，試著以句子來回答取代 yes 或是 no 的回答方式，以期自己將來在組內回答問題時避免不必要的出糗和文不對題的回答。這個實驗室長期與不同的大學有不同的研究計畫，在跟 Prof. Angus Rockett 多次討論之後，決定接下了鈉元素參雜的計畫，以補足在臺灣因為設備限制所無法全心投入的研究領域。

因為要赴美國交換早有所計畫，故在臺灣就有在積極注意是否有適合的研討會可以投稿參加，既然來了就要把握機會多看看。有幸的投上了六月的大型會議：IEEE PVSC 38(IEEE 光伏專家會議)，會議舉辦的地點在美國南部德州首府奧斯丁，在這次的旅程中，因為幾次和 Prof. Angus Rockett 的討論，故這次的參加除了針對自己在臺灣的研究向國外的學者作深切的請教和討論，如日本青山學院 Prof. Tokio Nakada<sup>2</sup>，也花了一些心思在鈉元素參雜的文章和討論，以便將來在研究的道路上可以又更多一點想法和基本知識，對我來說這次的研討會真的是一個很好增長見聞的地方，不愧是北美最大的光伏會議。而這次旅途除了研究上的收獲外，最意外的體驗就是從伊利諾州到德州長達 36 小時的國鐵之旅，因為自己的疏忽，導致飛機票一位難求，所以只好轉向 AMTRAK 美國國家鐵路的方式前往會議地點，除了忘記帶棉被上火車以外，一切都過得比想像中好很多。網路

---

<sup>2</sup> 資料來源：[http://nakada-www.ee.aoyama.ac.jp/cgi-bin/WebObjects/12205f980c7.woa/wa/read/12205f98f30\\_0+++/](http://nakada-www.ee.aoyama.ac.jp/cgi-bin/WebObjects/12205f980c7.woa/wa/read/12205f98f30_0+++/)

上說，會搭火車的人都是有錢有閒的人，所以這次旅程中意外中在餐車遇到一群大概平均年齡有 75 歲的旅行團，導遊正帶著他們在玩猜謎遊戲，想練習英文和美國歷史地理的我正好當上了這個團最年輕的一個參賽者，當然有些問題我壓根地沒聽懂，又或者是聽懂問題但是他們的答案我也聽不懂，只能跟高二歷史地理老師道歉了，像是德州第一塊油田的年份、美國獨立紀念日、德州之父之類的，其實頗有趣的。

最後在語言學習上，在面試了三個家教後，選擇了一個在這邊教高中的英文老師 Alice，我們每個禮拜一次的上課，她都會提供很有趣的互動式教材，像是這幾天天氣很不好，她就要我充當起氣象預報員，拿起她給的圖卡，解釋起一周的天氣預報，才發現原來除了 rain，還有很多字可以形容不同程度的下雨。她也會提供包羅萬象的聽力教材，像是前一陣子的美國總統辯論或是美國選舉人的制度，都讓我除了在英文的程度上有所提升，也讓我在接觸較多的時事內容，更大大地提高了我在學習英文方面的興趣。

#### 4. 異國風味的文化體驗

美國是一個文化與種族的大熔爐，有著來自四面八方的優秀人才，其實一直很期待能夠到美國體驗一下不同的生活環境。伊利諾大學香檳分校建校於由香檳與厄巴納組成的雙子城中間，城市的周圍佈滿與玉米田，但聽說這裡出產的玉米並不是食用為主，而是作為替代性能源生質能源中乙醇的原料。但是也因為玉米田的大量面積，所以這裡的玉米也相當香甜，每年的八月底固定都有甜玉米嘉年華讓大家與玉米同樂。

同樣，美國最讓我期待的莫過於這邊不可或缺的運動風氣，每天都可以從電視上看到著名的五大職業賽，以前要熬夜爆肝才可以看到的王建民林書豪，現在在電視上就可以每天配著晚餐收看，可惜的是身為冰球迷的我，因為目前北美職業冰球因為勞資雙方還因為錢的事情正處罷工階段，不然真的很想到冰球場的第一排為這個自己所熱愛的運動瘋狂吶喊一下。除了職業賽，校園裡面的運動也是

相當多元，來到美國校園最不可以不提的就是美式足球了，一個四、五萬人的體育場，每當到了主場比賽的周末，總是把這個體育館擠的一位難求，能夠跟大家一起瘋狂看球的感覺真的很好，真的跟梅竹賽一樣，主場球迷總是瘋狂總是不講理的為自己學校加油喝采。當然自己也來到的美國，也不願放棄自己的所愛：冰上曲棍球。在這邊報名參加了一個成年人聯盟，前一陣才結束了秋季的賽季，我和我所屬的藍隊幸運的以不敗的戰績打進了季後賽甚至拿下了最後這季的冠軍，在隊友的幫助下還在冠軍賽射進了難得的帽子戲法(單場三得分)，讓這季的比賽畫下完美的句點，希望下一季還可以跟這群隊友在繼續拼下另一個冠軍。

美國是一個由 50 個州組成的聯邦，所以有相當多的地景風貌可以去旅行體驗，第一個首選當然是離我最近的又是美國第三大中部最大城：芝加哥。芝加哥最有名不外乎是他的建築行程，因為 1871 年的芝加哥大火，雖不幸但也給了這個城市新風貌的機會，這裡摩天大樓群立，在美國本土中前五大的摩天大樓就有 3 個在芝加哥，可謂是全世界最高的城市天際線。因為研討會的關係，我的旅遊觸角也延伸到了美國最南邊的德州首府奧斯丁，享受了那邊最有名的 live music，也在感恩節期間去參觀了北邊威斯康辛州的首府麥迪遜，雖然此行無法完成夢寐以求的滑雪之旅，但是一趟五、六個小時的鄉村公路旅行，實在可以給人一種相當清新的舒適感。

而要體驗美國真正的文化習俗，就不可以錯過他們年底一連串的萬聖節、感恩節和聖誕節了。為了體驗這些文化，我和我的室友們和這邊的留學生在萬聖節舉辦了變裝派對，每個人都精心打扮就怕自己看起來比別人不可怕，甚至跑到了校園最熱鬧的 Green 街上，與所有“鬼”同樂，我其中一個朋友還在臉書上面留言：“此時的 Green 街上已經沒有半個人類了”，讓我們真的啼笑皆非；而在感恩節，所有朋友也群聚一起一起感恩緣分讓我們可以在飛過 7000 英哩外還可以群聚在一起，我們甚至自己烤火雞烤了牛肋排和準備臺灣人不可或缺的麻辣火鍋，最後還用感恩節傳統必備甜點南瓜派收尾，這是在臺灣都無法體驗到的經驗，是除了在日常研究外，強迫自己必須要嘗試和冒險，希望接緊而來的聖誕節我也可以真正體驗到最傳統的雪花紛飛裡聖誕節才是。

## 5. 研究結果概論：

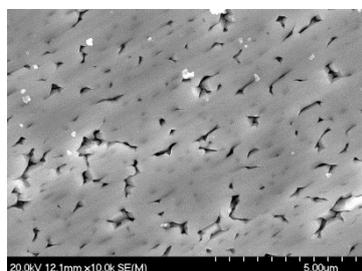
經過幾個月的努力，在機臺學習部分，我學會了一臺四點探針，兩臺 XRD，兩臺 SEM+EDS，一臺 AES，一臺橢圓儀，一臺 AFM，目前正計畫學 PL 和 CL，但還有很多機臺正在評估對自己的實用性，像是 TEM 和 KPFM，希望利用這些伊利諾香檳分校材料系裡的優勢，探討並分析自己的實驗結果。

銅銦鎵硒薄膜太陽能電池是最具潛力的太陽電能技術之一，優點如下：(1) 基材成本便宜，普通的鈉玻璃及不銹鋼片即可作為基板；(2) 吸收層是結晶薄膜，轉化率高；(3) 屬化合物半導體，安定性佳，長時間使用無衰退的問題；(4) 黑色吸收層，可見光頻域吸收系數高。目前 CIGS 太陽能電池在研究階段已達 20% 轉換效率，理論上最高可達 29%，而大面積模組化效率僅有 9.6-13.6%，效率方面具有很大的提昇空間。然而和結晶矽太陽能電池不同的則是目前最高效率的元件是由多晶銅銦鎵硒薄膜所實現，單晶的銅銦鎵硒薄膜反而達不到如此高的轉換效率，其中的差異就是在於晶界的多寡了，而目前各個實驗室也正積極在討論晶界在次薄膜太陽能電池中所扮演的效應。再者，就如同先前所說，鈉元素擴散進銅銦鎵硒薄膜中會提升太陽能電池的特性表現，文獻提到主要可能來自提高導電性、幫助晶粒的長大和結晶方向，但是都未有明確的證據表示鈉元素在其薄膜材料中所扮演的角色是如何幫助效率提升，更有文獻表示鈉元素在薄膜中主要是存在銅銦鎵硒的晶界上而並非在晶體本身，其元素在晶界上所扮演的角色更值得深入的探討。

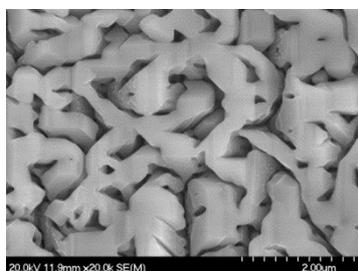
針對此議題，柏全在 Prof. Angus Rockett 的指導下，開始了相關化合物半導體不同組成元素[ (Cu,Ag)(In,Ga)Se<sub>2</sub> ]元件的製作，為了比較出單晶銅銦鎵硒和多晶銅銦鎵硒中晶界所扮演的角色，我們同時採用了非晶的玻璃基板以及單晶的砷化鎵基板，利用磊晶的方式長成單晶的銅銦鎵硒薄膜，並利用不同方式的鈉參雜方式，如表一。

表一 實驗相關變因

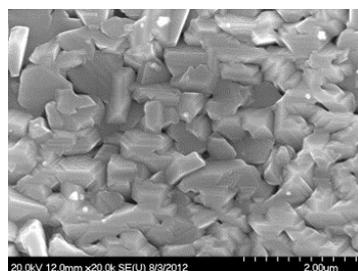
項目	化合物材料	基板使用	鈉元素參入方式
種類	1. CuInSe <sub>2</sub> -銅銦硒 E <sub>g</sub> ~1.02ev 2. AgInSe <sub>2</sub> -銀銦硒 E <sub>g</sub> ~1.24ev 3. CuGaSe <sub>2</sub> -銅鎵硒 E <sub>g</sub> ~1.68ev	1. Mo coated glass 2. 001 GaAs wafer 3. 111 GaAs wafer	1. 未添加 2. NaF 預鍍層(CIS 之前) 3. NaF 後鍍層(CIS 之後) 4. NaF 共濺鍍(CIS 同時) 5. NaF&In 預鍍層(CIS 之前)
備註	探討不同能隙 E <sub>g</sub> 大小對特性效率的影響。	探討多晶以及磊晶層的薄膜在晶界上所產生的效應。	不同濃度以及不同製程方式所參入的鈉元素對效率所產生的變化。



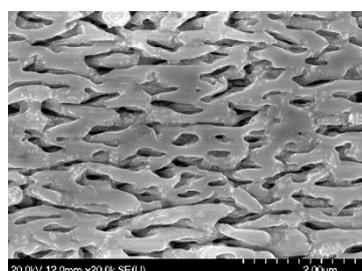
無添加鈉 CIS 薄膜



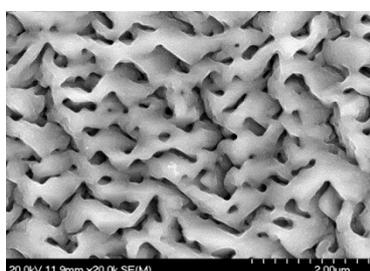
0.5 分鐘預鍍鈉 CIS 薄膜



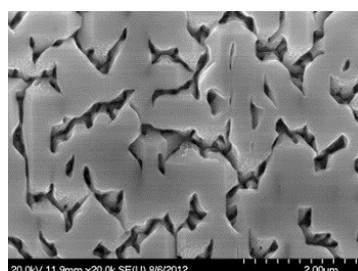
1.0 分鐘預鍍鈉 CIS 薄膜



1.0 分鐘後鍍鈉 CIS 薄膜



45.0 分鐘共濺鍍鈉 CIS 薄膜

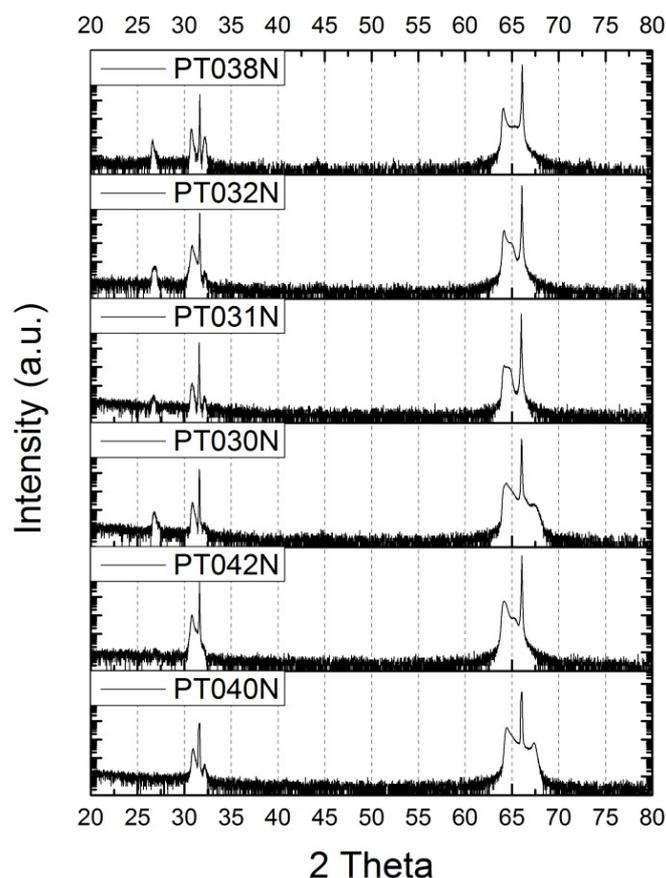


1.0 分鐘預鍍鈉與銦 CIS 薄膜

圖一 不同鈉元素參入時間的 CIS 薄膜 SEM 圖

目前已完成 CIS 薄膜相關元件製作和量測，由於在高溫長晶的同時基板的

Ga 亦會經由擴散進入 CIS 薄膜，所以同時必須考慮 Ga 擴散後所進行的取代。由 SEM 圖中所表示(如圖一)，在無添加鈉的 CIS 薄膜屬於接近單晶的 CIS，而在不同的鈉添加方式下，不同程度的破壞了其結晶方式到了多晶 CIS 薄膜。以圖二 XRD 的結果來說，可以看出在當 NaF 預鍍層超過一分鐘(NaF 約 10nm 厚)以上就會開始產生多晶的 CIS 相 ( $2\theta = 26.7^\circ$ )，而在圖中  $31^\circ$  和  $66^\circ$  皆為代表 GaAs 的基板訊號，分布在此兩條訊號左右兩邊分別代表了 CIS 和 CGS 薄膜的訊號(CIS 晶格常數較基板 GaAs 大，訊號向左偏移，CGS 晶格常數較基板 GaAs 小，訊號向右偏移)。所以可以得知超過一分鐘的 NaF 會不利於我們得到磊晶的 CIS 薄膜。

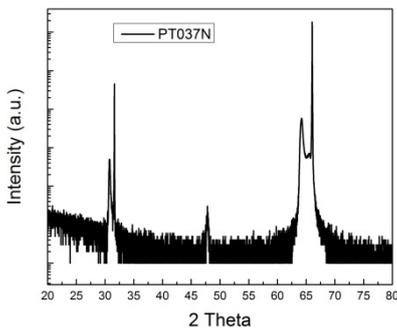


圖二 不同時間 NaF 預鍍薄膜下 CIS XRD 表現(由下而上為 0.5,1.0,3.0,7.0,10.0 分鐘)

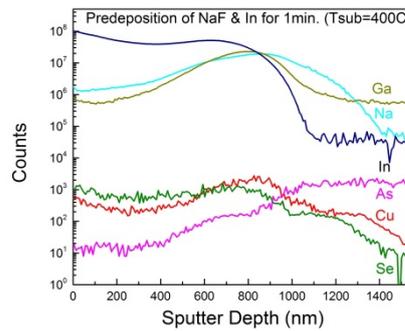
表二 不同鈉元素添加方式的 CIS 元件特性表現

編號	Na 方式	Na 時間 (分鐘)	Voc (mV)	Jsc (mA)	FF	Efficiency (%)	Shunt (ohmic)	Series (ohmic)
PT030N	NaF 預鍍	1	351	32.2	49.2	5.6	24.4	2.4
PT043N	NaF 共濺鍍	45	248	21.6	44.8	2.4	19.3	3.8
PT037N	NaF&In 預鍍	1	355	34.7	54.5	6.7	8.1	2.4
PT048N	NaF 後鍍	1	28	4.55	25	0	164	6.1

在磊晶薄膜的元件特性表現上(如表二)，可以清楚的看到 NaF 後鍍膜的添加鈉方式無法產生任何的轉換效率，而共濺鍍的方式也相對的到較低的轉換效率，齊步理想的效果可以從其充滿孔洞的 SEM 圖(圖一)中得到特性表現不佳的結論。而經過比較的結果，NaF&In 預鍍的方式可以得到最高的 6.7%的效率，雖然比起多晶 CIS 的結果還有段落差，但是經過這批的實驗結果我們可以得知在一分鐘的鍍膜時間下的鈉濃度與 NaF&In 預鍍的方式可以有較佳的參雜效果。為了充分研究此 NaF&In 預鍍樣品元件，我們將 PT037N 樣品透過 XRD 和 SIMS 進行量測，發現了在 XRD(圖三)的結果，除了不同程度的 CIS 和 CGS 磊晶在 GaAs 上以外，在 47.8 度左右發現了一與其他樣品不同的訊號，比對 SIMS(圖四)的結果，預測在基板表面大量的 As 由基板向薄膜擴散產生了 InAs 的化合物，而為何此化合物會在此太陽能電池中出現將會視後續研究的方向之一。



圖三 PT037N XRD 圖



圖四 PT037N SIMS 元素縱深剖面圖

### 三、心得及建議

從 2008 進入交大開始修讀博士班，博士班雖然是一條漫長的旅途，但是一路上在謝教授的提攜和照顧下，多了很多不同於別的實驗室的機會和經歷，就如同企業實習和出國進修，讓柏全在實驗室學習研究和業界實務經驗甚至是出國的人生體驗，都比起一般研究生幸運得多。能得到這個機會心中還是要感謝謝教授一路上的支持和祝福。

在美國交換訪問這半年期間，一切生活上和研究上比想像中順利許多，除了結交到很多新的朋友和認識很多同在一起打拼博士學位的同事，每個人雖然各司其職，但是也相互幫忙，雖然實驗室長膜腔體只有一個，但是大家安排好時間，用起來也是相當方便。除了實驗室內，因為齊全的材料分析設備，這邊的實驗室和許多學校也有合作，有些實驗室負責長膜，有些實驗室負責製作元件，最後我們可以對每一階段的薄膜材料作材料分析和特性分析。所以在這邊作事只要肯問就一定會有事情作，只要肯提出，就一定會有人會幫忙，把博士班當作一個職業，教授當成老闆，把自己當作一個專案的執行者，就像一個小公司一樣地運作，其實也還不錯。

交大的研究設備在臺灣的大學中算是得天獨厚，緊鄰國家奈米實驗室 NDL，又有交大奈米中心和工六材料所的設備可以使用，但是在來到這邊之後真正珍惜的其實是這邊相對於材料分析的軟硬體設備。硬體資源上，伊利諾香檳分校裡有相當多的實驗機臺可以預約使用。在交大因為使用的人很多，又加上相當多的機器不是掛在貴儀下而使用經費龐大，就是專屬於某些實驗室使用，導致僧多粥少，實驗樣本好不容易作出來了卻產生苦無分析儀器使用，又或者是好不容易等到一個月預約到的儀器了卻沒有樣品可以使用，一來一往很多時間都花在等待上面，對於實驗進度實在不太方便掌握。更重要的是在軟體資源上，中心希望學生們都可以自己動手操作所以不代作委託，所有學生包括大學生只要有興趣都可以請博士級的研究人員對你進行訓練和考核，之後就可以預約使用。使用完之後，每一個基臺的負責人你也可以跟他們進行一對一的研究討論，雖然他們不一定是你的領域，但是總可以讓你知曉你在實驗上所出現的問題，給予你下一次使用儀器上

的建議，這是在交大作實驗比較少得到的幫助。譬如當初我們也想要利用 SIMS 對鈉元素擴散進行縱深分析，但由於使用上經費相當大，再者機器被預約的狀況相當忙碌，就只能先緩著進行。

最後，還是很感激這次經費的支持能讓我到美國進行學術上和人生上的提升，第一次離家千里外學著照顧自己的生活起居，一切都非常新鮮且充滿挑戰，最後用伊利諾大學香檳分校的校訓砥礪自己：“*Learning and Labor*”，希望自己可以在這個軟硬體設備齊全且美國工程領域前三大系所多學多作，豐富自己的人生知識與經驗。

#### 四、附錄-相關照片



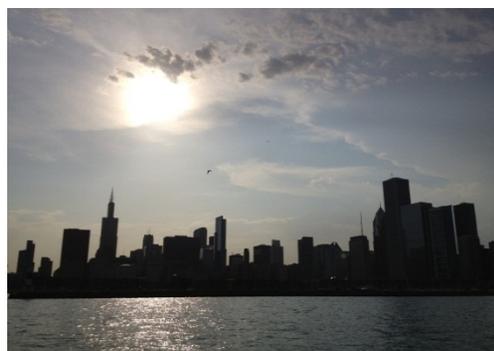
校園一景，著名的 Union 南邊 Quad 草皮，是夏日日光浴的好去處。



Grainger Engineering Library 這是北美有名的格蘭傑工程圖書館。



美國最著名的校園運動賽事-美式足球，在伊利諾大學主場。



芝加哥最有名的天際線，左邊第四棟為目前為全美最高摩天樓-Wills Tower。



芝加哥著名地標 Cloud Gate，設計者希望將芝加哥著名的建築用此映照出其美感。



第一次的大聯盟獻給了芝加哥白襪主場對戰紐約洋基。



感恩節大餐，自己烤了五個小時的大肋排和三個小時的大火雞。



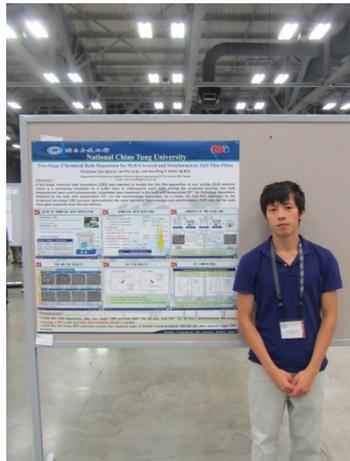
感恩節期間與朋友同遊威斯康辛州首府麥迪遜街頭。



Prof. Angus Rockett(中)實驗室成員。



香檳成人冰球聯盟。



六月參加在德州奧斯 38th IEEE PVSC 會議。



萬聖節變裝派對，treat or trick。



同遊威斯康辛州第一大城密爾瓦基，後為著名美術館。