

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

Roll-to-Roll 電漿化學氣相沉積系統電漿放射光譜特性量測分析
Plasma Optical Emission Analysis of Roll-to-Roll Plasma Enhanced
Chemical Vapor Deposition System

計畫編號：1022001INER017

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：柳克強

聯絡電話：0922083477

E-mail address：kcleou@nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：謝政昌

報告日期：102年11月29日

Abstract

The purpose of this project is to assemble Roll-to-Roll plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) machine and analysis SiH₄/H₂ plasma of optical emission spectrum (OES). This measurement can help us know the correlation between a SiH₄/H₂ plasma and the film properties (e.g. density of SiH₃ and H· plasma density, electron temperature and etc.). In the same time, we do a simulation to verify the experiment results. From the In-line PECVD OES measurement results, emission intensity of H₂ Fulcher and OES-ratio (Si*/SiH*, H_α/H_β) increase with power. It says that higher power of plasma can generate more energetic electrons. Moreover, emission intensity of H₂ Fulcher decreases when operation pressure increases. However OES-ratio (Si*/SiH*, H_α/H_β) increases with pressure. On the other hand the emission intensity of H₂ Fulcher and OES-ratio (Si*/SiH*, H_α/H_β) exhibit opposite trends with silane flow rate. As a result of the improved plasma chamber design, the SiH₄ depletion/backflow effect did not appear.

Keyword: PECVD, OES, Silicon thin-film

摘要

本計畫為配合 Roll-to-Roll 電漿化學氣相沉積系統之開發，以電漿放射光譜(Optical Emission Spectroscopy, OES)分析 SiH_4/H_2 電漿特性，對了解電漿變化與薄膜特性之關聯性極有助益，其中包括與矽薄膜鍍膜相關之主要活性電漿粒子如 SiH_3 & H 之密度、電漿密度與電子溫度等電漿參數，並結合電漿模擬計算分析相互驗證。In-line PECVD OES 量測結果顯示，不同功率的情況下， H_2 Fulcher 的放射光譜和 OES-ratio(Si^*/SiH^* , $\text{H}_\alpha/\text{H}_\beta$)都隨著功率上升而增加，說明了功率越高，可以產生更多能量較高的電子，而在改變壓力的條件下， H_2 Fulcher 的放射光譜隨著壓力上升而下降，但 OES-ratio(Si^*/SiH^* , $\text{H}_\alpha/\text{H}_\beta$)有相反趨勢，若是改變矽甲烷流量， H_2 Fulcher 的放射光譜和 OES-ratio(Si^*/SiH^* , $\text{H}_\alpha/\text{H}_\beta$)則呈現不規則變化。此外由於機台設計已加入考量，對薄膜影響甚鉅之 SiH_4 depletion/backflow 現象並未出現。本計畫對於 Roll-to-Roll 電漿化學氣相沉積系統亦以電漿放射光譜分析以輔助相關機制之探討與改善，可增進矽薄膜成長之物理與化學機制之瞭解與對製程最佳化之參數依據。

關鍵字：電漿化學氣相沉積、電漿放射光譜、矽薄膜。

作者及所屬單位

作者 (Author)	職稱 (job title)	服務單位 (company)	部門 (department)
柳克強	教授	國立清華大學	工程與系統科學系
連頌恩	研究生	國立清華大學	工程與系統科學系
范智翔	研究生	國立清華大學	工程與系統科學系
林鴻彬	研究生	國立清華大學	工程與系統科學系

目 錄

Abstract	I
摘 要	II
1. 計畫緣起與目的	1
2. 研究方法與過程	2
3. 主要發現與結論	6
參考文獻	12

1. 計畫緣起與目的

光學放射光譜儀可應用在物理化學分析上，藉由分析得知受激態物種彼此間的相對強度，且屬於非侵入式量測，不會影響到電漿特性，所以此量測方法適合用在電漿製程上，得知各譜線相對強度後，有助於我們分析電漿特性以及監測電漿製程時的穩定度。

2. 研究方法與過程

一、 SiH₄/H₂ 電漿放射光譜量測 (In-Line PECVD)

本研究所沉積的微晶矽薄膜是利用核研所物理組所有之 In-Line PECVD 機台，其屬於平行板電容式耦合 40.68 MHz 電漿源，沉積過程中透過藍寶石窗口與光纖連接並使用 OES 量測分析機台，光譜量測所使用之光譜儀為 USB4000，三台光譜儀量測波長範圍分別是 198-369/350-562/569-739 nm。電漿放射光譜所量測的譜線為 Si*(288 nm)、SiH*(414.28 nm)、H_β(486.28 nm)以及 H_α(656.47 nm)，將會探討放射光強度的變化與不同製程參數之間的關係。

為了這個目的，需要先進行光譜儀放射光強度校正及光譜之曲線擬合，由於光訊號會透過光纖及光譜儀內許多的光學元件，會有一定程度的衰減，所以在做實驗前，先以鹵素燈作為標準光源對光譜儀的強度作校正。而光譜之曲線擬合則是將 OES 量測的資料送到分析的軟體 (Matlab)裡，以高斯函數來擬合 Si*(288 nm)、SiH*(414.28 nm)、H_β(486.28 nm)以及 H_α(656.47 nm)譜線，高斯函數如下所示：

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (5.1)$$

其中， y_0 ：offset、A：曲線下面積、w：半高寬、 x_c ：中央位置。其中 SiH* 的光譜屬於分子光譜，相較於其它粒子的光譜型態，SiH* 的光譜型態是屬於較複雜的，因此我們選擇 SiH* 五個主要的峰值來擬合，取由高斯模型積分 SiH*(414.28 nm) 得到的曲面面積來做為真實的光譜強度，擬合結果如表 5-1 和圖 1 所示。而 Si*、H $_{\alpha}$ 和 H $_{\beta}$ 的光譜型態是屬於原子光譜，所以此光譜型態相對之下較為簡單，擬合結果如表 5-2、圖 2、圖 3 及圖 4 所示。

二、 薄膜特性量測 (In-Line PECVD)

(一) 拉曼光譜儀

製程結束後，使用核研所提供的拉曼光譜儀來對微晶矽薄膜進行薄膜結構分析，拉曼量測是使用雷射光來激發樣品分子後產生散射，分子吸收能量後會被激發到虛態上，之後再回到激發態上同時放出光，入射光子與此光子的能量差就叫 Stokes 譜線，也稱拉曼散射。在此系統量測時所使用的雷射為波長 632.8 nm 的 He-Ne laser，當雷射光入射到試片後產生散射訊號，而顯微鏡的 filter 會將其他散射訊號濾掉只留下拉曼散射，此訊號再經由光譜儀內的光柵及 CCD 將光訊號轉換成電訊號呈現在電腦上。

微晶矽薄膜之拉曼 peak 分別位在 520 cm $^{-1}$ 的結晶相、510 cm $^{-1}$ 的相變化區及 480 cm $^{-1}$ 的非晶相[1]，同樣地由式 5.1 高斯函數來作曲線擬合，擬合

結果如表 5-3 及圖 5 所示，而藉由擬合積分可以得到曲線下的面積，在由結晶率公式如下所示

$$X_C = \frac{(I_{510} + I_{520})}{(I_{480} + I_{510} + I_{520})} \quad (5.2)$$

其中 I_{480} 、 I_{510} 及 I_{520} 分別代表拉曼光譜在 480 cm^{-1} 、 510 cm^{-1} 及 520 cm^{-1} 的光強度。可以計算出微晶矽薄膜的結晶度。

(二) Solar simulator – 光敏性

使用核研所物理組所有的 solar simulator 機台，可以量測出薄膜在無照光及 AM1.5 太陽光照射下的電流-電壓曲線，再藉由曲線擬合得之曲線斜率 (如圖 6.及圖 7)，在代入式 5.3 計算出電導值

$$\sigma = \frac{Iw}{Vld} \quad (5.3)$$

上式中 σ ：電導值、 w ：電極之間的距離(0.8 mm)、 l ：電極長度(1.5 cm)、 d ：薄膜厚度。而在有無照光的電導值比例及為光敏性，定義如下

$$\text{Photosensitivity} = \sigma_{\text{photo}} / \sigma_{\text{dark}} \quad (5.4)$$

上式中 σ_{photo} ：光電導、 σ_{dark} ：暗電導。

三、 SiH_4/H_2 電漿放射光譜量測 (Roll-to-Roll PECVD)

Roll-to-Roll PECVD 機台為核研所物理組所有，同樣使用平行板電容式耦合 40.68 MHz 電漿源，光譜量測所使用之光譜儀為 USB4000，三台光譜儀量測波長範圍分別是 198-369/350-562/569-739 nm。電漿放射光譜所量測

的譜線為 $\text{Si}^*(288 \text{ nm})$ 、 $\text{SiH}^*(414.28 \text{ nm})$ 、 $\text{H}_\beta(486.28 \text{ nm})$ 以及 $\text{H}_\alpha (656.47 \text{ nm})$ 。沉積過程中，利用 OES 來記錄個譜線強度隨時間的變化(如圖 8)，由強度變化的幅度可以確認沉積過程中電漿是否穩定。

四、 SiH_4/H_2 電漿模擬

本研究之數值模擬工具使用現有商用三維流體熱傳模擬軟體 ESI-CFD，主要探討放電時各類活性粒子密度隨操作參數如射頻功率密度、氣壓及氣體成份比例之變化，目前採用其二維流體模型，所使用的物理模型為隨時變的電容式耦合電漿源模型 (Capacitively Coupled Plasma, CCP)，在此模型下，其以連續方程式與動量守恆方程式描述電漿中各粒子隨時變的空間分布情形，以能量方程式求得的電子溫度的分佈情形。

3. 主要發現與結論

一、 In-line PECVD 電漿放射光譜量測

(一) 射頻功率的影響

製程溫度為 210°C，固定氣體壓力及氣體流量條件下，做四組隨功率之變化，設計參數如表 6-1。

1. OES 分析結果

變更輸入功率密度的大小由 0.37 W/cm² 至 0.53 W/cm²，在不同功率密度下，量測光譜各譜線的相對強度隨著功率密度的增加而增加(如圖 9.a)，其中 H₂ Fulcher 主要是由氫分子與電子反應而成，因此 H₂ Fulcher 的放射強度變化可以代表電漿中的電子密度變化，而 Si*/SiH*和 H_β/H_α的相對放射強度變化可以定性分析電漿中電子溫度的改變(如圖 9.b)，電漿中電子溫度與電子密度皆隨功率上升而上升。

而沉積速率隨著功率的上升而提高，圖 10 為沉積速率及特徵物種 SiH* 及 Si*強度隨射頻功率之變化關係圖，由圖可知 Si*和 SiH*之放射強度也隨著功率上升而上升，與沉積速率的趨勢相符。

2. 薄膜特性與 OES 分析比較

利用拉曼光譜可以得知薄膜是非晶或是微晶結構，圖 11 為在不同射頻

功率下薄膜的拉曼譜線圖，由圖可知隨著功率的提升，薄膜結構由非晶逐漸轉為微晶，也可以利用 OES-ratio (H_{α}/SiH^* 和 H_{β}/SiH^*)來分析結晶率，如圖 12 所示，各譜線的強度會隨著功率上升而上升，而氫原子在微晶矽成長中扮演相當重要的角色，由於氫原子隨功率上升的幅度較大，造成 OES-ratio 的上升，與拉曼光譜擬合計算出來的結晶率有相同的趨勢。

在不同功率下，薄膜的光敏性如表 6-2，而光暗電導以及光敏性的變化如圖 13 所示，由圖 10 得知在功率為 700 W 時薄膜結構為非晶，故有較高的光敏性，在其他功率下光敏性隨著射頻功率的上升而上升，圖 14 為光敏性與 OES-ratio (H_{α}/SiH^* 和 H_{β}/SiH^*)的比較，發現隨著功率上升，光敏性和 OES-ratio 有相同的趨勢。

(二) 腔體壓力之影響

由前組實驗發現在 1000 W 會有較好的光敏性，因此本組實驗的射頻功率訂在 1000 W，採用與第一組實驗相同的氣體比例 $SiH_4/H_2 = 40/1600$ ，調整腔體壓力 3 Torr~6 Torr 如表 6-3。

1. OES 分析結果

變更氣體壓力的大小，射頻功率將固定在 1000 W，氣體壓力為 3 Torr 至 6 Torr。隨著氣體壓力上升，粒子的平均自由路徑(mean free path)下降，

獲得的能量相對減少，所以光譜中各譜線的相對強度隨著氣體壓力上升而下降(如圖 15.a)，另外壓力上升，意味著粒子間碰撞頻率提高，電漿中的電子密度和電子溫度會有下降的趨勢，光譜中 H_2 Fulcher 的強度隨壓力上升而下降，符合預期，但是代表電子溫度趨勢的 Si^*/SiH^* 和 H_β/H_α 相對強度則式呈現相反的趨勢(如圖 15.b)。

另一方面，由於壓力提升造成電漿中的電子密度下降， Si^* 及 SiH^* 之放射強度呈現下降的趨勢，圖 16 顯示沉積速率與 SiH^* 及 Si^* 隨壓力變化之關係圖，由圖可知在改變壓力的條件下， SiH^* 及 Si^* 的強度變化與沉積速率的變化有著相同的趨勢。

2. 薄膜特性與 OES 分析比較

由不同氣體壓力下的拉曼光譜(如圖 17)，發現在高氣壓下沉積出來的薄膜結構慢慢轉變為非晶，這可以解釋為壓力上升造成氫原子密度下降，導致結晶率的下降，而利用 OES-ratio (H_α/SiH^* 和 H_β/SiH^*)來分析的話也符合趨勢(如圖 18)。

不同氣壓下，詳細的薄膜光敏性如表 6-4，而圖 19 為光暗電導及光敏性隨氣體壓力之變化，發現隨著光敏性會隨著氣體壓力上升而上升，這是因為薄膜結構逐漸轉變為非晶的關係，從圖 17 也可以驗證薄膜結晶度隨著

體壓力上升而下降，所以光敏性與結晶率與氣體壓力大小有著相同的關係（如圖 18、圖 20）。

（三） 矽甲烷流量比例之影響

由圖 18 及表 6-4 可以知道雖然在 6 Torr 時薄膜的光敏性最高但是薄膜結構已轉變成非晶，故此組實驗我們將壓力固定在 5 Torr，然後改變 SiH_4 流量來探討其效應如表 6-5。

1. OES 分析結果

此部份實驗為固定 H_2 的流量(1600 sccm)，改變稀釋比例， SiH_4 流量從 25 增加至 70 sccm，隨著矽甲烷流量上升，電漿粒子的放射強度均隨之上升（如圖 21.a），以 Si^* 和 SiH^* 相對強度的上升幅度最為明顯，而在電漿電子密度以及電子溫度的部份，由於矽甲烷流量的上升，造成元件結構產生變化，從微晶系結構開始轉變成非晶矽結構，由於在微晶矽和非晶矽過渡區，所以電子密度和電子溫度的變化較沒有規律性(如圖 21.b)。且由於 Si^* 和 SiH^* 主要來自來電子與矽甲烷的分解反應，所以 Si^* 和 SiH^* 的放射強度隨著矽甲烷流量上升而上升，故與沉積速率有著相同的趨勢(如圖 22)。

2. 薄膜特性與 OES 分析比較

在不同矽甲烷流量情況下的拉曼光譜如圖 23 所示，發現隨著製程中通入矽甲烷流量的增加薄膜會逐漸變為非晶，這是因為矽甲烷流量的增加等效於製程內氫原子數量減少，而製程中氫原子可以幫助薄膜形成有序結構 [2]，故矽甲烷流量的增加會造成薄膜結晶度下降，利用 OES-ratio (H_{α}/SiH^* 和 H_{β}/SiH^*) 來分析的話也可以得到相同的結果(如圖 24)。

因為矽甲烷流量增加而導致薄膜非晶化，故薄膜的光敏性也隨之上升如表 6-6，所以利用 OES-ratio (H_{α}/SiH^* 和 H_{β}/SiH^*) 來分析光敏性與矽甲烷流量的關係(如圖 25)會和圖 24 得到相同的趨勢結果。

二、 Roll-to-Roll PECVD 電漿放射光譜量測

機台在靜態測試下觀察電漿放射光譜譜線隨時間的變化(如圖 26.a)，可以確認在鍍膜的過程中電漿是否穩定，由於機台目前還在測試及校正階段，所以譜線強度隨時間的變化幅度較大，這也代表著製程時，電漿沒有很穩定。若是在動態測試情況下，各譜線強度隨時間變化的改變就十分明顯(如圖 26.b)。

三、 SiH_4/H_2 電漿模擬

本模擬計算共考慮 17 種粒子及 40 條反應式，其選擇電漿中主要的粒

子及與成膜機制較相關的粒子，但並不考慮電漿中的長鏈或原子團 (Si_mH_n , $m \geq 5$)，模擬電極板大小為半徑 4 cm 的圓柱，電極間距為 1.4 cm，將 SiH_4/H_2 氣體流量固定為 0.4/32 sccm，腔體壓力為 600 Pa，頻率為 40 MHz，而溫度固定在 400 K，在不同功率下進行模擬。

模擬結果顯示，隨著射頻功率上升，H Flux 和 SiH_3 Flux 也隨之上升(如圖 27)，而我們利用 H Flux / SiH_3 Flux ratio 來定性分析結晶率的變化，同樣地，H Flux / SiH_3 Flux ratio 也隨功率上升而上升(如圖 28)，說明在較高功率下，薄膜會呈現高結晶性。

四、 結論

本計畫中監測的粒子除了 SiH^* (414.2 nm)、 H_β (486 nm)、 H_α (656.47 nm) 與 H_2 Fulcher (600-630 nm) 之外，還另外加入了 Si^* (288 nm) 的量測，並加入使用新的 OES-ratio (Si^*/SiH^*) 同樣來驗證電子溫度與製程參數的關係，In-line PECVD OES 量測結果顯示，隨著射頻功率上升，OES-ratio(Si^*/SiH^* , $\text{H}_\alpha/\text{H}_\beta$) 和 H_2 Fulcher 的放射強度也跟著上升，代表著電子密度與電子溫度的上升，符合預期。在改變壓力的條件下， H_2 Fulcher 的放射強度隨著壓力上升而下降，和模擬結果相符合，但 OES-ratio(Si^*/SiH^* , $\text{H}_\alpha/\text{H}_\beta$) 則是隨著壓力上升而上升，而模擬結果顯示在改變氣體壓力時，電子溫度會隨著氣體壓力提高而下降，OES-ratio(Si^*/SiH^* , $\text{H}_\alpha/\text{H}_\beta$) 有相反的趨勢。若是改變矽甲烷流量， H_2 Fulcher 的放射強度和 OES-ratio (Si^*/SiH^* , $\text{H}_\alpha/\text{H}_\beta$) 則呈現不規則變化，而

模擬結果在不同矽甲烷流量下，電子溫度與電子密度並沒有很明顯的變化。

參考文獻

1. J. Rüdiger et al., Thin Solid Films (2003)
2. A. Matsuda , Journal of Non-Crystalline Solids (2004)。

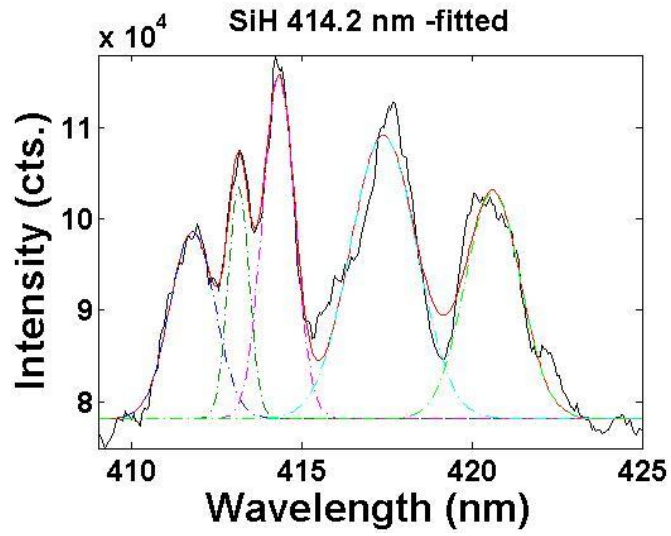


圖 1 SiH* (414.2 nm) 曲線擬合結果

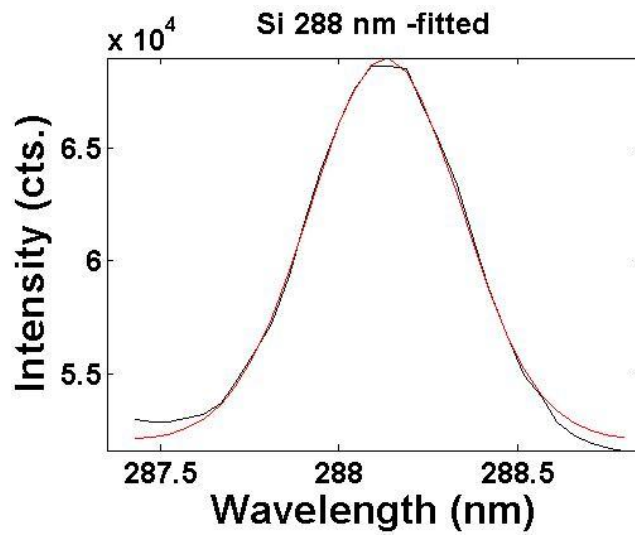


圖 2 Si* (288 nm) 曲線擬合結果

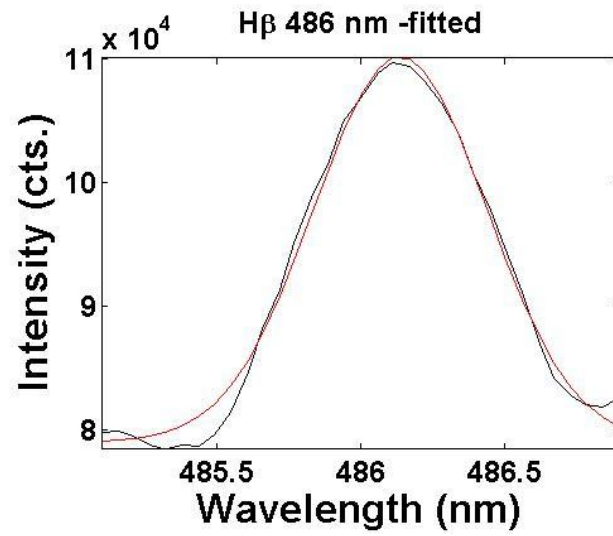


圖 3 H β (486 nm) 曲線擬合結果

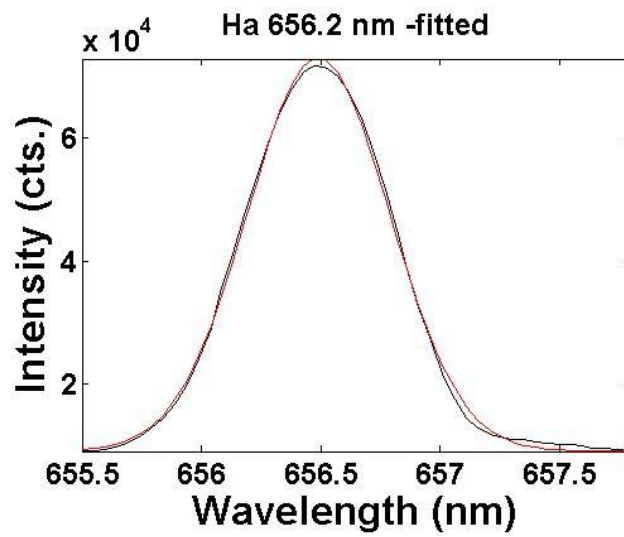


圖 4 H α (656.2 nm) 曲線擬合結果

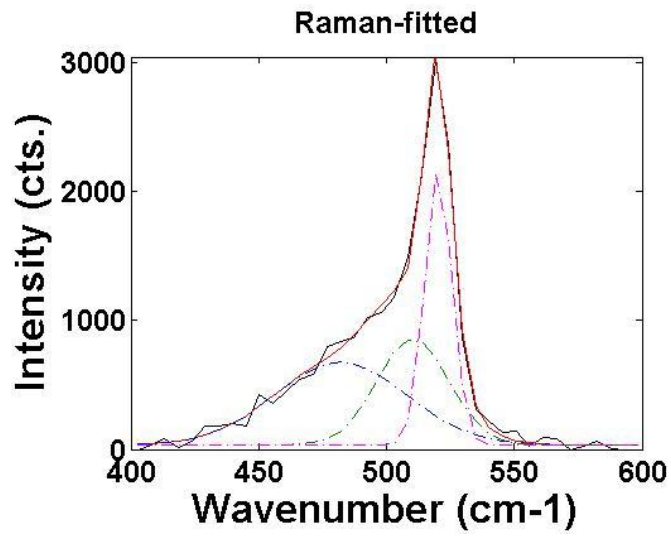


圖 5 拉曼光譜的擬合結果

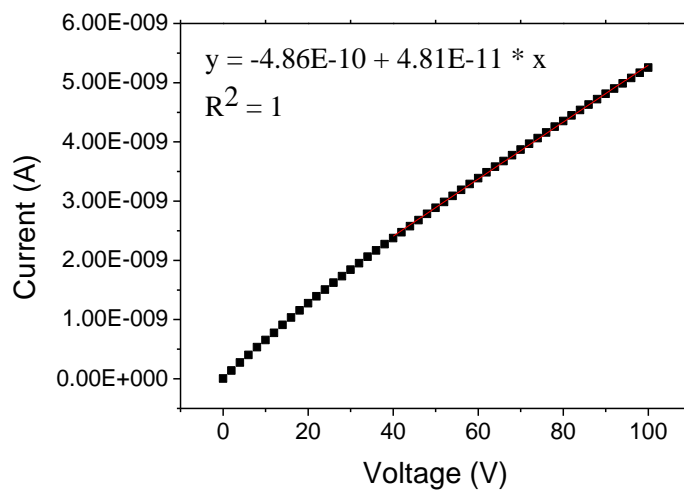


圖 6 無照光下的電流—電壓曲線 (In-line PECVD)

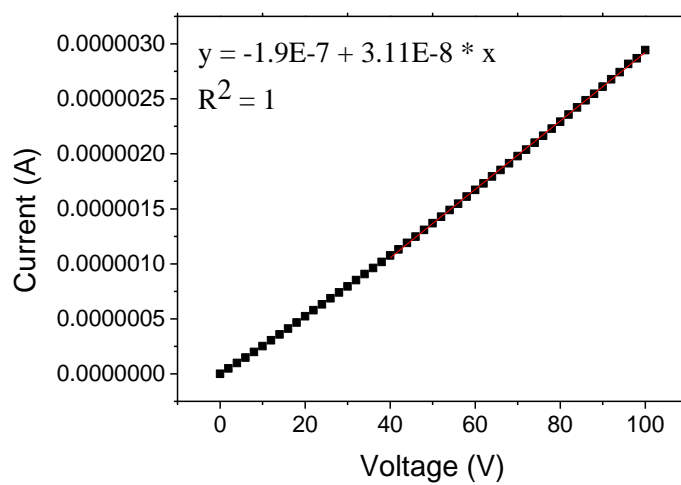


圖 7 AM 1.5 太陽光照下的電流－電壓曲線 (In-line PECVD)

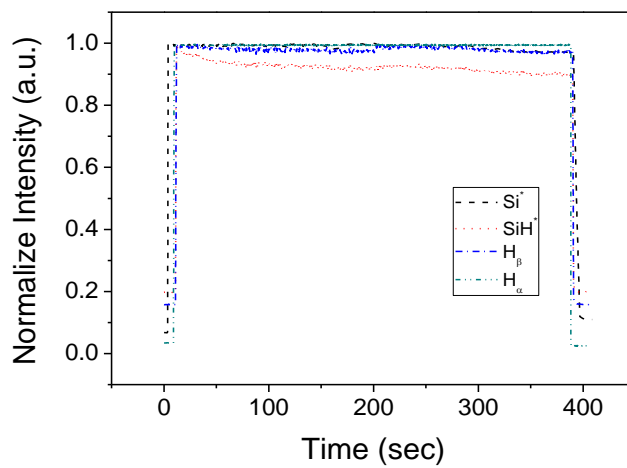


圖 8 射頻功率 900 W 之電漿光譜特徵譜線強度隨時間變化 (In-line PECVD)

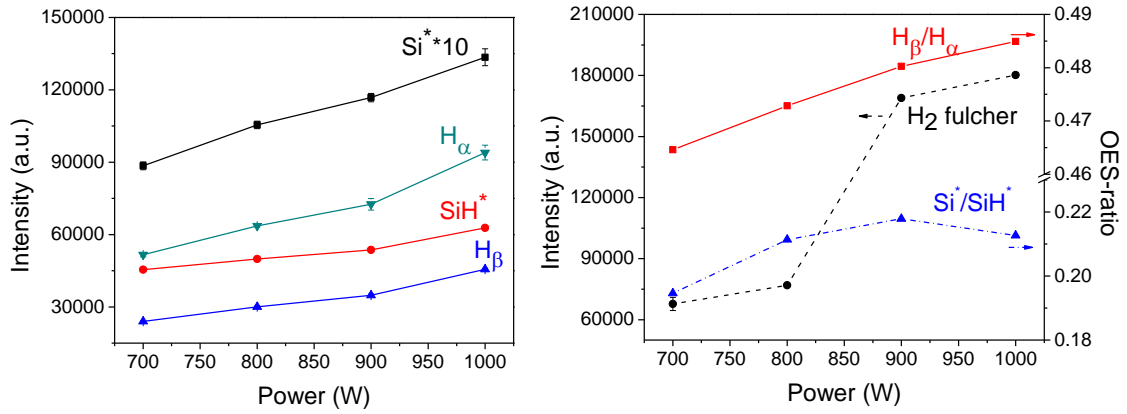


圖 9 (a) Si^* 、 SiH^* 、 H_β 及 H_α 隨射頻功率之強度變化

(b) H_2 Fulcher、 Si^*/SiH^* 及 $\text{H}_\beta/\text{H}_\alpha$ 隨射頻功率之變化 (In-line PECVD)

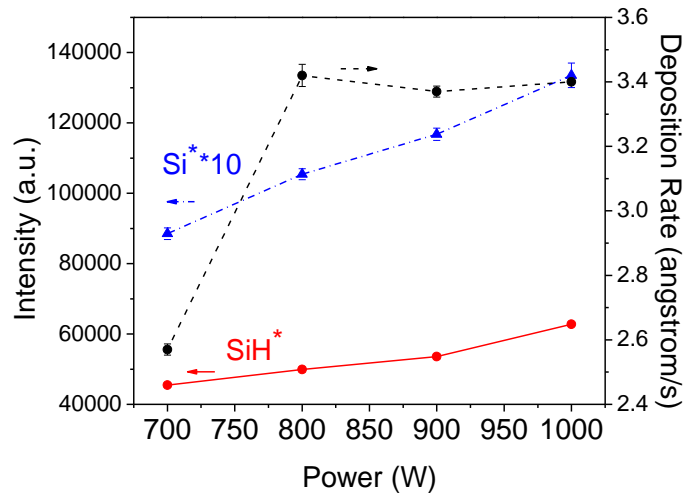


圖 10 沉積速率與特徵物種 Si^* 與 SiH^* 之強度隨射頻功率之變化(In-line PECVD)

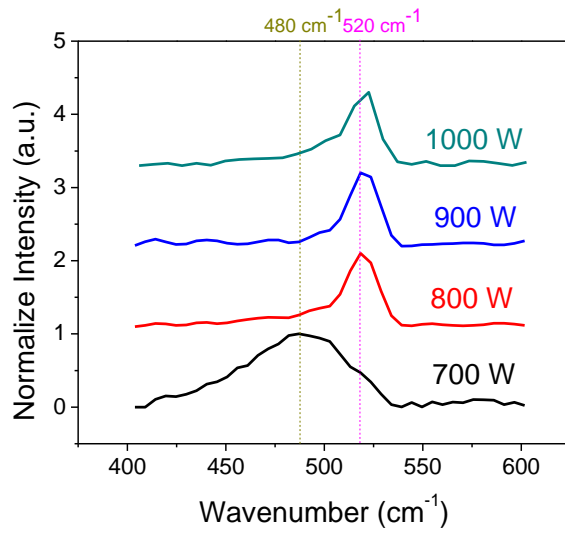


圖 11 不同射頻功率下的薄膜拉曼光譜 (In-line PECVD)

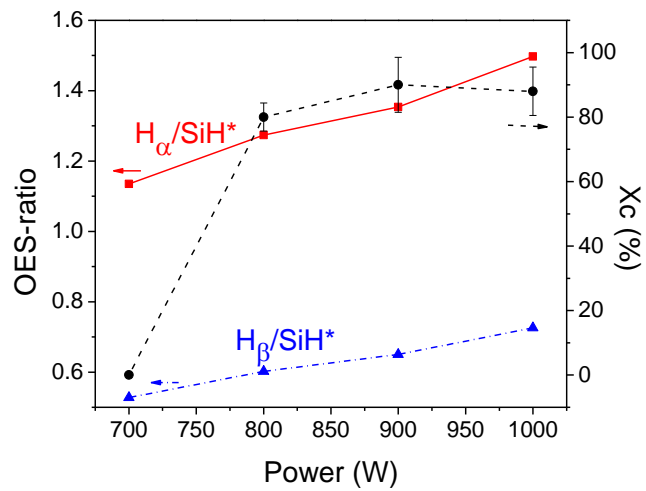


圖 12 結晶度及 OES-ratio 隨射頻功率之變化(In-line PECVD)

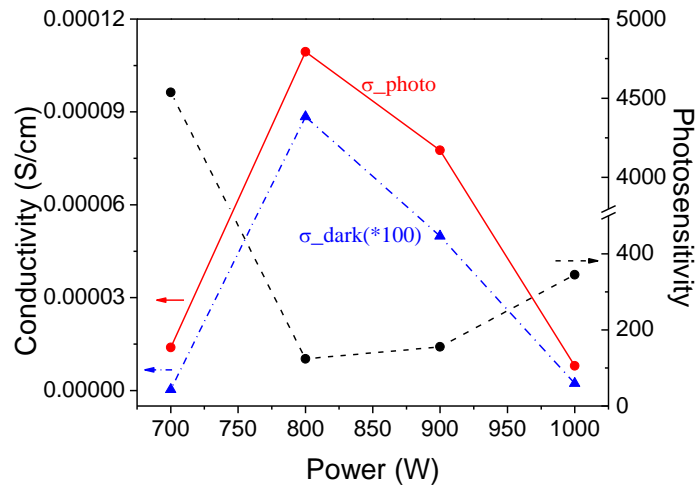


圖 13 光／暗電導及光敏性隨射頻功率之變化 (In-line PECVD)

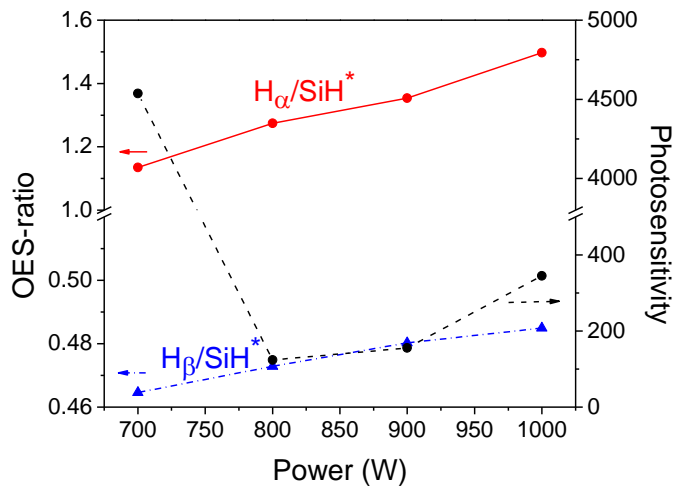


圖 14 光敏性及 OES-ratio 隨射頻功率之變化 (In-line PECVD)

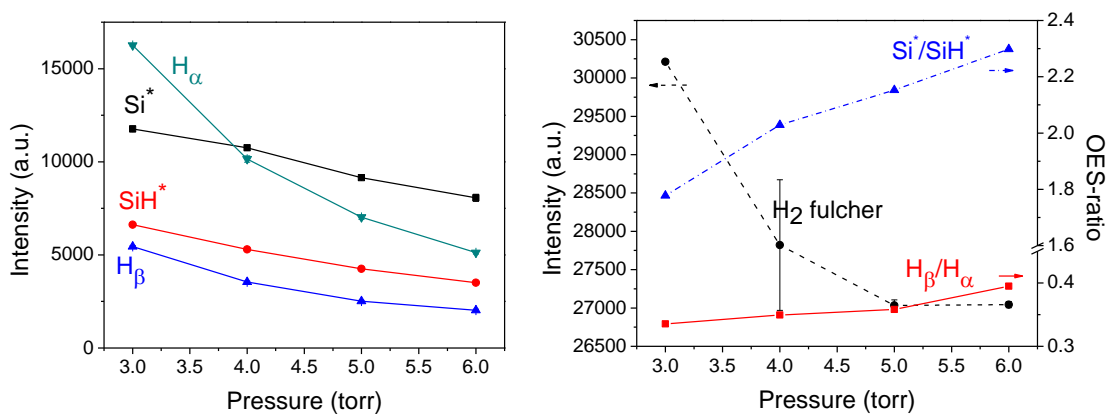


圖 15 (a) Si^* 、 SiH^* 、 H_β 及 H_α 隨氣體壓力之強度變化

(b) H_2 Fulcher、 Si^*/SiH^* 及 $\text{H}_\beta/\text{H}_\alpha$ 隨氣體壓力之強度變化 (In-line PECVD)

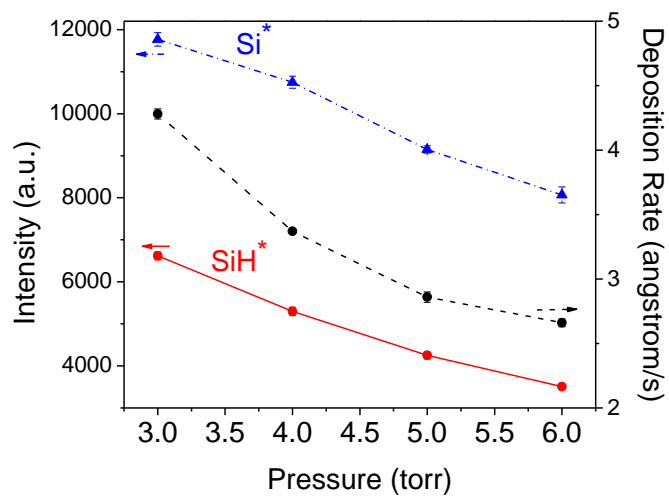


圖 16 沉積速率及特徵物種 Si^* 與 SiH^* 之強度隨氣體壓力之變化 (In-line PECVD)

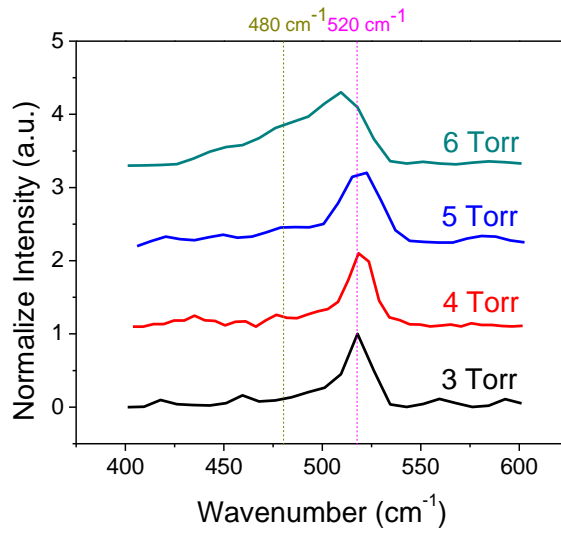


圖 17 不同氣體壓力的拉曼光譜 (In-line PECVD)

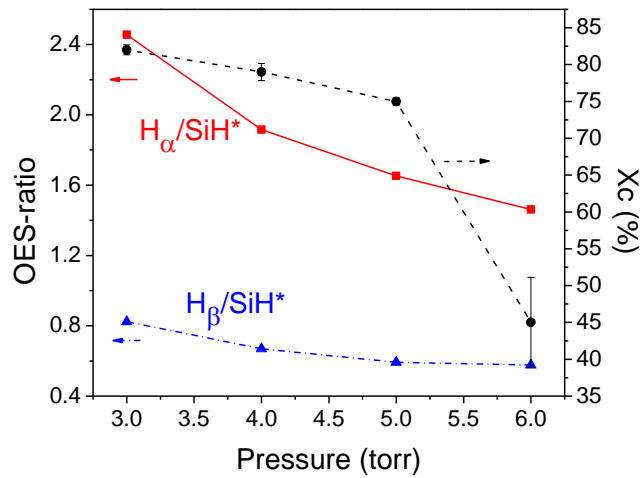


圖 18 結晶度及 OES-ratio 隨氣體壓力之變化 (In-line PECVD)

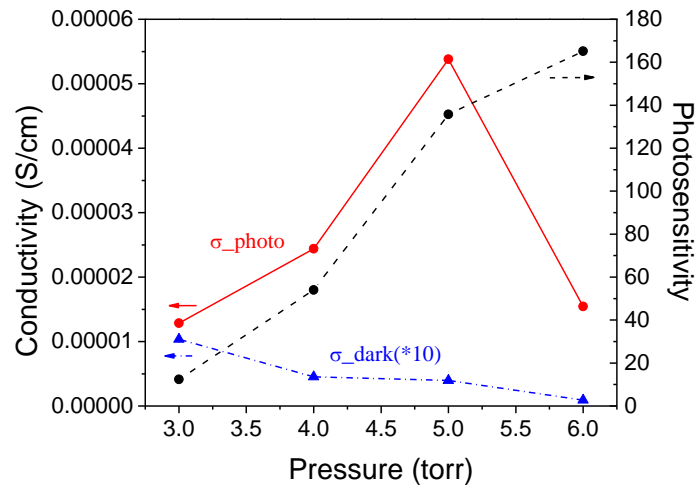


圖 19 光／暗電導及光敏性隨氣體壓力之變化 (In-line PECVD)

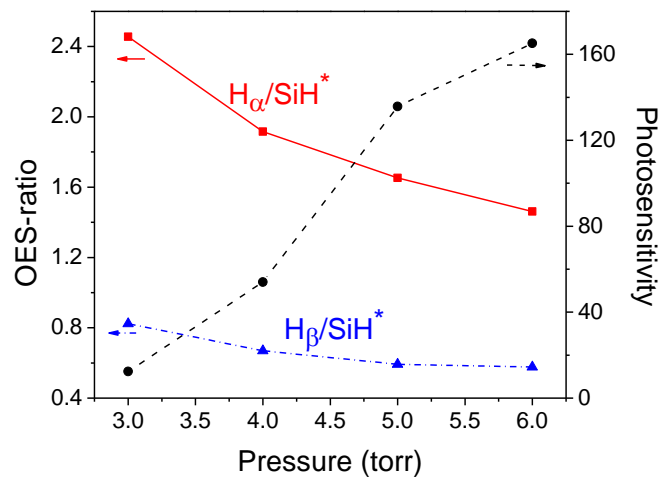


圖 20 光敏性及 OES-ratio 隨氣體壓力之變化 (In-line PECVD)

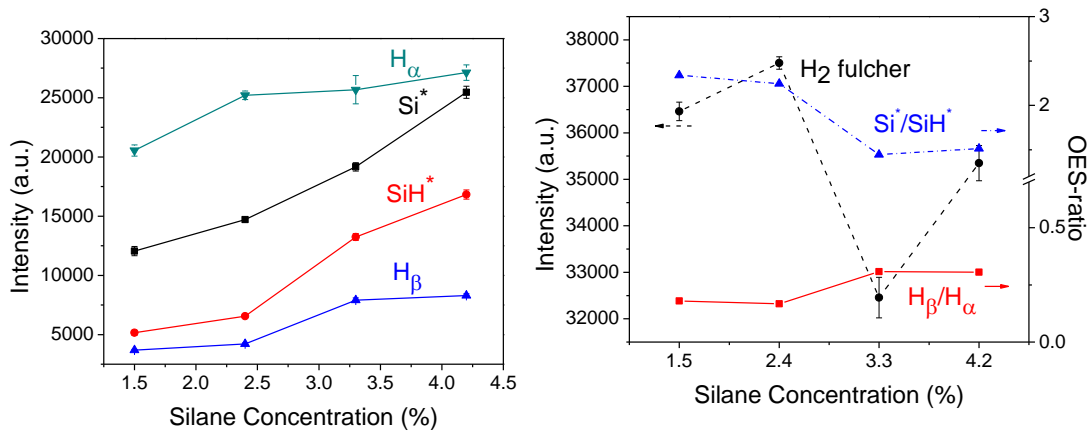


圖 21 Si^* 、圖 3 (a) SiH^* 、 H_{β} 及 H_{α} 隨矽甲烷流量比例之強度變化
 (b) H_2 Fulcher、 Si^*/SiH^* 及 H_{β}/H_{α} 隨矽甲烷流量比例之強度變化 (In-line PECVD)

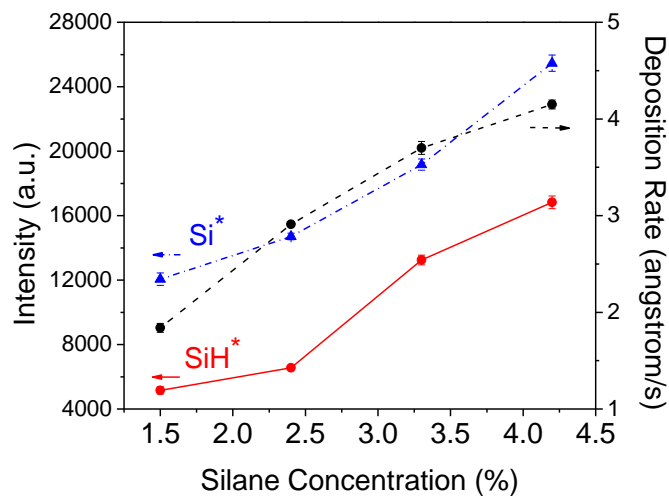


圖 22 沉積速率及特徵物種 Si^* 與 SiH^* 之強度隨矽甲烷流量比例之變化
 (In-line PECVD)

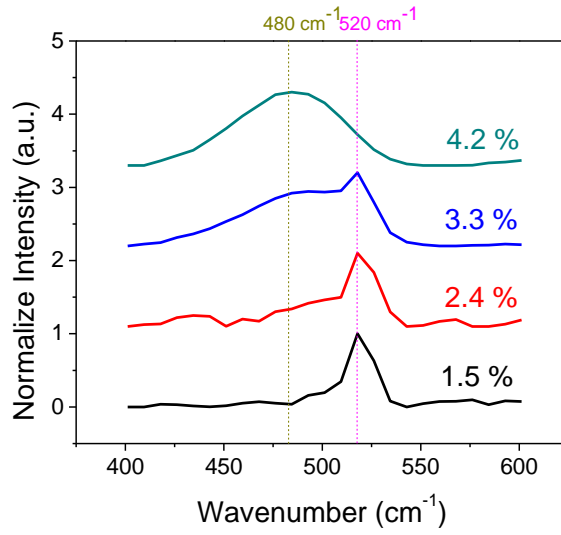


圖 23 不同矽甲烷流量比例的拉曼光譜 (In-line PECVD)

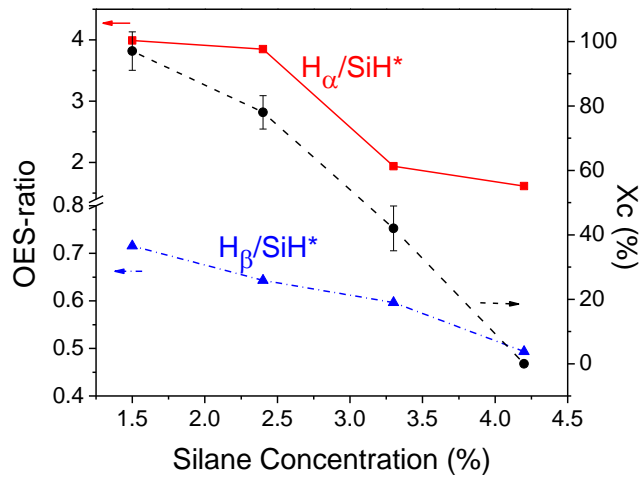


圖 24 結晶度及 OES-ratio 隨矽甲烷流量比例之變化 (In-line PECVD)

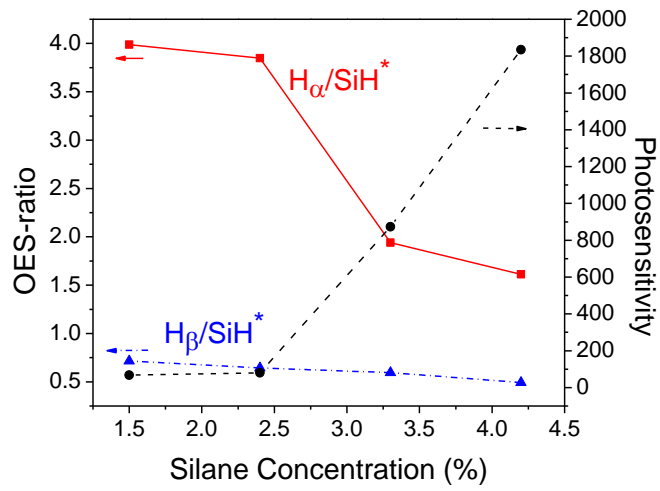


圖 25 光敏性及 OES-ratio 隨矽甲烷流量比例之變化 (In-line PECVD)

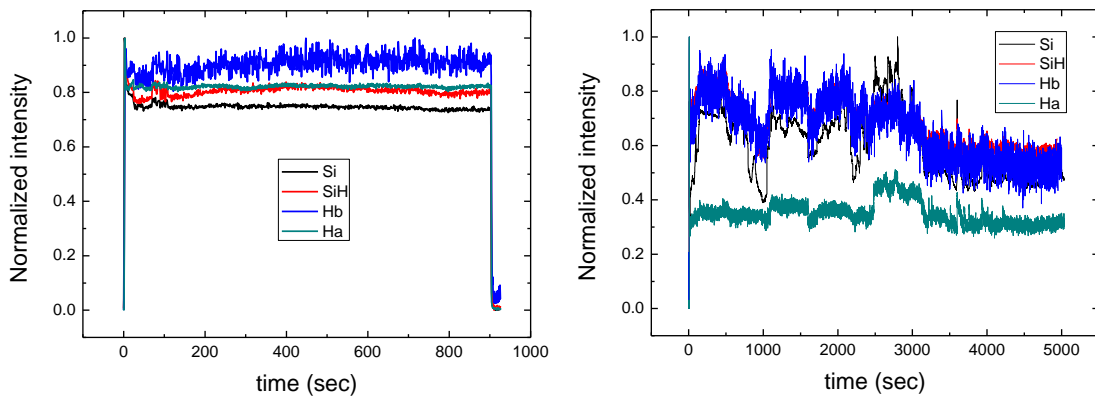


圖 26 (a) Si^* 、 SiH^* 、 H_{α} 及 H_{β} 隨時間之強度變化-靜態測試

(b) Si^* 、 SiH^* 、 H_{α} 及 H_{β} 隨時間之強度變化-動態測試 (Roll-to-Roll PECVD)

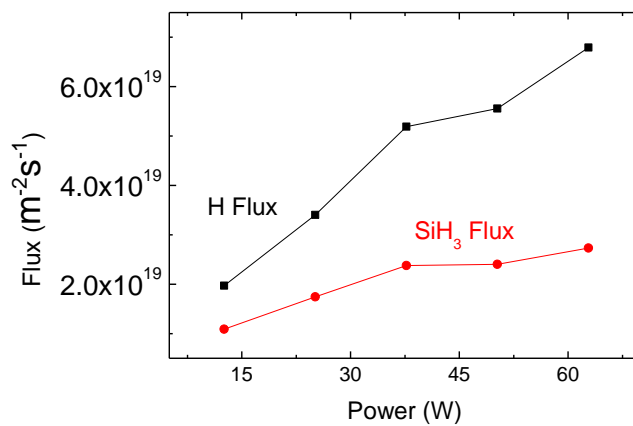


圖 27 腔體中央 H Flux 與 SiH_3 Flux 隨功率之變化 (模擬結果)

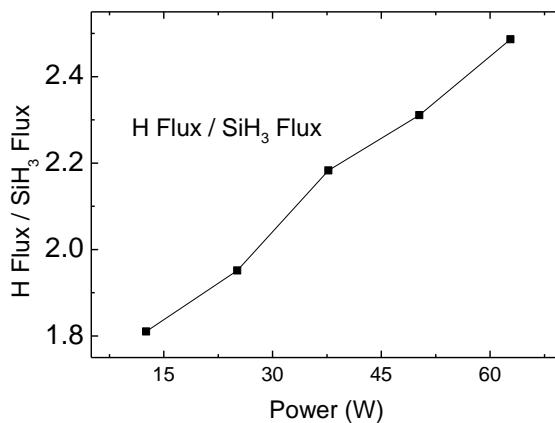


圖 28 腔體中央 H Flux/ SiH_3 Flux 比值隨功率之變化 (模擬結果)

表 5-1

	y_0	Area	Width	Center	R^2
SiH*	113508.85	54252.62	1.00	414.30	0.94

表 5-2

	y_0	Area	Width	Center	R^2
Si*	75220.51	11734.14	0.41	288.12	0.99
H$_{\beta}$	13017.68	34845.19	0.62	486.13	0.99
H$_{\alpha}$	10646.17	63732.30	0.60	656.49	1.00

表 5-3

	y_0	Area	Width	Center	R^2
480 cm$^{-1}$	35.04	41237.00	51.32	482.00	1
510 cm$^{-1}$	35.04	29124.04	28.30	510.31	1
520 cm$^{-1}$	35.04	28704.90	10.60	520.25	1

表 6-1

Frequency : 40.68 MHz		Temperature : 210 °C		
Electrode size : 43.5 × 43.5 cm ²		Electrode distance : 17 mm		
Glass size : 5 × 5 cm ²				
Pressure : 4 Torr		SiH ₄ /H ₂ = 40/1600 (sccm/sccm)		
	1	2	3	4
Power (W)	700	800	900	1000
Power (W/cm ²)	0.37	0.42	0.48	0.53
Deposition time	7 min	6 min 30 sec	6 min 15 sec	6 min

表 6-2

Power (W)	σ_{dark} (S/cm)	σ_{photo} (S/cm)	Photosensitivity
700	3.06×10^{-9}	1.39×10^{-5}	4.53×10^4
800	8.84×10^{-6}	1.09×10^{-4}	1.23×10^2
900	4.98×10^{-7}	7.76×10^{-5}	1.55×10^2
1000	2.32×10^{-8}	8.00×10^{-6}	3.45×10^2

表 6-3

Frequency : 40.68 MHz		Temperature : 210 °C		
Electrode size : 43.5 x 43.5 cm ²		Electrode distance : 17 mm		
Glass size : 5 x 5 cm ²				
Power : 1000 W		SiH ₄ /H ₂ = 40/1600 (sccm/sccm)		
	1	2	3	4
Pressure (Torr)	3	4	5	6
Deposition time	5 min 30 sec	6 min	7 min 30 sec	9 min

表 6-4

Pressure (torr)	σ_{dark} (S/cm)	σ_{photo} (S/cm)	Photosensitivity
3	1.03×10^{-6}	1.29×10^{-5}	1.24×10^1
4	4.52×10^{-7}	2.44×10^{-5}	5.40×10^1
5	3.96×10^{-7}	5.38×10^{-5}	1.36×10^2
6	9.34×10^{-8}	1.54×10^{-5}	1.65×10^2

表 6-5

Frequency : 40.68 MHz		Temperature : 210 °C		
Electrode size : 43.5 x 43.5 cm ²		Electrode distance : 17 mm		
Glass size : 5 x 5 cm ²				
Power : 1000 W	Pressure : 5 Torr		H ₂ : 1600 sccm	
	1	2	3	4
SiH ₄ (sccm)	25	40	55	70
SC (%) [SiH ₄]/([SiH ₄]+[H ₂])	1.5 %	2.4 %	3.3 %	4.2 %
Deposition time	8 min	7 min 30 sec	7 min	6 min 30 sec

表 6-6

SC (%)	σ_{dark} (S/cm)	σ_{photo} (S/cm)	Photosensitivity
1.5	1.42×10^{-7}	9.57×10^{-6}	6.76×10^1
2.4	2.05×10^{-7}	1.65×10^{-5}	8.04×10^1
3.3	3.63×10^{-9}	3.17×10^{-6}	8.74×10^2
4.2	2.12×10^{-9}	3.89×10^{-6}	1.83×10^3