

連續生產型超高頻電漿增強式鍍膜設備設計及其性能探討

Design and Performance of Continuous Production Type VHF Plasma Enhanced Coating Equipment

黃俊凱、葉昌鑫、翁敏航、蔡潔娃、張慎周、吳春森

Chun-Kai Huang, Chang-Sin Ye, Min-Hang Weng, Shang-Chou Chang, Chun-Sen Wu

電漿增強式化學氣相沈積裝置 (PECVD) 為光電半導體產業中，極關鍵之製程設備，該設備的量產型態最佳方案一直是業界持續關注並投入之研究項目。其中連續生產型 (In-line type) 是高性價比之量產方案，尤其可對應於需求高產能的太陽光電產業，特別是異質鍍膜的量產製程，例如高效率的矽晶異質界面太陽能電池結構。本文將就連續生產型 PECVD 設備之設計流程與關鍵技術內容進行介紹，從設備架構的選用考量，乃至其中的關鍵模組包含加熱系統、射頻系統、流體結構建構進行說明。設備開發過程中以射頻電磁場、熱流體分析等技術為主體，搭配量測儀器的協助使用，解構 PECVD 設備中射頻能量的行為，對設備效能之影響，如電漿分布均勻性的各種設計考量。對於需求高穩定性、高產能之量產型 PECVD 設備業者而言，能夠提供其相關設備之自主化生產方案。

Plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) for the optoelectronic semiconductor industry, the most critical of the process equipment, the production of the best mode of equipment has been the industry continued attention and investment projects. Among them, the continuous production (In-line type) is a cost-effective production program, in particular, can correspond to the demand for high-capacity solar photovoltaic industry, especially heterogeneous coating production process, such as high efficiency silicon dioxide hetero surface solar cells structure. In this paper, the design process and key technical contents of continuous production PECVD equipment are introduced. The selection of equipment structure and even the key modules include the heating system, radio frequency system and fluid structure construction. Equipment development process to radio frequency electromagnetic field, hot fluid analysis and other technologies as the main body, with the use of measuring instruments to assist the use of deconstruction of PECVD equipment in the RF energy behavior, the impact of equipment performance, such as plasma distribution uniformity of various design considerations. For the needs of high stability, high production capacity of the production PECVD equipment industry, to provide its own equipment, independent production program.

一、前言

近年來，光電與半導體業為台灣經濟體系中的主力，也帶動相當多周邊產業的興起，其中設備產業是關鍵的一環，但廠商多半採用國外設備廠商的產品，其價格昂貴，因此造成業者在設備攤提上成為獲利來源的一大負擔，並且也有無法同時掌握關鍵技術包含製程與設備的隱憂存在。近年國際大廠不竭盡所能投入大量資源進行相關關鍵設備的研發，設備能力的掌握成為了成功之鍵。其中設備鍍膜製程設備，尤其是量產型的電漿輔助化學氣相沈積系統 (PECVD)，一直是國內設備業者始終無法攻克的市場之一，被國際大廠如美商應用材料⁽¹⁾、韓國周星工程公司⁽²⁾、日商優貝克⁽³⁾ 長期佔據，因國外設備售價高昂使相關業者在產線的擴充上產生疑慮與卻步，尤其是目前市場景氣較低迷之太陽能電池。對於發展高效率太陽電池，如矽晶異質接面太陽電池，PECVD 為必要設備，也因此造成研發腳步放緩。為減少進口設備依賴，並降低國內業者生產成本，當務之急為提高提升相關零組件與設備自製率。本文將本單位多年培養的 PECVD 關鍵零組件技術及真空電漿系統整合技術，以連續

生產型 (In-line type) 之試量產型 PECVD 為題，介紹該設備之設計流程與關鍵技術內容，期望能提供有設備業者需求者一套開發模型。本文內容將首先對於 PECVD 原理及形式進行簡介，及對應於 In-line PECVD 設備的設計方式及其應用進行相關探討。

二、超高頻電漿增強式鍍膜設備原理

PECVD 典型的設備形式如圖 1 所示，藉由兩電極板間產生之電場造成之二次電子解離氣體，產生電漿。其中鞘層 (sheath) 產生於電漿區邊緣，亦即是基板上，並藉由鞘層偏壓，產生蝕刻與沈積機制。其中的化學氣相反應係藉由活性強的自由基 (radical)，產生化學合成新的產物。常見如：氧化矽 (SiO_x)、矽基薄膜氫化非晶矽 (a-Si:H)、氮化矽 (SiN)，皆為常見於光電半導體產業之應用。PECVD 中電漿產生條件需達到崩潰電壓 (Breakdown voltage)，其現象可以圖 2 所示的依據帕邢定律 (Paschen's law) 的曲線來描述，二電極間開始形成電弧或放電的崩潰電壓是氣體的壓力和電

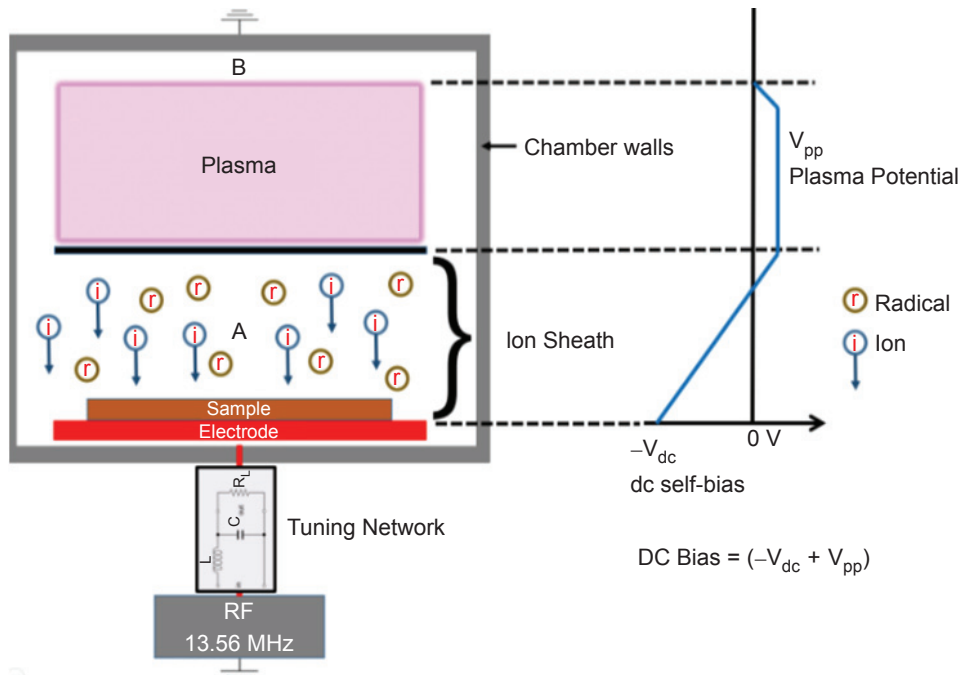


圖 1. 電漿化學氣相沈積原理⁽⁴⁾。

極距離乘積的函數。對應不同氣體、極板間距、壓力條件下產生崩潰電壓，才能達到電漿產生條件。並藉此使條件來規劃設備製程參數範圍 (功率密度)、真空性能 (壓力)、硬體 (電極間距)。

PECVD的能量來源電漿電位通常採用射頻電源 (Radio frequency, RF)，圖 3 所示為輸入之射頻

交流電位將形成電漿電位與直流偏壓驅使鞘層偏壓的出現。本設備於視為射頻電源功率輸入到電極板上時，需達成阻抗匹配，達到最大功率輸出至電極板，用以產生電漿。可以圖 4 所示之等效電路進行探討，電路系統由功率產生器、阻抗匹配器 (impedance matching box)、腔體所構成。

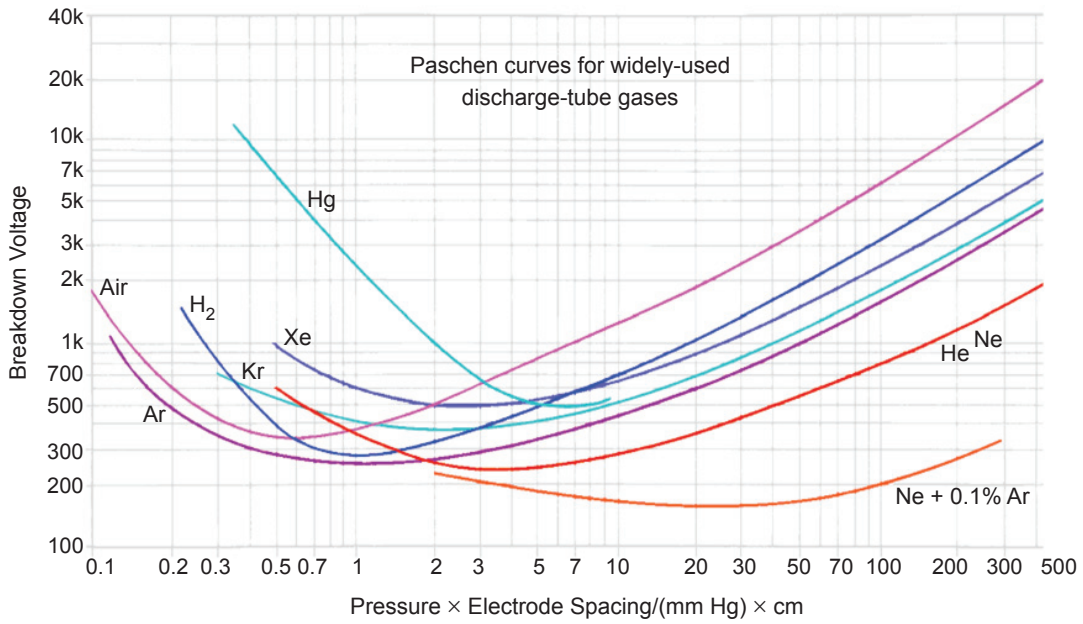


圖 2. 帕森放電原理，不同氣體壓力對電壓關係圖⁽⁵⁾。

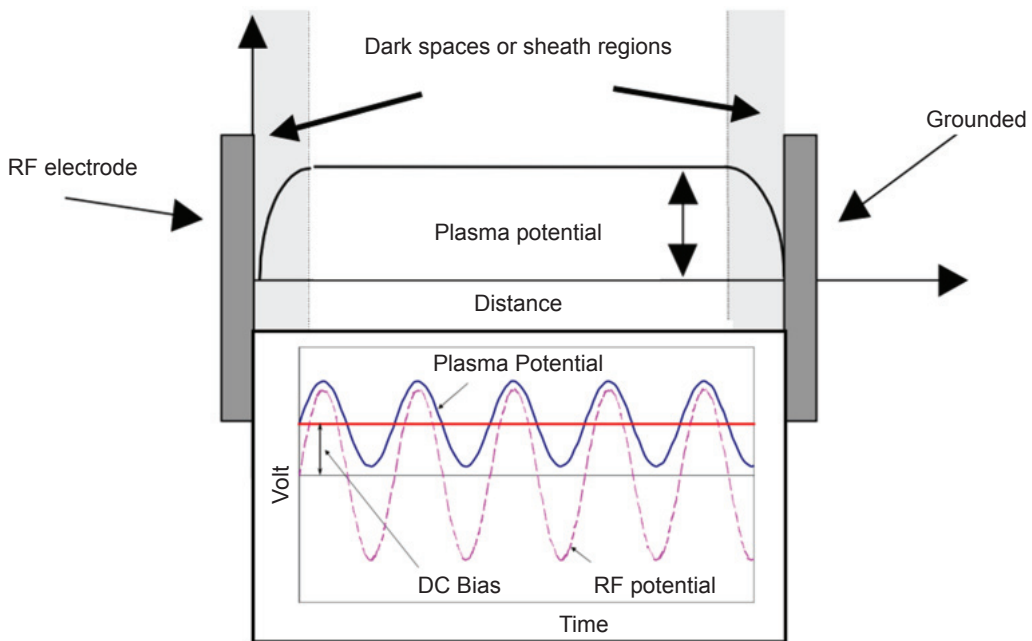


圖 3. 電漿電位與電極板相對關係⁽⁶⁾。

電源供應器的形式主要頻率，目前計有，微波 (2.45 GHz)、射頻 (13.56 MHz、27.12 MHz)，VHF (40.68 MHz、60 MHz)⁽⁷⁾，電漿源形式則主要有線型電極、電容耦合式電極、電感耦合式電極三種，其分別如圖 5(a)、圖 5(b)、及圖 5(c) 所示。

量產的考量上，腔體形式有有叢集式 (cluster)、連續生產型 (in-line)、批次 (batch)，其差異在於建置成本、佔地空間、產能、及連續進行異質鍍膜製程之交互污染程度，其架構分別如圖 6(a)、圖 6(b)、及圖 6(c) 所示，一般而言，cluster 式腔體佔地最廣，建置成本最高，但是交叉污染的程度最低。In-line 式設備產能最快，但是交叉污染程度較叢集式高。batch 式建置成本最低，然而在腔體產能上及交叉污染抑制程度上，相對前述兩種架構較低。本文中將對以製矽晶異質界面之太陽能電池為目標，所開發之 In-line 式 PECVD 設備，進行設計及性能上之探討。

三、In line 超高頻電漿增強式鍍膜設備應用

太陽電池產業中，因毛利較低，過高的設備成本降低了業者投資意願。因此較適當之設備形式為 In-line 式，相較於 cluster 式腔體，在整體系統上，節省成本達 30% 以上，相較於 batch 式量產型設備則更具有製程彈性，也因此具有最佳的性價比。將介紹採用 In-line 式 PECVD 作為試量產設備，用於開發矽晶異質界面高效率太陽能電池⁽⁹⁾，沈積其中本質層與摻雜層的非晶矽薄膜。

1. 腔體架構配置探討

圖 7(a) 所示為 In-line 式 VHF PECVD 設備實機，配置有自動化晶圓傳輸系統控制模組，此模組主要由預熱承載腔體 (load/unload chamber) 與真空傳輸機構系統模組 (In-line transport system) 所組

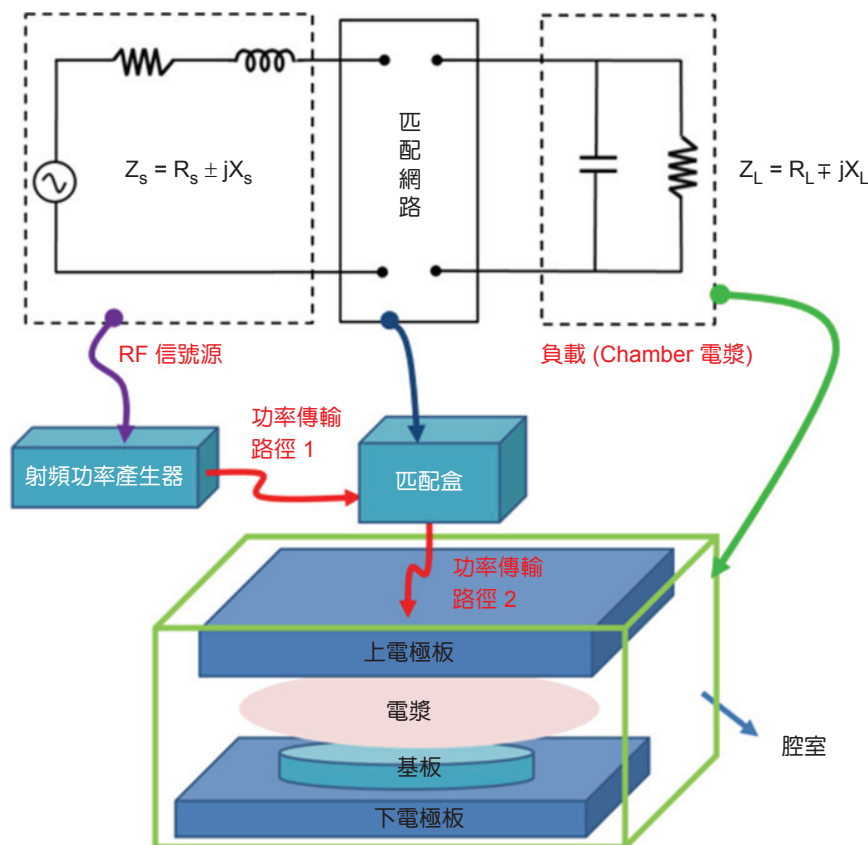


圖 4. 典型的 PECVD 所包含之射頻系統等效電路。

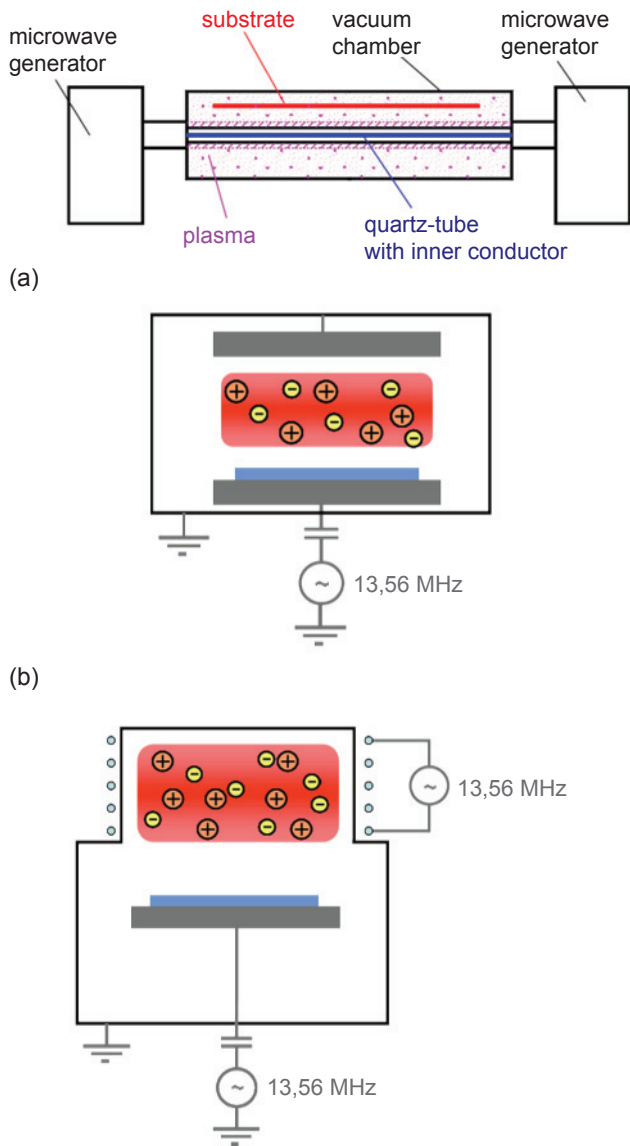


圖 5. (a) 線型電極⁽⁸⁾，(b) 電容耦合式電極，(c) 電感耦合式電極⁽⁹⁾。

成，將晶圓放置於卡匣 (carrier) 內，並置於預熱承載腔體中，將預熱承載腔體的環境壓力預抽至低真空，並由預熱承載腔中對晶圓進行預加熱。若沒有預熱腔，製程每次都要破真空，或只能單用製程腔加熱，製程時間會較長而降低產出。

真空傳輸機構系統模組將製程所需晶圓傳輸至高真空主製程腔體進行薄膜沉積，如此設計可降低環境水氣與污染物直接與製程腔體接觸，增加製程

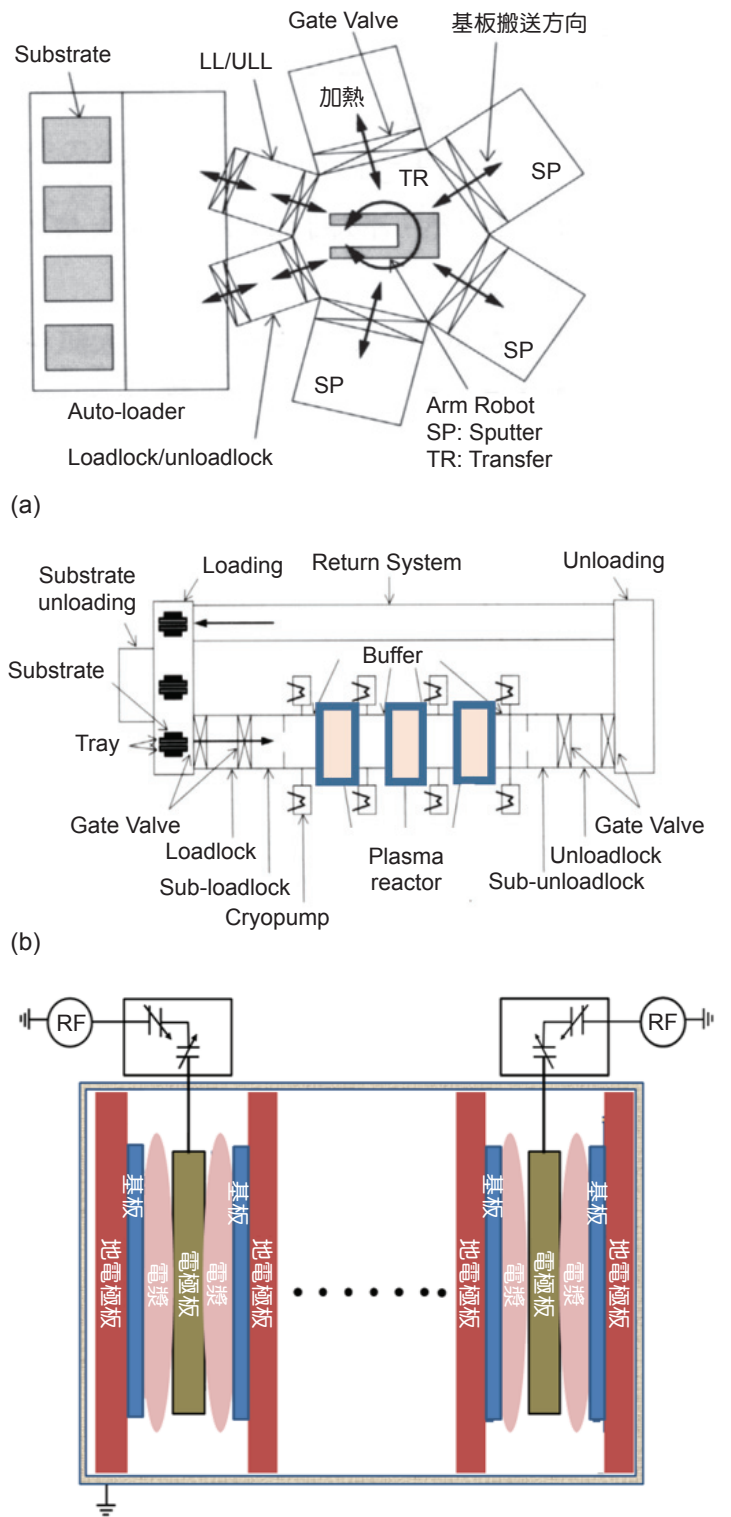


圖 6. PECVD 設備架構腔體形式 (a) 叢集式 (b) 直線式 (c) 批次式。

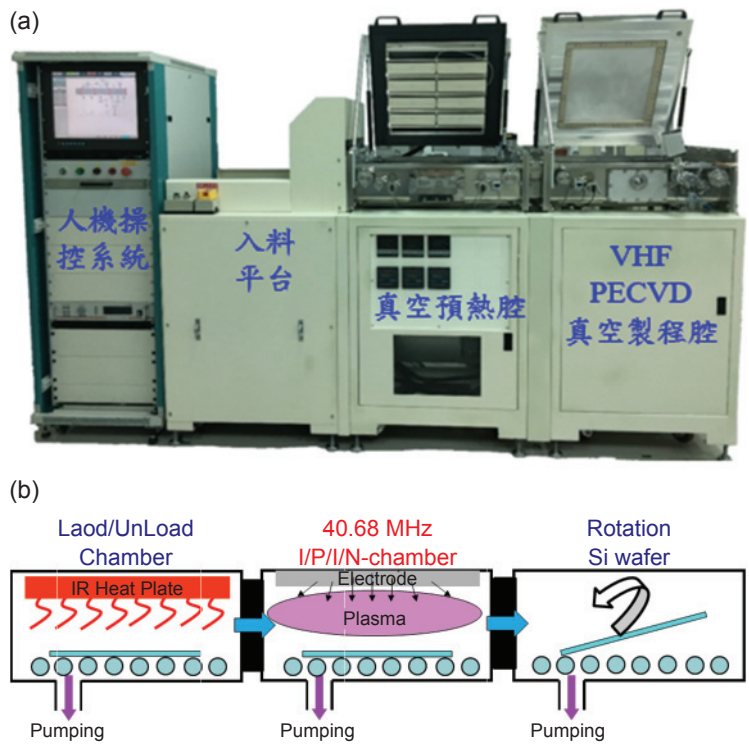


圖 7. In-line 式 VHF PECVD (a) 實體設備架構 (b) 具有雙面鍍膜功能之設備架構。

間穩定度與製程生產速度。此外，亦可以擴充真空中翻面機構，即可以因應基板雙面皆需鍍膜之需求。圖 7(b) 所示則為 In-line 式連續生產型雙面鍍膜設備配置示意圖，採用超高頻電漿可以降低離子轟擊能，實現低缺陷的薄膜鍍膜，再搭配真空中翻轉設備，即可有效完成雙面鍍膜配置，完成矽晶異質接面電池的雙面鍍膜製程。

製程腔體內部配置有包含一噴氣頭、一加熱器，一組搭配匹配電路的射頻功率饋入路徑，一用於承載基板且與腔體產生相對電位的電極板，以及一組進氣及出氣孔洞配置用以通入氣體及進行抽真空之動作⁽¹¹⁾，其架構係如圖 8(a) 所示。此種 CVD 腔體設計稱為平行板電容耦合式結構，採用 40.68 MHz 頻率，藉以降低離子轟擊，達到低介面缺陷之效果。圖 8(b) 所示為該基板載台，其尺寸為 400 × 400 mm，可承載四片 156 × 156 mm 晶圓基板。

於摻雜層鍍膜時，為避免交叉污染本質層，可採用分腔室鍍膜，亦或是鍍膜過程中，採用適當製程方式降低該現象⁽¹¹⁾。

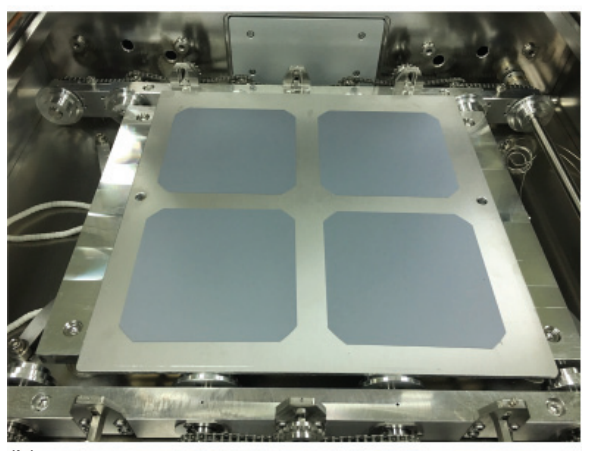
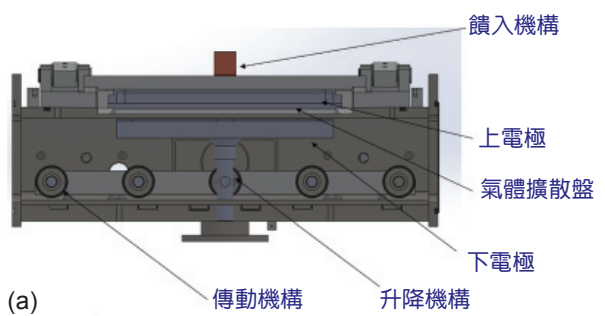
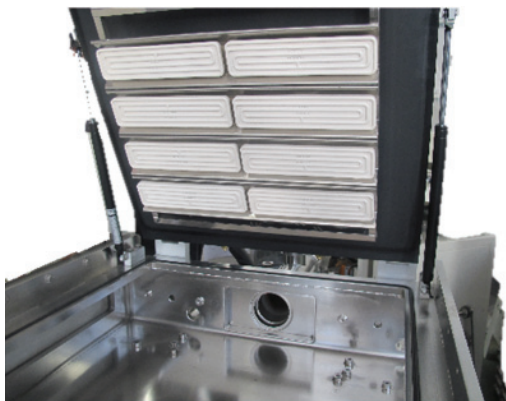


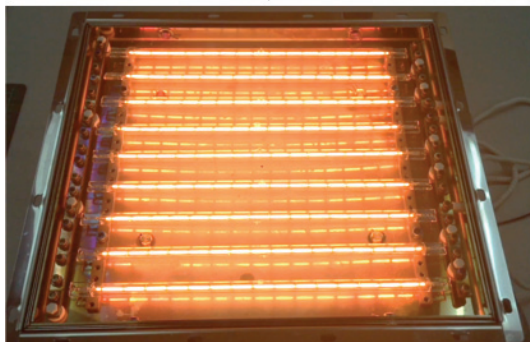
圖 8. In-line PECVD (a) 製程腔體架構 (b) 基板載座配置。

2. 關鍵模組設計：加熱系統、射頻功率系統、流場模組

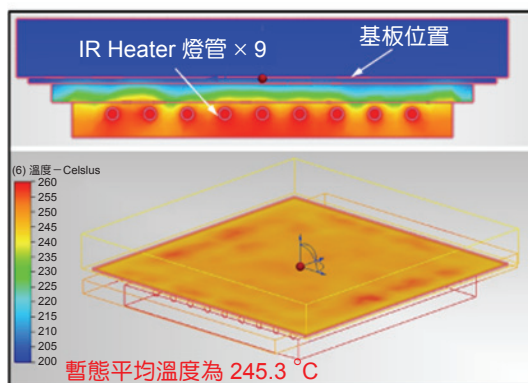
CVD 設備是由多個各具功能性的零組件，及次模組所構成之系統，需針對個別零組件，進行系統性規格需求的設計。其中，加熱系統為一關鍵模組，包含配置於預加熱腔與製程腔中。陶瓷加熱器作為預熱承載腔中，對晶圓進行預加熱，可以由



(a)



(b)



(c)

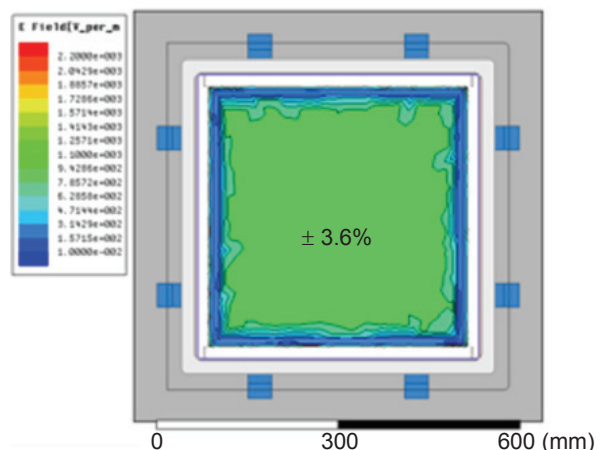
圖 9. In-line PECVD (a) 預熱腔加熱系統 (b) 製程腔加熱系統 (c) 製程腔加熱系統之溫度分布場。

加熱過程中，降低基板及腔體內水氣含量，其於腔體配置如圖 9(a) 所示。另製程腔之加熱系統採用配置紅外線加熱系統 (infrared ray heater)，運作時狀態如圖 9(b) 所示。可藉由 CFD 軟體來模擬其溫度分布場，決定燈管配置間距及相關布局以達到較佳均溫性，如圖 9(c) 所示。

射頻功率系統在腔體中電漿反應的產生上，其效能為至關重要的，藉由成功傳導射頻功率至腔體中電極板上以產生電漿，以及輸入之射頻電流，其傳導於電極板表面所分布之電場分布形貌，將影響電漿分布形貌狀態，進而影響到鍍膜結果。首先針對基板大小，片數等產能需求來定義腔體尺寸雛形，其後採用電磁模擬體 HFSS 輔助建構硬體設計⁽¹²⁻¹³⁾，圖 11 所示為電磁模擬體 HFSS 建構主要硬體設計流程到實際生產製造之前的工作流程。一般視基板大小考量需均勻性，會採用電極連接多饋入電流連接點之設計⁽¹⁴⁻¹⁵⁾，如圖 10(a) 所示，採用雙



(a)



(b)

圖 10. PECVD 電極板 (a) 饋入電路 (b) 射頻電場分布。

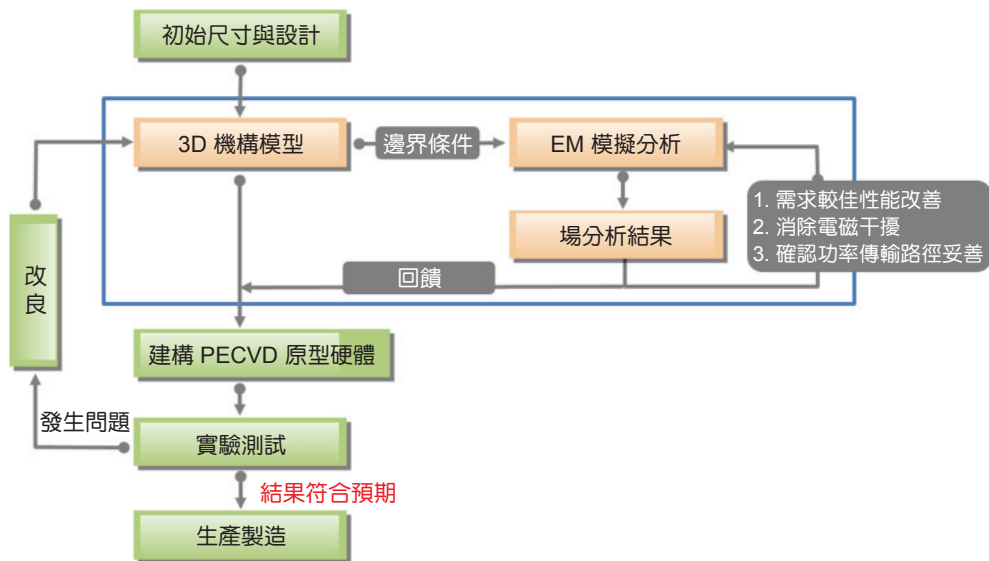


圖 11. 電磁模擬軟體於 PECVD EM 現象探討設計流程。

埠饋入結構相較於單埠饋入結構，具有較佳效均勻分配功率之效果，其結果如表 1 所示。圖 10(b) 所示為分析之電場分布，其電場不均勻性為 3.6%，電場強度與鍍膜均勻性相呼應之趨勢已被證實⁽¹⁴⁾。

圖 12(a) 所示為針對射頻系統進行測試架構配置之實測照片。採用射頻功率探針連結電極板架構進行測試，並對於射頻功率產生器單機、及連接阻抗匹配器之後的啟動狀態進行長效性測試，藉以觀察射頻模組的穩定度。另將射頻功率探針配置於各射頻功率輸入節點，測試時於輸出端連接假負載測試其射頻功率傳輸路徑之效能。圖 12(b) 顯示其感測器測試結果，其藉由感測到的電壓電流顯示該節點上之輸入阻抗、波型、諧波狀態。

在 PECVD 鍍膜均勻性的影響因素上，流場模組是為關鍵重點，其建構上會搭配流場分析來進行優化，圖 13(a) 所示為氣體分散板配置於腔體上方，跟電極板為共構結構。並利用 CFD 軟體進行分析，圖 13(b) 所示為 PECVD CFD 模擬速度擴散分佈，其中流速不均勻性為 7.31%。

在確定電極板、氣體分流板形式、腔體硬體形

式後，需進行製程腔體阻抗之靜態阻抗量測。其將作為負載，並藉由此負載阻抗，作為相對應的匹配器阻抗匹配範圍之選擇依據。腔體阻抗的探討流程，腔體大小取決於產能與基板類型，定義出腔體大小後，對該腔體進行阻抗估測。在邊界條件設定之下，確實可用模擬的模型來做為評估射頻功率模組 (包含功率匹配器) 的依據⁽¹⁵⁾。利用圖 14(a) 所示之腔體阻抗量測儀進行量測，圖 14(b) 所示為採用阻抗分析儀之量測結果，其計算 In-PECVD 腔體阻抗為 $5.9R + j21$ ，適用小於 50 歐姆之正 L 型匹配電路，並採取 L 型電路元件設計之匹配器其阻抗匹配範圍於圖中藍色區域，並且符合於最佳匹配範圍 $0 \leq R \leq 100, -180 \leq x \leq 180 \text{ Ohm}$ 內 (紅色區域)。

3. PECVD 性能探討

設備進行製程後，可將進行鍍膜均勻度分析，採用膜厚量測儀器，以 a-step 及橢圓偏光儀搭配進行薄膜厚度量測，其中橢圓偏光儀是為量測低薄膜厚度 (100 nm 以下)。另外還可以採用如圖 15 所示之量測電漿光發射光譜儀 (OES)，量測電漿態，亦或是電漿探針，量測電漿濃度，作為設備與製程是

TYPE	Vmax (V/m)	Vmax (V/m)	$\pm \Delta V$ (%)
單埠饋入結構	943	829	6.43
雙埠饋入結構	785	730	3.63

表 1. 單埠饋入與雙埠饋入結構之比較。

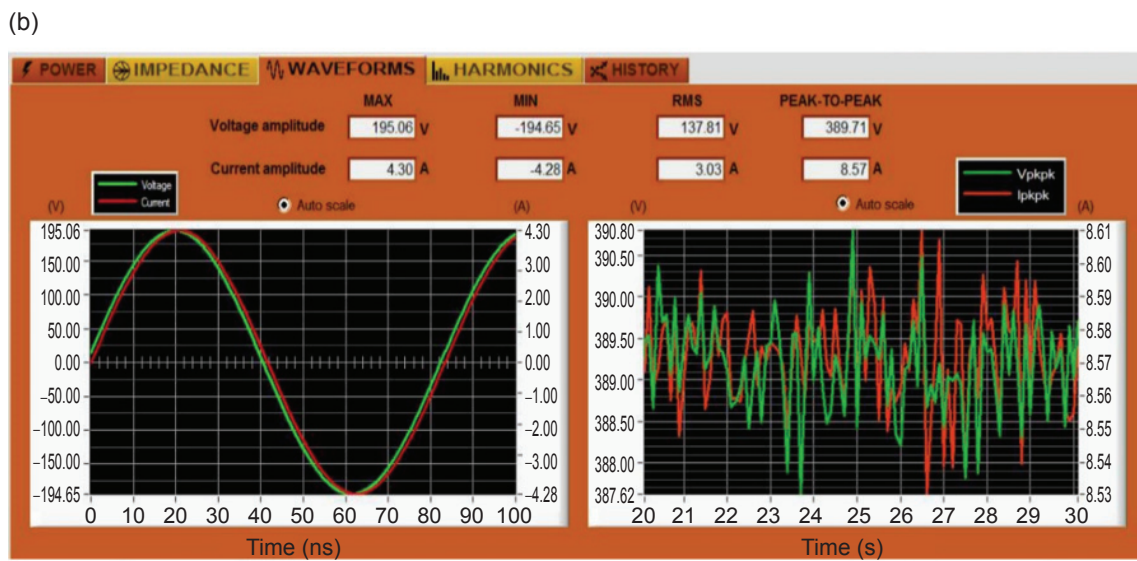
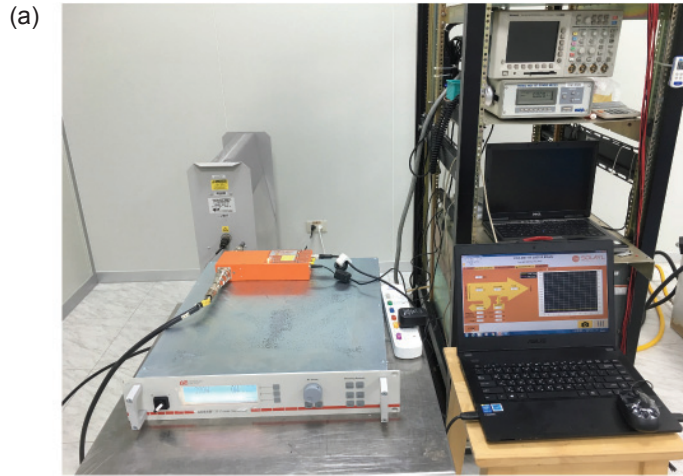


圖 12. (a) 射頻功率探針針對射頻系統進行測試之實測配置 (b) 射頻功率探針之測試結果。

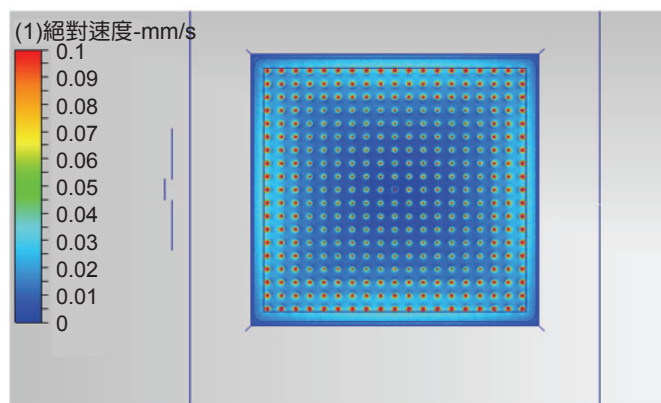
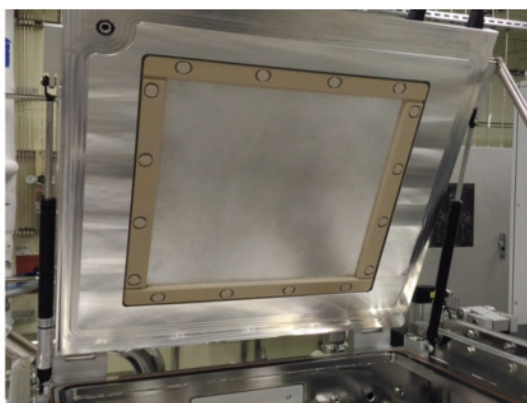
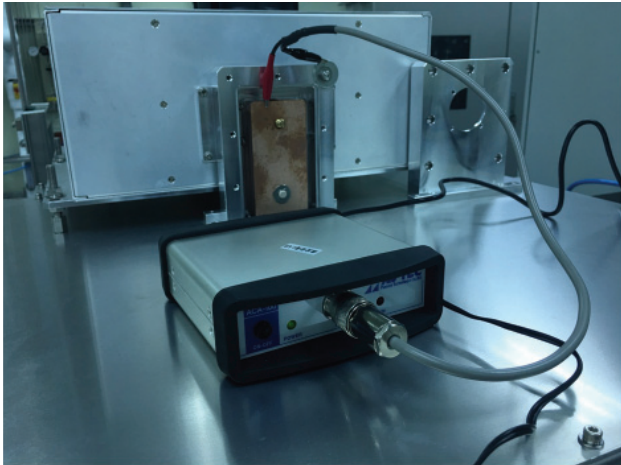
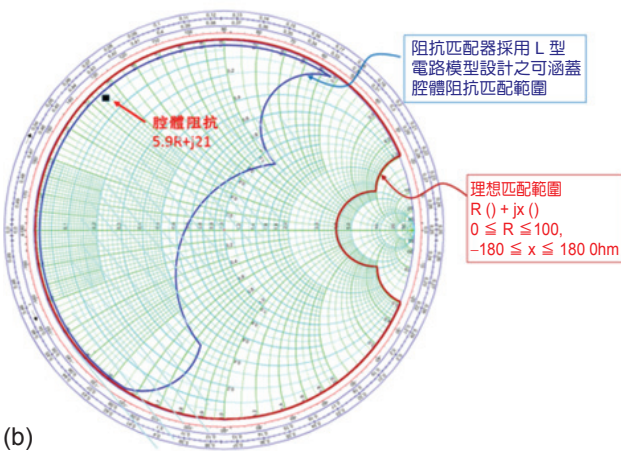


圖 13. PECVD (a) 氣體分散板 (b) CFD 模擬速度擴散分佈上視圖。



(a)



(b)

圖 14. (a) 阻抗分析儀量測配置 (b) 阻抗分析儀量測之輸入組抗結果⁽¹⁵⁾。



圖 15. 量測電漿光發射光譜儀。

否穩定之參考依據。另也必須抓取腔體清潔週期，採用如乾式清潔法，達到量產需求。圖 16 所示為 In-line PECVD 之鍍膜成果，兩種不同厚度的非晶矽膜，作為異質接面電池的本質層。

應用於矽晶異質接面太陽電池之 In-line PECVD 較佳設備方案，應具有雙製程腔以避免雙摻雜層交互污染，其架構如圖 17 所示。

四、結論

本文介紹 in-line 式 PECVD 超高頻電漿增強式鍍膜設備設計及性能探討，其屬於連續生產型試量產設備。在設備的建構上，以電磁分析能力為核心解構 PECVD 的射頻功率工作原理，對於射頻功率

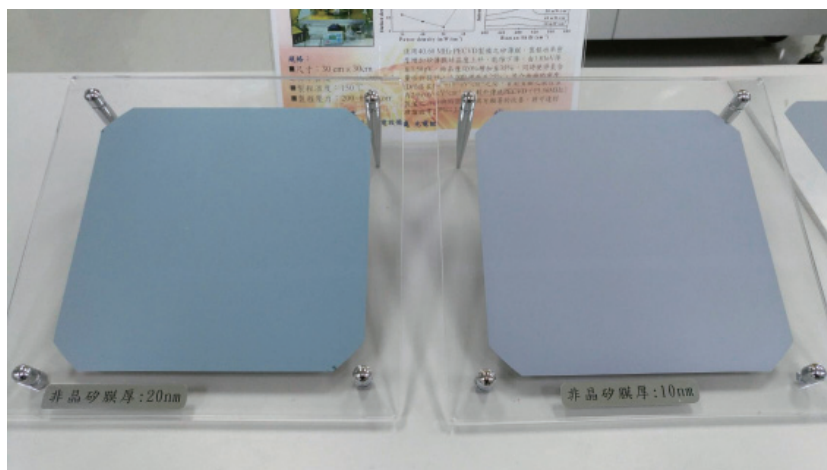


圖 16. 鍍膜完成後晶圓成品。

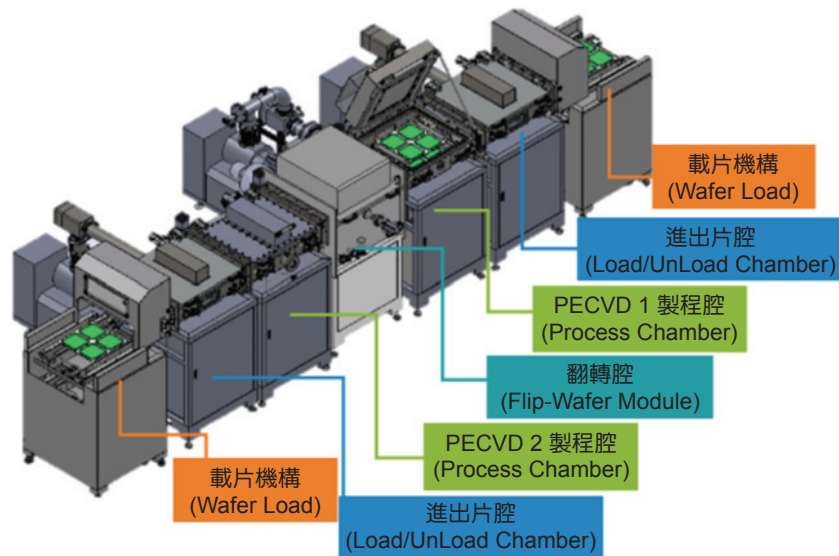


圖 17. 應用於矽晶異質界面太陽電池之 In-line PECVD 較佳設備方案。

輸入腔體之行為，包含阻抗的分析、饋入電路的設計、影響電漿分布均勻性的電極板電場分布，所搭配的流場分析技術，使用儀器如射頻功率量測探針、量測電漿光發射光譜儀、射頻洩漏量測儀、熱像儀等儀器輔助下，建構出該設備結構。也因自主化設計掌握設備技術，可望能因應為了提升製程效能提升而不斷產生之設備改善及設計需求。終極目標為成功建構一具有良好鍍膜均勻度與設備穩定度之量產設備，希望可更廣泛應用於鍍膜產業中，並結合目前國內設備業者，切入量產型 PECVD 的市場，提高國內設備業者在半導體界中的設備產品市佔率，並為設備供應方以及設備使用者雙方共同創造可觀經濟價值。

參考文獻

1. 應用材料 <http://www.appliedmaterials.com/zh-hant>.
2. 周星工程 <http://www.jseng.com/cn/>.
3. 優貝克科技股份有限公司 <http://www.ulvac.com.tw/>.
4. http://www.enigmatic-consulting.com/semiconductor_processing/CVD_Fundamentals/plasmas/capacitive_plasma.html
5. H. H. Wittenberg, Vacuum Tube Manual: Electron Tube Design, RCA Electron Tube Division, (1962).
6. Hong Xiao, Ph. D. www2.austin.cc.tx.us/HongXiao/Book.htm
7. 楊茹媛, 翁敏航, 李炳寰, 矽薄膜太陽能電池鍍膜設備, 電子月刊 (2009).
8. Wim Soppe, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **13** (7), (2005).
9. <https://www.crystec.com/triplaf.htm>

10. M. Taguchi, *IEEE Journal of Photovoltaics*, **4** (1), (2014).
11. 蘇青森, 真空技術精華, 五南圖書 (2013).
12. Ansoft HFSS v12
13. 陳威宇, 洪政源, 吳奕達, 翁敏航, 電磁模擬應用於超高頻化學氣相沈積系統之射頻電極板實務, 電子月刊 (2012).
14. L. Sansonnens, a_ H. Schmidt, A. A. Howling, and Ch. Hollenstein, *Vac. Sci. Technol.*, **A 24**, 1425 (2006).
15. 葉昌鑫, 李炳寰, 翁敏航, 用於矽薄膜太陽能電池之 VHF PECVD 之射頻關鍵技術, 電子月刊 (2012).



翁敏航博士於國立成功大學取得電機博士學位，目前為金屬工業研究發展中心技術顧問，研究領域為射頻被動元件設計與製作、太陽能光電元件與系統等。

Dr. Min-Hang Weng received his Ph.D. degree in Electrical Engineering from National Cheng Kung University, and he is a consultant for Metal Industries Research & Development Centre (MIRDC). His primary research focus is on RF passive device design and fabrication, and photovoltaic device and system thereof.



葉昌鑫博士於國立成功大學取得電機博士學位，目前為金屬工業研究發展中心工程師，專注於電漿鍍膜設備及製程研發。

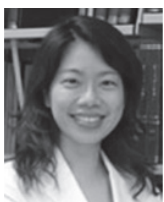
Dr. Chang-Sin Ye received his Ph.D. degree in Electrical Engineering from National Cheng

Kung University, and he is an engineer in Metal Industries Research & Development Centre (MIRDC). His research focuses on development of plasma apparatus and corresponding thin film depositing process.



黃俊凱研究員於國立臺南大學取得綠色能源科技碩士學位，目前為金屬工業研究發展中心工程師，專注於超高頻電漿鍍膜設備研發。

Chun-Kai Huang received his M.S. degree in Green Energy from National Tainan University, and he is an engineer in Metal Industries Research & Development Centre (MIRDC). His research focuses on development of plasma thin film depositing apparatus.



蔡潔娃研究員於國立中山大學取得經濟學碩士學位，目前為金屬工業研究發展中心專案經理及產業分析師。

Chieh-Wa Tsai received her M.S. degree in Economics from the National Sun Yat-sen University, and she is a project manager and industrial analyst in Metal Industries Research & Development Centre (MIRDC).



吳春森博士於國立高雄第一科技大學取得工程科技博士學位，目前為金屬工業研究發展中心醫療器材及光電設備處處長。

Chun-Sen Wu received his Ph.D. degree in Engineering Science and Technology from National Kaohsiung First University of Science and Technology, and he serves as the Director of Medical Devices and Opto-Electronics Equipment Department in Metal Industries Research & Development Centre (MIRDC).



張慎周博士於國立清華大學取得博士學位，目前為崑山科技大學電機工程系教授，兼任電機工程系系主任暨工程學院副院長。

Shang-Chou Chang received his Ph.D. degree in Nuclear Sciences from National Tsing Hua University, and he serves as the Vice President of College of Engineering and the Director of Department of Electrical Engineering in Kun