

# 加長型大氣電漿束特性及抑菌圈分析

## Characteristics of Extended Atmospheric Pressure Plasma Jets and the Analysis of Their Bactericidal Circles

謝章興、魏佚衿、張淑茜、劉霽琳

Jang-Hsing Hsieh, Yi-Jing Wei, Su-Chien Chang, Pei-Lin Liu

本研究中使用可撓矽膠管延長大氣電漿束進行實驗，並利用增強電荷耦合元件相機 (intensified CCD camera, ICCD camera)、光學放射光譜儀 (optical emission spectroscopy, OES) 及示波器測量不同矽膠管長度的大氣電漿束的電漿強度、OH 及 O 自由基強度分布、電漿的放射光譜及電漿電能效率等生物醫學應用時重要的參數。研究結果顯示，電漿強度最大的位置隨矽膠管長增加而向管口靠近，而電漿與自由基的強度及電漿電能效率皆隨矽膠管增長而變化。第二部分研究測試了延長型大氣電漿在不同工作距離的抑菌效果，結果顯示當工作距離大於等於 2.0 cm 時抗菌效果最佳，抗菌區域為實心圓；而當工作距離小於等於 1.0 cm 時，抗菌區域則出現環狀結構。為了解實心圓與環狀抗菌區域的形成原因，我們進而利用煙霧實驗觀察氦氣流流向，並以 ICCD 相機記錄當工作距離為 1.0 cm 與 2.5 cm 時，電漿、OH 自由基與 O 自由基在石英玻璃板上的分布情形。煙霧實驗與 ICCD 影像對照結果顯示氦氣流影響了 OH 自由基的分布，而 OH 自由基為主要抗菌物質，因而造成不同型態的抗菌區域。

Recently, atmospheric plasma technology has been found to have a huge potential and bright future in plasma medicine. In practice, the flexibility and extendibility of plasma jets are critical in many of the bio-medical applications. In this study, silicone tubes were used to extend the length of plume. Silicone was chosen because it is a non-toxic, biocompatible, highly elastic material. A customized atmospheric pressure plasma jet (APPJ) equipped with unipolar pulse power supply was used to generate He plasma for the present study. The plumes were analyzed by OES as functions of tube length and working distance in order to realize the distribution of OH and O radicals. The results show that the intensity ratio of OH/He and O/He in the discharge decreased with the increase of silicone tube length. In the study of working distance, With the increase of tube length, the decrease of OH intensity was found to be more significant than O's. With the increase of working distance, the combination of OH+O intensities showed a peak appearing at 1.5-2 cm. Accordingly, the bactericidal efficiency was influenced. In order to realize the formation of bactericidal circle pattern, ICCD camera and smoke flow were used. It can be concluded that the distribution of OH radical is the main reason that caused dual circles.

## 一、前言

自從電漿科技被認為是前瞻科技的指標以來，大部分人都知道該科技的最大用處是它在微電子製造產業中的應用。當看到每個人都攜帶手機、擁有個人電腦或看到電動自駕車的同時，這一點就變得很明顯了。假設這世界沒有電漿的認知與發展，無人可以想像晶片要如何製造。毫無疑問在過去的二十年裡，電漿科技已慢慢融入我們日常生活的每一個環節。但電子產業中的電漿系統需使用高成本真空系統，以使用於鍍膜或蝕刻，且很難整合到連續式的生產線中。因此大氣壓電漿 (atmospheric pressure plasma, APP) 技術越來越受到關注，尤其在低溫軟材料表面活化或環保及生技方面，在在都顯示其特性及未來性，足可稱為電漿科技的進步指標。

由於低壓電漿對於密閉容器、真空系統與環境的需求，限制了在生物醫學上的應用。相反地，大氣電漿不受上述三個條件的限制，因此大氣電漿技術具有電漿醫學的巨大潛力和未來性，可運用在生物醫學領域<sup>(1)</sup>。若能進一步提升大氣電漿束的可撓性與延伸性便能大幅增廣大氣電漿束在生物醫學上的應用範圍<sup>(2)</sup>。矽膠管是一種無毒，生物相容，高彈性的材料，因此本研究利用矽膠管連接石英管，可同時增加大氣電漿束的可撓性與延伸性，並測量矽膠管長度對於大氣電漿束的電漿強度、OH 及 O 自由基強度分布、電漿的放射光譜及電漿電能效率。大氣電漿中產生的 OH 自由基和 O 自由基為重要的氧化活性物質<sup>(3)</sup>，能夠快速處理傷口、止血傷口與殺菌 (抗菌)，在電漿抗菌實驗中發現有環狀及實心圓兩種形狀分布。本實驗中最終利用煙霧實驗及 ICCD 攝影觀察電漿束及其自由基的分布並探討抗菌環形成原因。

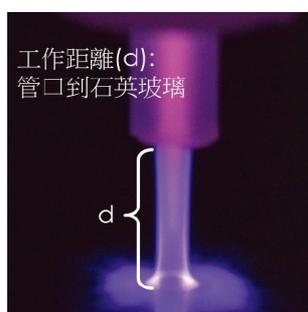


圖 1. 典型大氣電漿束。

## 二、實驗方法

### 1. 設備

實驗中首先使用 ICCD camera (電荷耦合元件相機 (intensified CCD camera, ICCD camera)) 測量加長型大氣電漿束電漿強度、OH 及 O 自由基強度分布，以 OES 測量電漿的光學放射光譜，利用示波器與串聯電容測量電漿電能效率。

### 2. 電漿束的產生

電漿源使用直流脈衝。其參數為：氮流量：10 L/s，Power：電壓 10 kV，T1 (ON time)：147 us，T2 (Ramp down time)：3 us，T3 (Off time)：57 us，T4 (Ramp up time)：3 us，頻率：4.76 kHz，抗菌測試時矽膠管長度：20 cm。

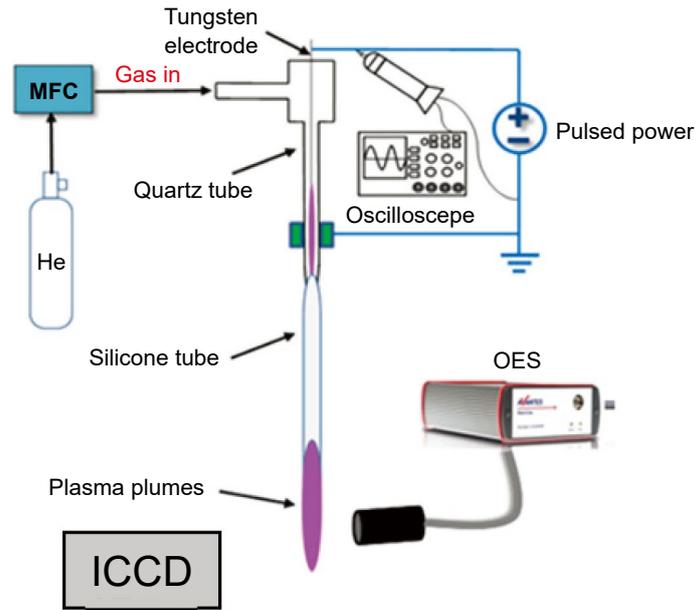


圖 2. 加長型大氣電漿束設置圖。

### 3. 抗菌測試

此實驗選用大腸桿菌 (E.coli ATCC53010) 測試，配合生化分析光譜儀測量，將含菌溶液加上磷酸鹽緩衝生理鹽水混合調配菌液光密度值為 0.3 的溶液 (此時溶液內含 107 cfu/ml) 並塗於細菌培養皿，電漿處理一分鐘後置於溫度 37 °C 恆溫培養箱。

### 4. 煙霧測試

圖 3 使用有分支的石英管，由分支灌入煙霧，藉由煙霧觀察氦氣氣流撞擊到石英玻璃板後的流向。

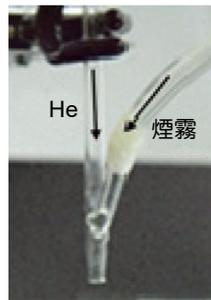


圖 3. 觀察煙霧流動型態之石英管設計。

### 5. ICCD 相機

使用無濾波片與加裝帶通濾波片的 ICCD 相機以記錄當工作距離為 1 cm 和 2.5 cm 時電漿及 OH、O 自由基分布圖，此時鏡頭分別加裝 309 nm 及 777 nm 帶通濾光片。

### 三、結果與討論

#### 1. OH 及 O 自由基強度分布

如圖 4 所示，以矽膠管長 20 cm 為例，從 ICCD 影像可以得知電漿及自由基的強度分布，進而得到矽膠管口到電漿強度最大位置的距離 (以下以  $d$  代表之)。

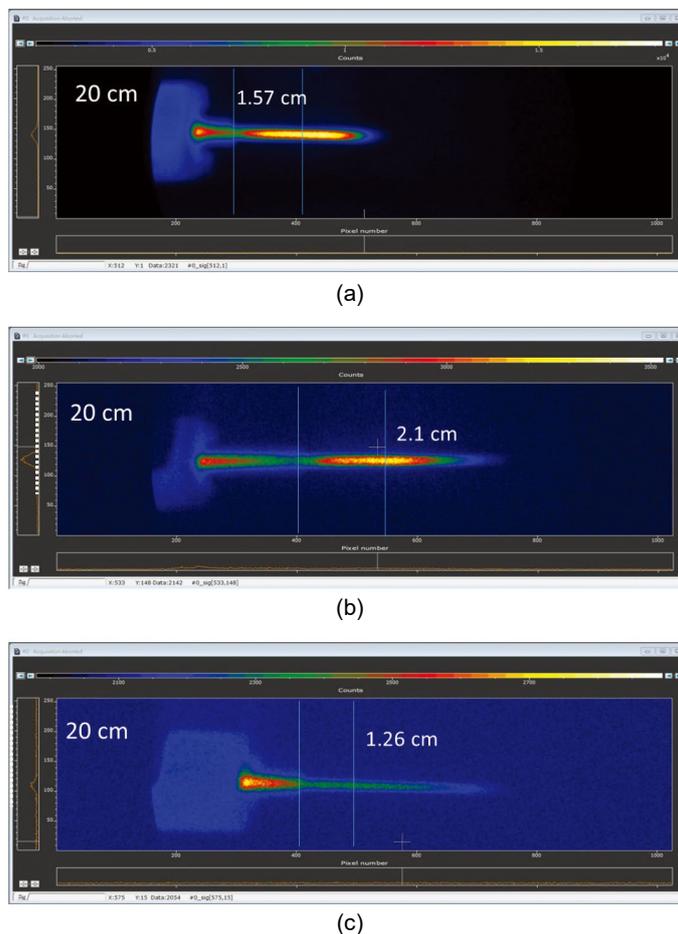


圖 4. ICCD 影像：(a) 無濾波片 (b) 加 OH 濾波片 (c) 加 O 濾波片。

從圖 5 可知，整體而言，電漿與自由基強度最大位置隨矽膠管增長而向管口靠近。與電漿及 OH 自由基相比，O 自由基的  $d$  值較小。當沒有加矽膠管時 (即矽膠管長為 0 cm)，電漿的  $d$  值大約是 2.5 cm，而 OH 自由基跟 O 自由基的  $d$  值約為 1.5–1.6 cm。當矽膠管長為 10 與 20 cm 時，OH 自由基的  $d$  值達到最大值，當矽膠管長為 30–60 cm 時，OH 自由基與電漿的  $d$  值相近。

#### 2. 電漿的放射光譜

圖 6 為不同矽膠管長電漿束之光學放射光譜，其中波長 237 nm、309 nm、706 nm、777 nm、844 nm 的峰分別對應於 NO、OH、氮、O 等自由基與離子。

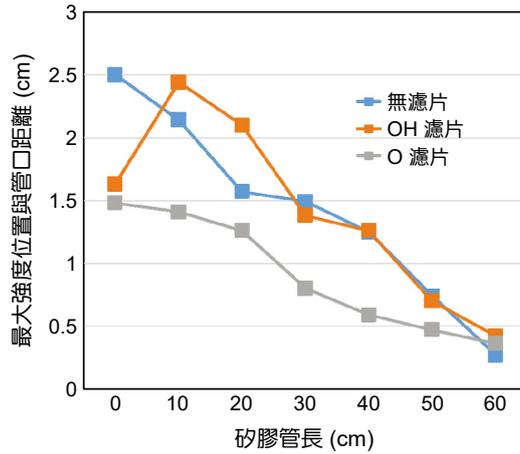


圖 5. 電漿、OH 自由基、O 自由基強度最大位置與矽膠管口距離 ( $d$  值)。

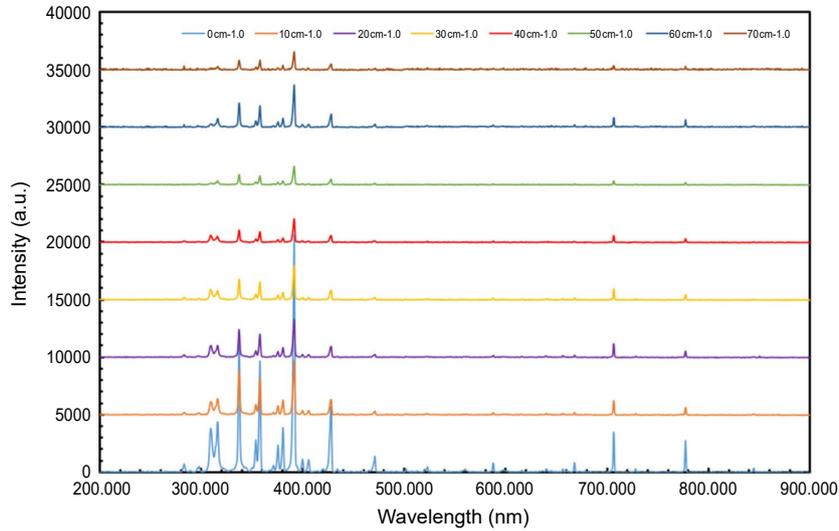


圖 6. 比較不同管長之放射光譜。

### 3. 電漿的電能效率

圖 7 是利用示波器測量得的矽膠管長 60 cm 的利薩茹 (Lissajous) 曲線 (即電量 ( $Q$ )-電壓 ( $V$ ) 關係圖<sup>(4)</sup>)，計算圖中  $QV$  曲線的面積可得電漿消耗的電能，進而推算其電能效率。

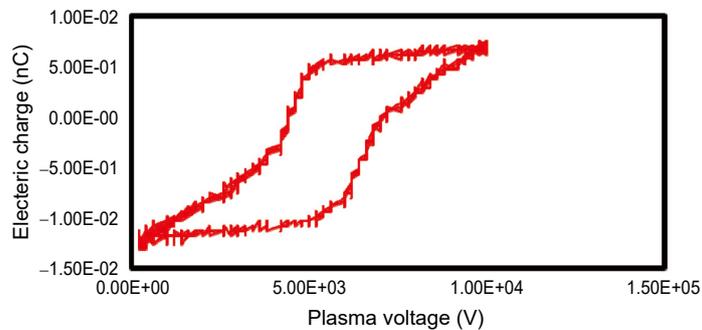


圖 7. 利薩茹 (Lissajous) 曲線。(矽膠管長度：60 cm)。

從圖 8 可知電漿束之電能效率隨矽膠管長增加的變化。原則上，隨矽膠管長增加，電漿消耗的電能有明顯下降趨勢，可能是因為電能耗散在矽膠管當中，但矽膠管長為 60 cm 時有些微增加，此現象尚無法解釋。

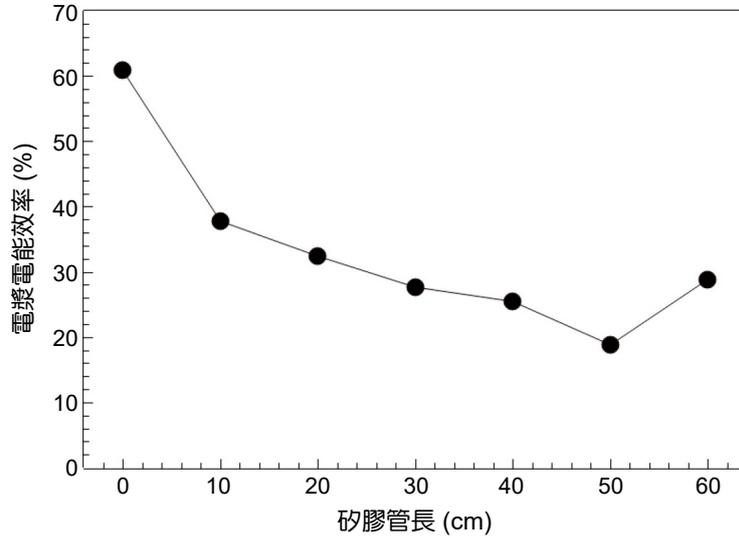
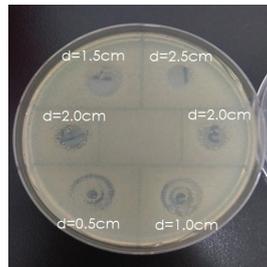


圖 8. 不同矽膠管長產生電漿束之耗電效率。

#### 4. 抗菌結果

圖 9 顯示抗菌測試結果，可以觀察到殺菌效率與抗菌圈跟工作距離有關係，其中，工作距離 0.5 及 1 cm 可以發現一些環狀的殺菌圈。



(a)



(b)

圖 9. (a) 不同工作距離之抗菌結果，(b) 工作距離對抗菌圈形狀的影響。

## 5. 煙霧測試結果

圖 10(a) 顯示當工作距離 1 cm 時出現環狀結構，其內環是氮氣流由石英管口噴出，首次接觸石英玻璃板時所造成，外環是氮氣流沿著石英玻璃向外擴散，將要向上捲起時形成的，而中環則是氣流向內捲入時再次接觸石英玻璃所造成。當工作距離為 2.5 cm 時 (圖 10(b))，氮氣流首次接觸石英玻璃板後，即往上擴散，沒有再向內捲入接觸石英玻璃板。

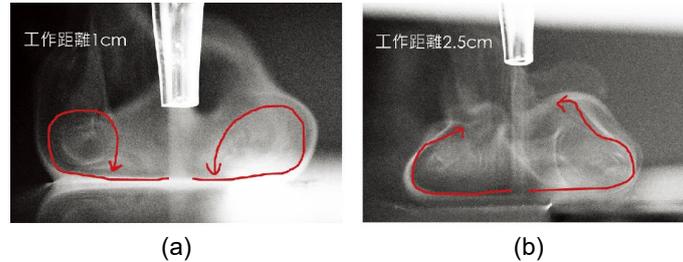


圖 10. 不同工作距離下煙霧噴出模型：(a) 1 cm，及 (b) 2.5 cm。

## 6. ICCD 結果

### 1. 工作距離 1.0 cm

#### (1) 側面圖

從圖 11(a) 影像的顏色分布可知兩端的電漿強度變強，中央較弱。圖 11(b) 為加裝 OH 濾波片所得影像，從顏色分布可知 OH 的分布主要有兩種型態，左圖中央及左右兩側的尖峰顯示，OH 的濃度較大，而右圖為放大左圖中央部分，明顯可觀察到內環結構。此一結果可以解釋抗菌測試所顯示的環狀結構。圖 11(c) 為加裝 O 濾波片所得影像，從顏色分布可觀察到中環結構。

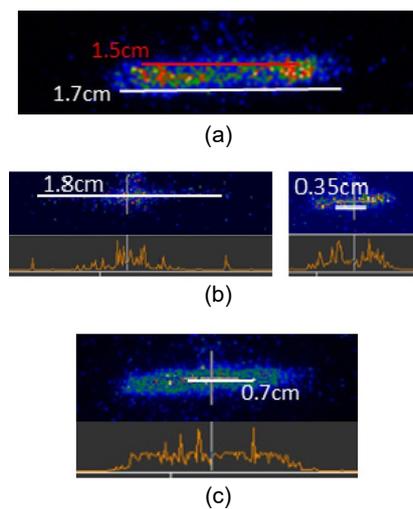
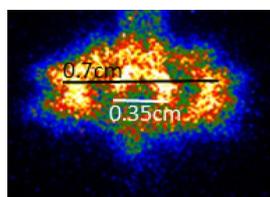


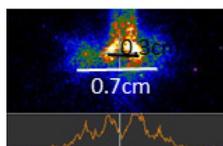
圖 11. ICCD 影像，工作距離：1 cm：(a) 無濾波片，(b) 加 OH 濾波片 (309 nm)，(c) 加 O 濾波片 (777 nm)。

## (2) 俯角 30 度

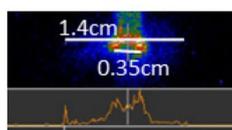
從圖 12(a) 影像的顏色分布可知工作距離為 1.0 cm 時，電漿分布為環狀結構 (內環及中環)。圖 12(b) 為加裝 OH 濾波片所得影像，從影像的顏色分布可看出內環及中環結構時，圖 12(c) 為加裝 O 濾波片所得影像，可看出內環及些許外環結構。



(a)



(b)



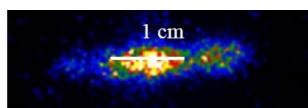
(c)

圖 12. ICCD 影像，工作距離：1 cm：(a) 無濾波片，(b) 加 OH 濾波片(309 nm)，(c) 加 O 濾波片(777 nm)。

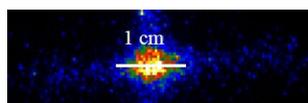
## 2. 工作距離 2.5 cm

### (1) 側面圖

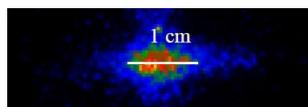
從圖 13(a) 影像的顏色分布可知工作距離為 2.5 cm 時，電漿大都分布在中心。圖 13(b) 為加裝 OH 濾波片所得影像，圖 13(c) 為加裝 O 濾波片所得影像，由顏色分布可看出 O 和 OH 的電漿分布都是形成實心圓。



(a)



(b)



(c)

圖 13. ICCD 影像，工作距離：2.5 cm：(a) 無濾波片，(b) 加 OH 濾波片(309 nm)，(c) 加 O 濾波片(777 nm)。

## (2) 俯角30度

從圖 14(a) 影像的顏色分布可知工作距離為 2.5 cm 時，電漿大都分布在中心。圖 14(b) 為加裝 OH 濾波片所得影像，圖 14(c) 為加裝 O 濾波片所得影像，由顏色分布可看出 O 和 OH 的電漿分布都是形成實心圓。

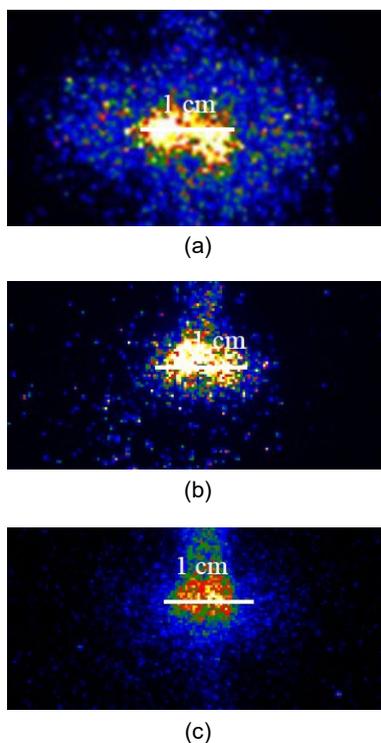


圖 14. ICCD 影像，工作距離：2.5 cm：(a)無濾波片，(b)加 OH 濾波片 (309 nm)，(c)加 O 濾波片(777 nm)。

## 四、結論

本研究利用矽膠管延長電漿束，電漿與自由基強度最大位置與矽膠管口距離隨矽膠管長而減少。當矽膠管長 10 cm 時，OH 自由基的強度最大位置離矽膠管口最遠，約 2.5 cm。自由基的強度及電漿電能效率皆隨矽膠管變化而變化。工作距離 1 cm 時，抗菌圈存在內、中、外環；O 自由基對內環結構的影響較 OH 自由基大，但 OH 自由基對中、外環結構的影響較大；與其生成距離有關。結果顯示工作距離在 2–2.5 cm 沒有環狀結構。

## 參考文獻

1. E Karakas, M Koklu and M Laroussi, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **43** (15), 155202 (2010).
2. Longfei Ji, Zhenhua Bi, Jinhai Niu, Hongyu Fan, and Dongping Liu, *Applied Physics Letters*, **102** (18), 184105 (2013).
3. Y J Hong, C J Nam, K B Song, G S Cho, H S Uhm, D I Choi and E H Choi, *Journal of Instrumentation*, **7** (3), C03046 (2012).
4. Gon-Ho Kim, Soo-Yeon Jeong, Ho-Cheol Kwon and Sang-Heon Song, *Journal of the Korean Physical Society*, **49**, 1307 (2006).

## 作者簡介

謝章興先生為喬治亞理工學院材料所博士，現為明志科技大學材料系特聘教授兼電漿與薄膜中心主任。

Jang-Hsing Hsieh received his Ph.D. in Materials Engineering from Georgia Institute of Technology. He is currently a distinguished professor in Department of Materials Engineering as well as the director in Center for Plasma and Thin Film Technologies at Ming Chi University of Technology.

魏佚衿小姐為明志科技大學材料所碩士，現為明志科技大學電漿與薄膜中心工程師。

Yi-Jing Wei received her M.S. in Materials Engineering from Ming Chi University of Technology. She is currently an engineer in Center for Plasma and Thin Film Technologies at Ming Chi University of Technology.

張淑茜小姐為明志科技大學材料系學士，現為明志科技大學電漿與薄膜中心工程師。

Su-Chien Chang received her B.S. in Materials Engineering from Ming Chi University of Technology. She is currently an engineer in Center for Plasma and Thin Film Technologies at Ming Chi University of Technology.

劉霈琳小姐為長庚大學資管系學生，現為明志科技大學電漿與薄膜中心見習工程師。

Pei-Lin Liu is a student in Data Management of Chang Gung University. She is currently an intern in Center for Plasma and Thin Film Technologies at Ming Chi University of Technology.