

電漿源原理與應用之介紹

文/張家豪，魏鴻文，翁政輝，柳克強

李安平，寇崇善

吳敏文，曾錦清，蔡文發，鄭國川

摘要

電漿科技已廣泛應用於科學研究及工業製程，成為現代科技的重要指標。本文將介紹國內在電漿源方面的研發，其中包括電感式電漿源，微波表面波電漿源，大氣電漿源，電漿浸沒離子佈植及電漿火炬等等。文中將簡介各式電漿源之基本物理及其應用發展。

1. 前言

電漿已廣泛應用於各種領域，如在半導體積體電路製造方面，舉凡不同材料薄膜的成長及電路的蝕刻皆普遍由電漿技術達成。另外在半導封裝及紡織業方面，則使用電漿來清潔及改變材料表面以達到特殊的功能及效果。在環保方面，電漿火炬可以安全固化焚化爐所產生之高污染灰渣。甚至在醫療上現已有商用之電漿設備用於手術刀具的殺菌。而在科學研究方面電漿更已成為重要的工具，如奈米碳管的成長，微機電的研發等等。

電漿之所以能提供如此廣泛的功能主要在於電漿中的反應是許多不同成分間的作用 (Heterogeneous Interactions)，其中包括紫外線，中性粒子，活化粒子，電子及離子的反應。尤其是包含了具能量的粒子，它們能引發許多特殊的化學與物理的反應。例如在電漿蝕刻技術中，正離子經由電漿鞘層 (Plasma Sheath) 加速後轟擊矽晶圓，使其表面原子的鍵結破壞進而能迅速與活化粒子進行化學反應達到蝕刻效果。另外如在鑽石膜成長中，電漿一方面產生成長所需要的碳原子，當其在表面形成鍵結時，電漿中所產生的氫原子則能與石墨鍵結的碳原子進行蝕刻反應而留下鑽石的鍵結。在奈米碳管成長中，電漿鞘層的電場則能達到高方向性的成長。這是其他方法所無法達到的。

在電漿技術中電漿源則是系統的關鍵。目前產生電漿的方法以使用的功率源而言有直流放電 (DC

discharge)，低頻及中頻放電 (數 KHz 到數 MHz)，射頻放電 (13.6MHz)，及微波放電 (2.45GHz)。現行電漿製程多操作在低氣壓之輝光放電 (mTorr 到百 Torr)。而操作在 1 大氣壓的低溫電漿製程則是現在研究的重要課題。以半導體製程而言，則以射頻放電被採用的最多。

本文將簡介數種電漿源，包含直流放電到微波放電；低氣壓電漿到大氣電漿；低溫電漿到高溫電漿。其中由柳克強教授介紹射頻電感耦合放電；寇崇善教授介紹微波表面波電漿；吳敏文博士介紹中頻大氣壓低溫電漿；曾錦清博士介紹直流大氣壓高溫電漿；電漿浸沒離子佈植則由蔡文發博士介紹。本文由鄭國川博士與寇崇善教授彙編。受限於篇幅，本文並未嘗試全面涵蓋國內在這方面的工作。

2-1 電感式電漿 (柳克強，清華大學工程與系統科學系)

電感耦合式電漿 (Inductively-Coupled Plasma, ICP) 為一結構簡單而應用廣泛之電漿源。ICP 之電漿產生與維持，為利用電磁感應產生之電場，加熱電漿電子，以應游離反應所需。而電磁感應所需之時變 (交流) 磁場，是由金屬導線上通交流電流所產生。導線通常繞成柱狀 (column, solenoid) 或平面型 (planar) 之線圈 (coil)，而交流時變電流之頻率多在數十 kHz 至數百 MHz 範圍。圖 1 為平面型 ICP 結構 (剖面) 示意簡圖，其中線圈置於真空介電窗 (dielectric window，通常為石英或陶瓷) 外，流經線圈之 RF 電流，產生

環繞電流方向的時變磁場 (B)，此磁場穿透介電窗，於電漿腔中感應產生一與 RF 電流反向之電場 (E)，此電場加速電子並感應形成電漿電流 (J_p)。由於此電磁感應機制與變壓器原理相同，其中線圈為變壓器之一次側(primary)，而電漿則視為二次側(secondary)。因此，ICP 又稱為變壓器偶合式電漿(Transformer Coupled Plasma, TCP)。電感偶合式電漿在低輸入功率(低電漿密度)時，射頻功率之偶合是以線圈與電漿間高電位差造成的電容式效應為主，當所形成的電漿電流大於某一低限電流值(Threshold Current)時，才能使電漿產生之機制操作在電感偶合模式(Inductive Mode, H mode)。由於電感偶合模式其功率吸收較電容偶合模式來得佳，此時電漿密度將顯著地增加。由於 ICP 之電漿密度($n \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)較傳統電容式電漿($n \sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) 高一至二數量級，通常歸類為高密度電漿(High Density Plasmas, HDP)。此外在半導體製程應用上，在晶圓座通常亦施加另一射頻電源，可獨立控制離子能量與電流，對於半導體製程精確度與重現性之掌握極為重要。

在 ICP 之射頻電場中，電子加熱的機制包括歐姆加熱 (Ohmic heating) 與 隨機加熱 (Stochastic heating)[1]。歐姆加熱機制與電子之碰撞反應有關，一電子於週期性時變電場中，若前半週期受電場加速，後半週期受力方向反轉而減速，經一週期該電子淨動能並無改變。然而當加入碰撞因素時，部份電子有機會在電場方向改變的時候，由於碰撞而改變其行徑方

向，如此便可能持續獲得電場加速。於碰撞頻率等於射頻功率頻率時，碰撞加熱效果最好。在一般工業應用之弱游離電漿(weakly ionized plasma)中，電子之碰撞反應以與中性粒子之碰撞為主，因此當操作於低氣壓時，中性粒子密度低，電子碰撞頻率遠低於射頻功率頻率，歐姆加熱效率甚低，而 ICP 中電子加熱轉為以隨機加熱機制為主。圖 1 為電感式電漿中隨機加熱機制示意圖，其中由於在通常操作範圍(13.56 MHz RF, $n \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)，RF 頻率遠低於電漿頻率，RF 電場在電漿中之分佈僅限於趨膚深度(skin depth $\sim \text{cm}$)之範圍，對一主電漿(bulk plasma)中向鞘層移動之電子，由於鞘層電位較低而使電子轉向離開鞘層。由於氣壓低，其間未發生碰撞，電子速度僅單純方向的改變。若電子通過趨膚深度的時間比射頻電場週期短時，電子可能只感受到單一方向電場的加速而獲得能量。由於此機制係於低碰撞頻率情況下才越加顯著，故亦稱之非碰撞加熱(collisionless heating)。

常見的電感偶合式電漿源若依感應線圈形狀的設計，可分為螺旋狀電感式電漿源 (Helical ICP) 與平面型電感式電漿源 (Spiral planar ICP)。螺旋狀電感式電漿源中，螺旋形感應線圈圍繞在管狀介電真空腔外圍，其感應射頻電場在管壁附近最大，朝中心以指數型式下降，因此不易達成大面積均勻電漿。但在化學光譜分析、化學合成、長晶及廢棄物處理等方面，因無大面積均勻度之要求，仍有甚廣之應用。在半導體製程應用上，較常採用平面型電感式電漿源 (如圖 2

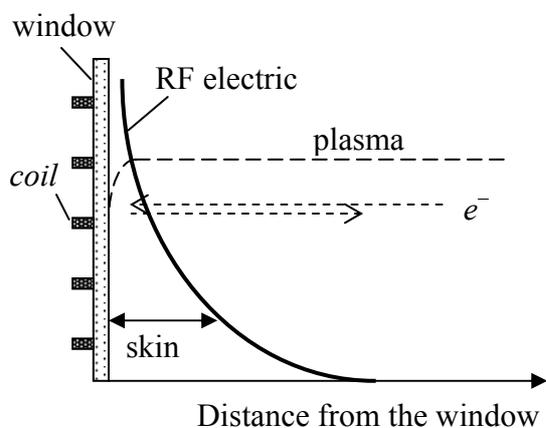


圖 1 電感式電漿源非碰撞加熱機制示意圖。

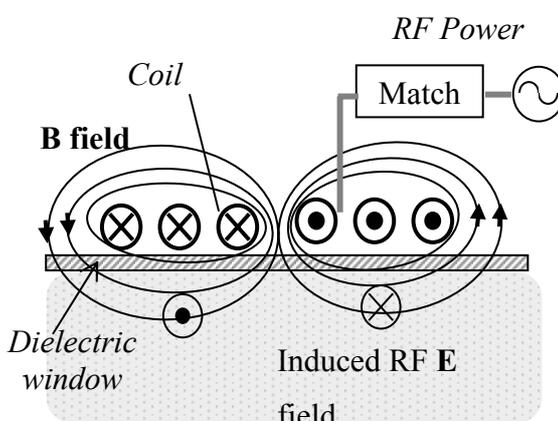


圖 2 平面型 ICP 結構示意簡圖。

所示)，其中平面型螺旋線圈 (Spiral coil) 置於平面真空介電窗上，此設計可利用調變線圈之分佈或與真空窗之距離，使晶圓表面的電漿分佈均勻[2]，符合現代積體電路製造大面積晶圓製程之需求。電感偶合式電漿源除以上提及之應用外，近年亦在奈米材料與元件製程方面有重大進展，以下將介紹我們最近以電感式電漿技術為基礎，在奈米碳管合成方面之研究成果。我們主要研究為電漿輔助催化劑式化學氣相沈積法 (Catalytic Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, Catalytic PECVD) 成長奈米碳管 (Carbon Nanotubes, CNT) 和奈米碳纖維 (Carbon Nanofibers, CNF)。Catalytic CVD 主要是利用含碳的氣體在催化金屬表面熱裂解而成長 CNT/CNF，而以電漿之輔助可以大大降低其製程溫度，此外亦易於控制 CNT/CNF 的成長特性及區域，並能與微製程技術整合。另一方面，由於電漿鞘層之電場垂直基板表面，促使 CNT/CNF 垂直基板表面成長，為理想之場發射電子源。我們以自行研製之高密度電漿電感式偶合電漿系統，在低溫、低壓下以乙烯/氬氣的混合電漿成長均勻垂直基板之 CNF 陣列[3]，如圖 3(a)所示。此外，亦利用電漿光譜儀、質譜儀與蘭牟爾探針(Langmuir probe)，即時量測電漿中粒子的濃度和成分比例、電漿密度、電子溫度、電漿電位，以及以 RF 阻抗計量測在基板的 RF 電壓和電流，而獲得知離子能量、電流與電漿鞘電場。並進一步探討基板表面的電場強度、電漿中的粒子種類和濃度、基板溫度，對奈米碳纖維的外在形貌、內部結構、整體的石墨化程度和場發射特性的影響[4]。除了透過調整最佳的電漿參數來成長利於場發射應用的 CNF 外，我們亦利用臨場 (in situ) 電漿前處理及後處理的方式，來改善其場發射特性。CNT/CNF 陣列的整體場發射表現，除了取決材料本身的性質 (如功函數、尖端曲率) 外，亦須控制 CNT/CNF 密度，在“增加場發射源數目”與“降低電場屏蔽效應”兩因素間取得最佳化。我們利用高能的氬氣電漿，以電漿臨場前處理中高溫形成的催化劑奈米顆粒，控制催化劑顆粒的密度，可有效的控制成長出來 CNT/CNF 的密度。我們亦成功利用氬氣電漿臨場後處理，改變

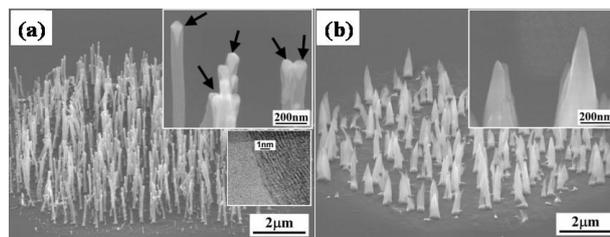


圖 3 在電感式偶合電漿源化學氣相沈積系統中所合成之奈米碳纖維：(a) 掃瞄式電子顯微鏡 (SEM) 照片及穿透式電子顯微鏡 (TEM) 照片[3] 與(b) 經高能氬氣電漿後處理後之 SEM 照片[5]。

CNT/CNF 幾何及微觀結構，改善場發射特性。CNF 經氬氣電漿後處理之結果如圖 3(b)所示。在高能氬氣電漿的後處理下，CNF 由於物理性的轟擊效應，原本柱狀的結構改變其成為尖錐狀，原本位於頂端的催化金屬顆粒亦由於離子轟擊而變小或消失。我們提出一個“共同蝕刻-沈積機制”來解釋碳管在非反應性離子轟擊下對於其形貌上的改變與影響其場發射行為的因子[5]。此外，在電漿後處理的製程中，我們發現頂端的催化劑奈米顆粒其尺寸可因氬氣電漿的轟擊而降低至數個奈米大小，因此我們嘗試發展一種新的製程來再成長懸掛的單壁碳管 (Single-Walled Carbon Nanotubes, SWNT) 橫跨於經後處理的 CNF 上。在成長 SWNT 的條件不變下，藉由調變後處理的參數，我們可以得到後處理 CNF 及其頂端催化劑顆粒的大小最適於 SWNT 成長的最佳參數，如圖 4 所示 [6]。此製程對往後 SWNT 的研究以及電子或光電元件的製作上，均極有助益。

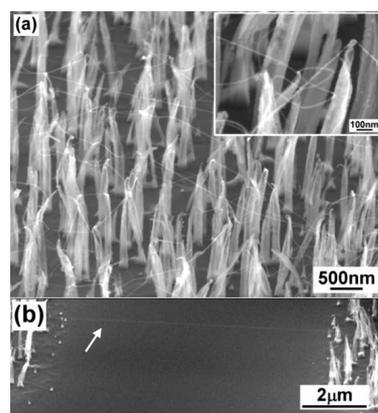


圖 4 (a) 最佳後處理參數並成長懸掛單壁奈米碳管之 SEM 照片；(b) 單根橫跨約 10 微米距離之懸掛的單壁奈米碳管 [6]。

電感式電漿在 1990-1995 年期間成功發展應用於半導體製程之大面積高密度均勻電漿技術，對於積體電路製造進入 200 mm – 300 mm 晶圓與深次微米世代有決定性之貢獻，在如今 21 世紀之奈米科技紀元，電感式電漿相關技術仍繼續精進，朝向更大面積、更均勻、更具彈性之製程發展，扮演更重要之角色。

2-2 微波表面波電漿源(寇崇善，清華大學物理系)

微波表面波電漿源是以電磁波(2.45GHz)激發電漿中的表面波為其機制。考慮由電漿，石英板及空氣所組成的三層結構。當電漿密度滿足 $\omega_p > \omega(1+\epsilon)^{1/2}$ 時 (ϵ 為石英之介電係數)，電磁波在電漿及空氣中以指數的方式迅速衰減，因此電磁波能量沿著電漿表面傳遞而構成電漿表面波(plasma surface wave)。表面波電漿源的特點在於形成高密度電漿。如以 2.45 GHz 微波為例，電漿密度可高於 10^{11} cm^{-3} 。

早期表面波電漿源以激發小圓柱形之電漿為主，其直徑約為 1-2 cm。為達到激發大面積電漿的要求，我們提出以平面型可調式表面波共振腔為電漿激發結構[7-10]。其示意如圖 5 所示其特點在於：(1) 分佈式的微波耦合結構，微波能量以平面型的方式展開後與真空腔耦合，用以激發大面積的電漿。(2) 微波傳輸結構與電漿產生區分隔，如此能減少電漿產生後對於微波傳輸的影響，而分佈式的微波耦合方式方能達成。

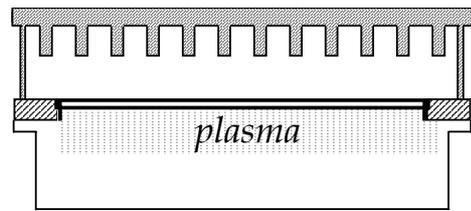


圖 5 平面型可調式表面波共振腔電漿激發結構

分佈式的微波耦合主要是利用微波中的梳型週期性慢波結構。如圖 5 所示，在此結構上，微波是以表面波的方式傳輸，其功率主要侷限在梳型結構的表面，往真空腔方向以指數的方式衰減。而在橫方向為均勻分布。此一週期性慢波結構將微波能量以平面的方式展開，來實現分佈式微波耦合的想法。此外，為了有效地使用微波功率及獲得較高場強，採用共振腔的設計並使其操作於 π 模式(微波每經一週期之相位差為 π ，共振頻率的調整則是藉由改變梳齒的高度來達成。圖 5 即為 12 週期之可調式表面波共振腔。而前面提到的第 2 項特點即微波傳輸結構與電漿產生區分隔，則是靠石英板來實現。如圖 5 所示，此石英板不僅具有分隔和耦合的功用，最重要的是，由其所造成之電漿不連續界面還能激發出電漿表面波，使電漿密度能高於 10^{11} cm^{-3} 。圖 6 就是大面積平面型微波電漿源系統結構圖。微波經由耦合器進入可調式表面波共振腔，激發出 π 模式表面波，再經由兩塊石英板的耦合而產生大面積之平面型電漿。藉由蘭牟爾探針即可進行電漿特性及均勻度的量測。

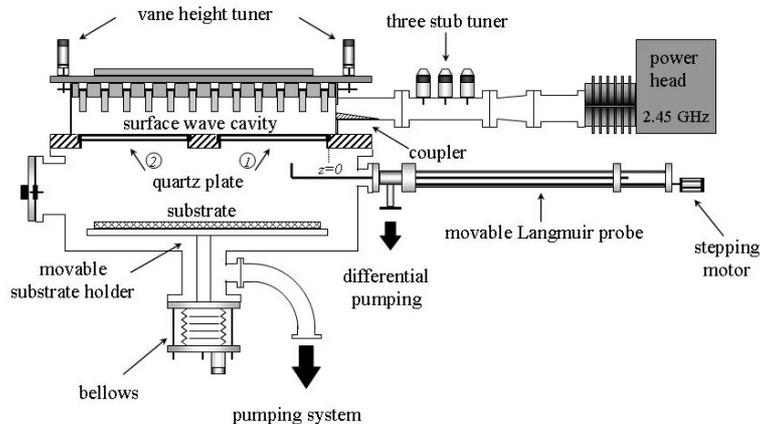


圖 6 大面積平面型微波電漿源系統結構

實驗結果顯示，在氣壓低於 30 mTorr 時，可以激發 50cm×25cm 之大面積電漿，其均勻度為±10%。在高氣壓時電漿密度不均勻是由於石英板不連續所造成(如圖 7 所示)。圖 8 顯示電漿密度在不同氣壓下隨微

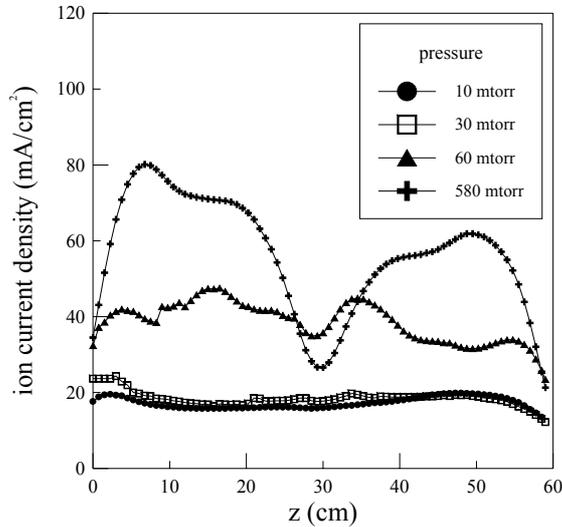


圖 7 電漿分佈

在此表面波電漿源中亦量測到電漿共振現象 (plasma resonance)[9]。電漿之介電常數為 $\epsilon_p = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$ ，故當電漿頻率等於電磁波頻率時， ϵ_p 可為零。因為 electric displacement, $D = \epsilon_p E$ ，必須連續，故電場會大幅增加。此為電漿共振現象。由於電漿表面波的激發，使電漿密度值必高於一密度下限。但由於電子擴散效應，使電漿邊界處有一電漿密度衰減區，愈靠近邊界密度就愈低。由於此衰減區的存在，使電漿頻率 ω_p 有機會等於電磁波頻率，即 $\omega_p = \omega$ ，故引發電漿共振現象。實驗量測顯示當區域電漿密度等於一個特定值時，微波電場會大幅增大形成區域極大值。如圖 8 所示而當電漿空間分佈改變時，此一電場極大值的位置也會改變，但所對應的區域電漿密度不變。此外，電場增大量與電漿密度的梯度成正比，這與理論預測相符。另一方面，當共振發生時，高能量電子也隨之發生。

在應用研究方面，本系統主要用於鑽石膜，尖狀結構及奈米鑽石柱成長之研發。此外並探討其場發射及散熱之特性 [11-19]。如圖 10 所示，我們已成功的

波功率的變化。由於電漿表面波的激發，當氣壓為 30 mTorr，微波功率 2.0 kW 時，電漿密度可達 10^{12}cm^{-3} 。其電漿溫度約為 1.5eV，電位約 12 V。

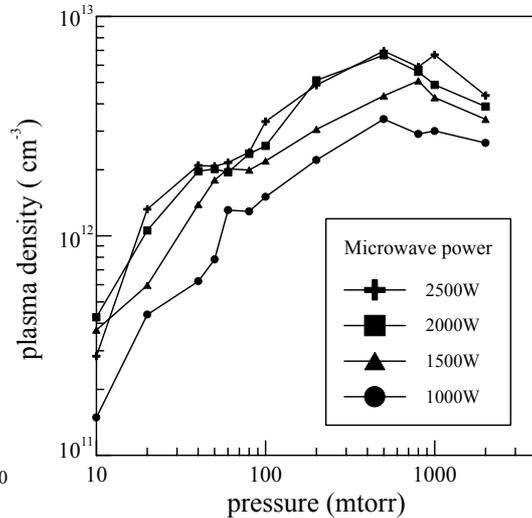


圖 8 電漿密度在不同氣壓的變化

研發出單晶之奈米鑽石柱。

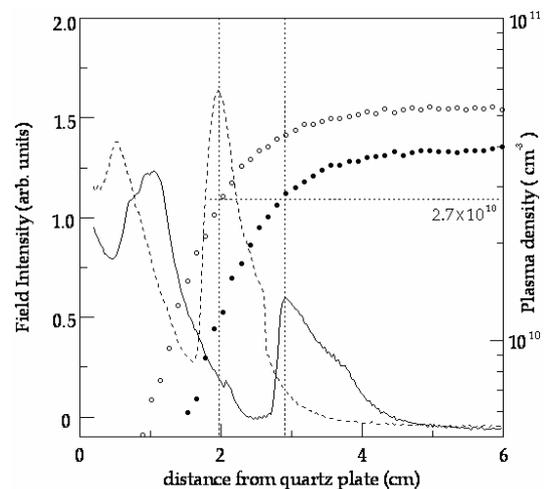


圖 8 電漿密度與微波電場空間之分佈。功率各為 1.1kW 及 1.6 kW。

2-3 大氣輝光電漿(吳敏文，核能研究所)

低壓(Low-pressure)或真空輝光電漿自 1970 年即開始應用於半導體元件之製造與各種工業材料之處理，目前在半導體工業每年約創造 100 億美元之產值。但是，由於這項處理技術需要昂貴的真空設備，

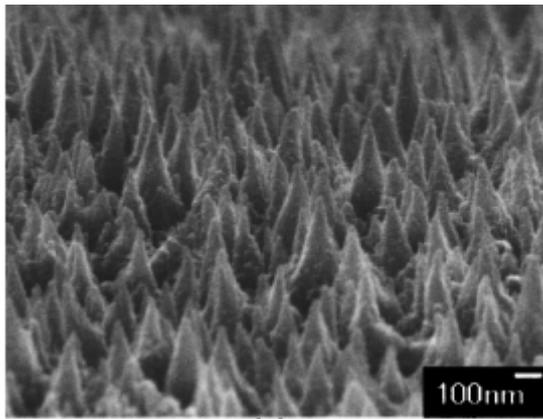


圖 9 類鑽石尖狀結構

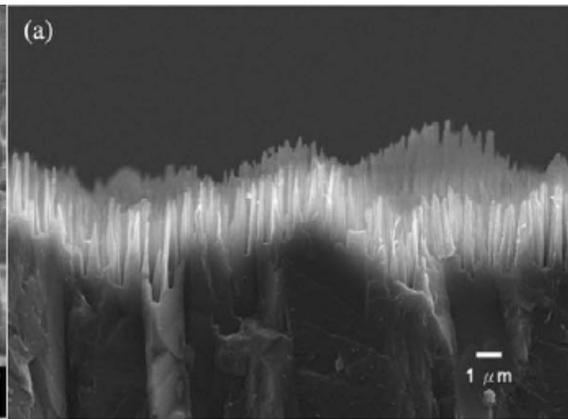


圖 10 單晶奈米鑽石柱

且其產量受到限制，因此，對附加價值較低與需要大產量之傳統產業例如紡織業與造紙業等，其應用成本偏高而未具有競爭力。因此，為了降低電漿之應用成本，近年來國內外專家均積極研發無需真空的大氣輝光電漿。

低壓輝光電漿為非熱平衡電漿，其電漿整體之溫度接近室溫，故又稱為低溫電漿，其低溫特性確保其在材料處理上不會造成材料之損傷，而其最大優點為其含有多樣化的化學活性種(Chemically active species)及良好的電漿空間分佈之均勻性，故在材料處理製程上並無其他方法可以取代。大氣輝光電漿除無需在真空中操作外，亦必須具有低溫及電漿空間分佈均勻之特性，才適合高品質之材料處理需求。

電暈放電(Corona Discharge)與介電屏蔽板湯生放電(Dielectric Barrier Townsend Discharges)等兩種放電產生之電漿雖然能滿足低溫的需求，但因其電漿密度較低與電漿之空間分佈的均勻度不佳等缺點，故僅能適合較低品質之材料處理需求。而電漿密度高且具良好均勻性之大氣輝光放電電漿，於 1988 年首先研發成功[20]，國際間目前最成熟且市場上已有商業產品之大氣輝光電漿分為兩大類；其一為介電屏蔽板式大氣輝光電漿(Atmospheric Pressure Glow Discharge Plasmas, APGD)，其二為噴射式大氣輝光電漿(Atmospheric Pressure Glow Discharge Plasma Jet, APPJ)等。其中，噴射式大氣輝光電漿之氣體消耗量

大及面積較小，而介電屏蔽板式大氣輝光電漿之電漿面積最大，最適合大面積紡織品等高分子材料之表面改質[22,23]。因此，其產生電漿之物理機制最值得深入探討。

根據已發表之文獻[20,21]，欲在大氣壓下產生大面積且均勻之輝光電漿，其電極結構、放電氣體與電源頻率等均是關鍵因素。介電屏蔽板式之大氣輝光電漿源之基本構造如圖 11 所示，其關鍵性組件包含貼上介電屏蔽板(Dielectric plates)之金屬電極、惰性氣體與高壓電源等三項，茲將探討這三項組件對產生大氣輝光電漿扮演之角色。

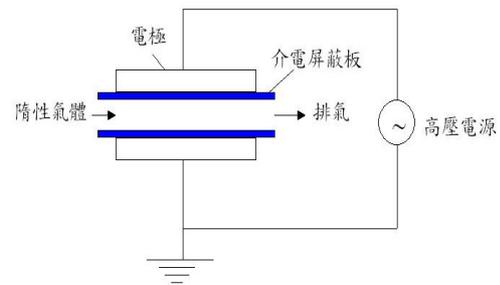


圖 11 大氣輝光電漿源之基本構造

首先，電極所黏貼之介電屏蔽板為其第一項關鍵性結構，由於大氣壓下之氣體密度比真空(<0.1 Torr)高出約 10,000 倍，因此其電子、離子與氣體碰撞之機率很高，導致其平均自由路徑很短，其二次發射電子(Secondary Emission Electrons)游離氣體所產生之連鎖反應，導致極短時間內產生大量之電子團

(Avalanche)，在電極間形成導電通道而產生電弧放電。而若兩電極之間有介電屏蔽板，則其二次發射之電子團將在正電極之介電屏蔽板上累積且均勻分散，這些電子團與移動緩慢而聚集在負電極附近之離子團產生一空間電荷電場，因其方向與外加電場相反，而抵銷了大部分的外加電場，因而降低了電極間之電場，也降低短時間大量湧至之電子數目，因此能防止電弧放電。

產生穩定之大氣輝光電漿之第二項要件為採用惰性氣體如氦氣、氖氣或氬氣等。由於氦氣具有以下三項獨有之特性：其一為在相同電極間距下，氦氣的崩潰電壓(Breakdown voltage)比非惰性氣體(如氮氣與空氣)低很多如圖 12 所示，崩潰電壓低，則電漿源可操作在較低電壓，而低電壓所產生之電子增殖(multiplication)也較小，因此可避免產生電弧放電；其二為氦亞穩態分子(He Metastables)之壽命較長(數秒)，可暫存放電之能量後再以較長時間慢慢釋放。因此，氦之亞穩態分子亦可避免全部能量在極短時間放出而造成電弧放電；其三為氦氣具有能量較高(~20 eV)的氦亞穩態能階，能儲存更多之放電能量，故更能避免短時間電流太大而產生的電弧放電。

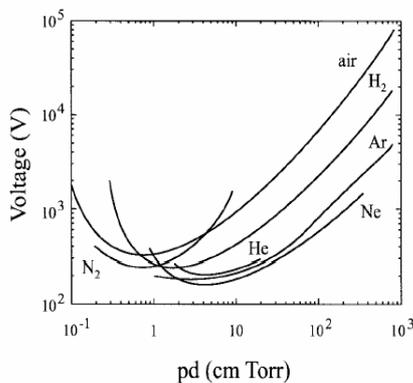


圖 12 各種氣體之崩潰電壓

高壓電源之頻率為產生大氣輝光電漿之第三項重要因素。由於壽命較長之氦亞穩態分子與氦氣之中性基團或雜質氣體等之碰撞，在放電後還能持續產生電子與離子。此延遲產生之電子與離子，與下一個高壓脈波在時間上重疊之程度與高壓之頻率有關。在前一

個高壓脈波產生延遲電子與離子最多時，剛好下一個高壓脈波之出現，因而有最大之預游離(Preionization)效應，最有利於產生大氣輝光放電電漿，也是最佳之高壓電源頻率，通常在 1-100 kHz 之間。若電源之頻率太低，則前一高壓脈波產生之延遲電子與離子已完全消失後，下一個高壓脈波才出現，因無預先游離之電子，故較難產生大氣輝光電漿。圖 13 為核研所研發的介電屏蔽板式之大氣輝光電漿源實體及其放電情形。

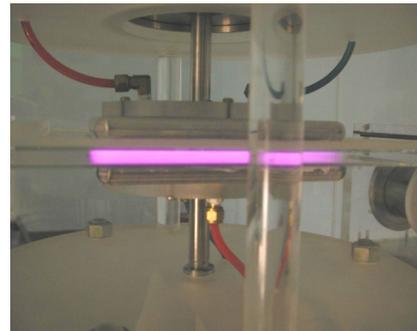


圖 13 核研所開發之大氣輝光電漿源實體及放電情形

大氣輝光電漿之應用範圍甚廣包括：(1)紡織品、紙、塑膠、橡膠與生醫材料等高分子材料之表面改質 [22,23]，(2)塑膠材料之鍍膜，(3)室內空氣與醫療器材之消毒與滅菌，(4)玻璃與多層 PC 板之清潔，及(5)軍事上保密設施之隱形等，其應用前景未可限量。

2-4 直流電漿火炬簡介(曾錦清，核能研究所)

熱電漿火炬大致可分為電感耦合電漿火炬(Inductively Coupled Plasma Torch，簡稱為 ICP Torch)、交流電漿火炬(AC Plasma Torch)及直流電漿火炬(DC Plasma Torch)等三種，電感耦合電漿火炬因使用射頻電源供應器提供氣體放電所需的電力，設備投資高、效率低而且規模放大較困難；交流電漿火炬則由於電極使用壽命比較短，而且有幾何安排的限制，因此，目前絕大多數的電漿熔融處理系統採用直流電漿火炬，而且為減低電極熔蝕率，增長維修週期，皆採用管型電極設計。

直流電漿火炬係氣體放電的一種形式，即工作氣

壓大於 1 atm 的自我維持弧光放電，其電流密度為 $10^2 \sim 10^7 \text{ Amp/cm}^2$ ，電場強度約 $5 \sim 20 \text{ V/cm}$ ；其電壓與電流的關係圖呈拋物線下降形式，並隨工作氣壓的大小、氣體種類及放電結構等而有所改變[24]。高功率直流電漿火炬的工作電壓由數百伏特至數仟伏特，而電流則在數拾至數仟安培之間；電極的流失量在實心電極的情況約 10^{-7} 公克/庫侖，而在空心陰極的情況下，配合螺旋流動(Vortex flow)的工作氣體或外加磁場，使弧根在陰極上作圓周運動，降低電極溫度並減少電極流失量(約 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 公克/庫侖)。電極流失量與通過電極的總電荷數成正比，因此，在額定的功率下，應盡可能提高火炬的工作電壓，減小放電電流，才能延長火炬電極的使用壽命。直流電漿火炬可分類為傳輸型直流電漿火炬(Transferred DC Plasma Torch)及非傳輸型直流電漿火炬(Non-Transferred DC Plasma Torch)兩種操作模式；傳輸型火炬的電極一個在火炬

本體上，另一個則在被處理物上，藉著改變火炬與工作物的距離、氣體流量及氣體種類來調整火炬的功率；而非傳輸型火炬的兩個電極都在火炬的本體上，主要是藉著改變氣體流量及氣體的種類來調整火炬的輸出功率。漩流產生器(swirler)用以產生火炬空心電極內的漩流氣體，造成密度梯度使空心電極中心氣體的密度比接近電極壁之氣體密度低，有利於氣體延著電極中心放電；此外，旋轉氣體快速地流動可把氣體放電加在電極內壁的高輻射熱迅速帶走，降低電極的溫度及穩定電弧，並且造壓力梯度將電弧沿漩流產生器兩端的電極延伸拉長，增加火炬的輸出功率。漩流產生器係由一個有對稱切線孔洞的圓管、火炬放電室及氣體供應室所組成，氣體由切線孔洞進入火炬放電室後，即造成旋轉流動。圓管和空心電極的尺寸及結構必須適當配合，電漿火炬才能達到最佳工作條件 [25]。

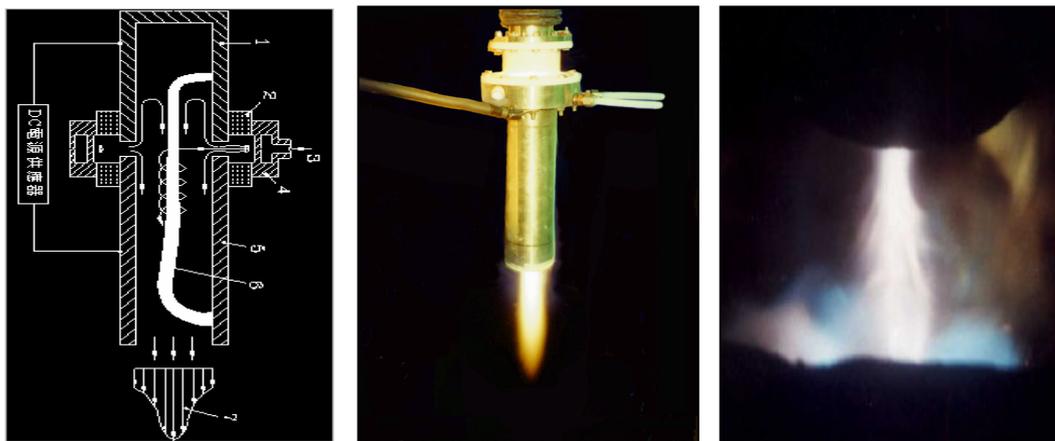


圖 14 直流電漿火炬結構(左圖)，非傳輸型模式(中圖)及傳輸型模式(右圖)

直流電漿火炬的設計要點在於如何 (1)提高電能轉換效率，以有效地加熱工作氣體。(2)增長火炬電極的使用壽命，以增長維修週期。要達到這兩個要求，火炬電極之形狀通常採用管狀形式並且提高火炬的工作電壓，配合旋轉氣流的運作，可防止弧根固定在電極的同一定點上而嚴重侵蝕電極。要使火炬穩定旋轉，旋轉氣流的強度必須符合下列條件：

$$D_C/D_F \times \text{氣體切線速度} \geq \text{聲速} \dots \dots \dots (1)$$

其中, D_C 為漩流產生器的內徑, D_F 為火炬前電(或噴嘴電極)的內徑。在符合(1)式的條件下, D_C/D_F 的比值通常在 1~8 之間, 而 4 則為最佳數值。當 D_C/D_F 的比值小於 1 時, 則不能產生足夠的漩流強度；而當 $D_C/D_F > 8$ 時, 則氣流和電極內壁產生很大的阻力, 損

失大部份能量，亦無法產生足夠強度的漩流。在氧氣環境工作下，電極材料的選擇是很重要的，通常選用銅或銅、鋁、銀、鎢、鉬等之合金。此類材料氧化後會形成一層保護膜防止內部材料繼續氧化，因此，可延長電極在氧化氣氛下的使用壽命，此外，有效地降低電極溫度亦是防止快速氧化的有效方法。結構設計上，後電極的長度 L_R 和內直徑 D_R 的比值應在 5~30 之間，而前電極的長度 L_F 和內直徑 D_F 的比值應在 5~40 之間，而且 D_R/D_F 的比值應在 0.5~2.5 之間，此外，放電電流 I 和前電極內徑 D_F 的比值應在 50~2000 安培/英寸之間。當 $L_R/D_R < 5$ 時，弧根會打在後電極的底部成固定點，而將電極熔穿破洞，但 $L_R/D_R > 30$ 時，則放電情形呈不穩定狀態。當 $L_F/D_F < 5$ 時，放電氣體無法在出口均勻混合，但當 $L_F/D_F > 40$ 時，則氣體的能量會被電極大量吸收，減低火炬的電能轉換效

率。當 $D_R/D_F < 0.5$ 時，後電極的管口會被嚴重侵蝕，但當 $D_R/D_F > 2.5$ 時，放電會呈不穩定狀態。除此之外，可在前後電極加軸向磁場[26]使電漿旋轉方向和漩流方向相同，一來可以增高工作電壓提高效率，二來可以使弧根在電極內壁快速旋轉，減少電極單位面積所承受的熱量，降低電極溫度，增長電極壽命。

直流電漿火炬可產生溫度約 5,000~20,000°C、能量密度約 10~100 MJ/kg 及功率約 10~8,000 kW 的電漿，可做為奈米粉未生產、化合物合成、金屬冶煉、全氟化有機廢氣(PFC)及有害事業廢棄物處理等工業應用的潔淨熱源[27-29]。核能研究所已開發完成直流電漿火炬技術，火炬功率可達 3,000 kW，並實際用於處理低放射性廢棄物及焚化爐灰渣，達到減容、固化、無害化或資源化等多重效果。

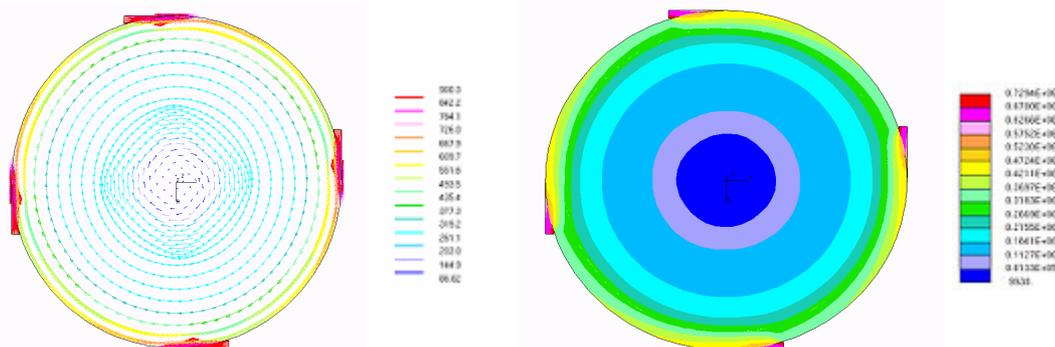


圖 15、漩流產生器內部速度分佈(左圖)及壓力分佈(右圖)

2-5 電漿浸沒離子佈植技術(蔡文發，核能研究所)

離子佈植(ion implantation)係以適當的離子能量與劑量佈植固體材料(母材或靶材)內，以便對母材先天不足的電性、機械、物理與化學等特性進行改質，廣泛應用於半導體產業。然而因其受到單方向(line-of-sight)離子佈植限制，費時的射束掃描及昂貴的靶台基座，阻礙其在其它產業的發展。直到 1987 年美國威斯康辛核工系 J.R. Conrad 教授[30]提出一種三維離子佈植技術，稱為電漿浸沒離子佈植技術(Plasma Immersion Ion Implantation, PIII)，克服傳統離子束單方向佈植的限制，並於 1988 年獲得專利，使得

離子佈植技術在非半導體產業應用有了突破性發展。PIII 設備非常簡單，僅將傳統離子佈植機的離子源變成一個大腔體的電漿源，目標靶材浸泡於電漿內，外加一負脈衝電壓於靶材上，電漿離子便從四面八方垂直佈植工件，完全免除離子佈植機的離子束引出、加速、偏向、掃描、以及靶台基座等昂貴配備，是一種簡單、便宜、高效率、經濟效率高的三維離子佈植技術，特別適合體積大且形狀複雜的工件[31]，如圖 16 所示。

PIII 工作原理[32]: 對一浸泡於電漿密度 n 的平面靶材而言，當脈衝負壓 V 起動瞬間(約幾奈秒)，靶材

周圍的電子立刻感受到負壓作用而被往外推開，但因離子慣性不動因而形成一層電子貧乏區的離子陣列鞘層(matrix sheath) $S_0=(2\epsilon_0 V/ne)^{1/2}$ 於靶面附近[30]，其中 ϵ_0 為介電常數。等到離子感受負壓作用時(約幾微秒)，此時鞘層內的離子便藉由鞘層位降的加速而垂直佈植靶內。為了維持鞘層內離子數平衡要求，迫使鞘層厚度 $S(t)=S_0[(2/3)\omega_{pi}t + 1]^{1/3}$ 隨著離子佈植不斷往外擴張，彌補鞘層內離子數減少，此時離子流強度可以 Child-Langmuir 方程式 $J_i(t)=(4\epsilon_0/9)(2e/M)^{1/2}[V/(S(t))^2]$ 來表示[33]，其中 M 為離子質量，而離子電漿頻率 $\omega_{pi}=(ne^2/\epsilon_0 M)^{1/2}$ 。隨著鞘層擴大，鞘層與電漿間交錯的界面範圍伴隨擴大。當由電漿漂移(drift)進入鞘層界面的離子數與佈植靶材的離子數相等時，鞘層厚度趨於穩定，達到所謂的穩定鞘層(stationary sheath)[34]。因此，每一脈衝的佈植離子劑量 $d=\int_0^{t_p} J_i(t)dt$ ，其中 t_p 為脈衝寬度；而總佈植劑量為 $D=d \cdot f \cdot t$ ，其中 f 為脈衝頻率， t 為總佈植時間。佈植離子在靶內的碰撞與遷移

過程中，新合金相生成、高溫熱激發擴散等機制與效應，可使靶材表層有效改質。

PIII 應用領域相當廣泛[32]，包括半導體、精密模具刀具、機械組件、汽機車、航太與生醫等產業。如在精密模具刀具[35]及人工關節[36]耐磨延壽等應用上，主要利用高能量離子直接嵌入工件表面，不會影響其精密度，且因無明顯界面層，不會發生鍍膜改質層剝落等問題。在半導體的應用潛力，為 PIII 能夠對整塊矽晶片同時佈植的優勢，高效率生產 SOI(silicon on insulator)矽晶片[32]，有效降低成本與提高競爭力，如圖 17 所示。至於 PIII 在機械、汽機車與航太等組件[37]的改質應用，則是利用 PIII 具有離子佈植與被覆雙功能的複合製程技術[38]，例如先於基材產生一層硬度高的氮化層，做為後續 PIII 合成硬膜(例如 DLC)的支撐結構，加強提昇耐磨效果。典型例子如應用於商用與軍用汽機車引擎零組件(例如齒輪、凸輪軸、軸承等)耐磨處理，提高使用壽命，如圖 18 所示。

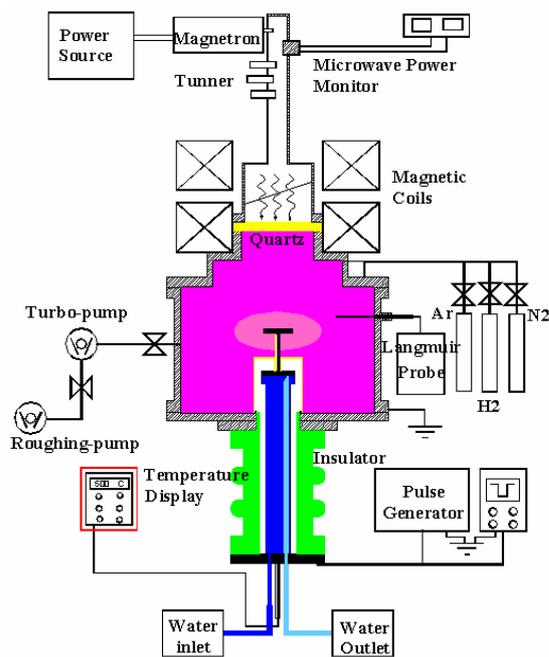


圖 16 PIII 設備示意圖

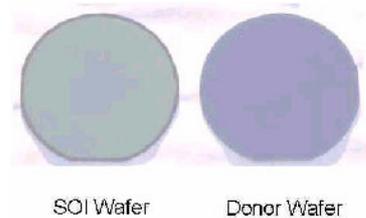


圖 17 香港城市大學利用 PIII 製造 SOI 矽晶片[10]

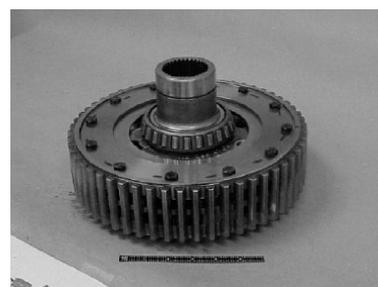


圖 18 美國西南研究所將 PIII 技術應用大於戰車軸承元件耐磨處理[39]

本文介紹國內有關電漿源的研究。任何一種電漿源的研發必定包含了物理、材料、電機、機械的知識

與技術，故需要整合多方面的專長與資源才能突破。另外電漿源的研發必須與應用研究相結合，如此才能

研發出適合的電漿特性與系統。隨著電漿技術應用的擴大，相信更多新型電漿源將出現。

參考文獻

1. M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons, (1994).
2. K.C. Leou, S. C. Tsai, C.H. Chang, W. Y. Chiang, T. L. Lin and C. H. Tsai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**(1999) pp. 4268.
3. H. W. Wei, K. C. Leou, M. T. Wei, Y. Y. Lin, and C. H. Tsai, *J. Appl. Phys.* **98**, 044313 (2005).
4. Y.Y. Lin, H.W. Wei, K.C. Leou, C. H. Tong, M.T. Wei, C. Lin and C. H. Tsai, *J. Vac. Sci. Techno. B*, **24**, 97-103 (2006)
5. C. H. Weng, K. C. Leou, H. W. Wei, Z. Y. Juang, M. T. Wei, C. H. Tung, and C. H. Tsai, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 4732 (2004).
6. C. H. Weng, W. Y. Lee, Z. Y. Juang, K. C. Leou, and C. H. Tsai, *Nanotechnology* **17**, 1 (2006).
7. T. J. Wu and C. S. Kou, "A Large-Area Plasma Source Excited by a Tunable Surface Wave Cavity", *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 2331 (1999).
8. C. S. Kou, and T. J. Wu, "A Large Area Microwave Plasmas Apparatus", No.110719, R. O. C. C. S. Kou, and T. J. Wu, "Large Area Microwave Plasmas Generator", No.6246175, USA
9. T. J. Wu, W. J. Guan, C. M. Tsai, W. Y. Yeh, and C. S. Kou " Experimental Study of the Plasma Resonance in a Planar Surface Wave Plasma", *Phys. Plasmas*, **8**,3195, 2001
10. T. J. Wu and C. S. Kou, "Analysis of the Propagation of the Wave in the Plasma Guided by a Periodical Vane-Type Structure", *Phys. Plasmas*, **8**,3195, 2005
11. W. Y. Yeh, J. Hwang, T. J. Wu, W. J. Guan, C. S. Kou and H. Chang, "Deposition of diamond films at low pressure in a planar large-area microwave surface wave plasma source", *J. Vac. Sci. Technol. A* **19**(6), 2835, 2001
12. W. Y. Yeh, J. Hwang, A. P. Lee, C. S. Kou and H. Chang, "Composite diamond-like carbon and silicon carbide tips grown on oblique-cut Si(111) substrates", *Appl. Phys. Lett.* **79**,3609, 2001
13. C. J. Huang, Y. K. Chih, J. Hwang, A. P. Lee and C. S. Kou, "Field emission from amorphous-carbon nanotips on copper", *J. Appl. Phys.*, **94**,6796(2003)
14. Y.K. Chih, C.H. Chen, J. Hwang, A.P. Lee, and C. S. Kou, " formation of nano-scale tubular structure of single crystal diamond", *Diamond & Related Materials*, **13**, 1614, 2004
15. C.H. Wei, C.H. Chen C.-M. Yeh, M.Y. Chen, J. Hwang, A.P. Lee, and C.S. Kou " Field emission from hydrogenated amorphous carbon nanotips grown on Cu/Ti/Si(100) " *J. Electrochemical Soc.* **152**,C366-C369, 2005
16. C. M. Yeh, C. H. Chen, J. Y. Gan, C. S. Kou and J. Hwang, " Enhancement of the c-axis texture aluminum nitride by an inductively coupled plasma reactive sputtering process", *Thin Solid Film*, **483**, 6, 2005
17. Y. K. Chih, J. Hwang, L. C. Yu, L. J. Chou, A. P. Lee, and C. S. Kou, "The growth of nano-scale diamond tips on diamond/Si" *J. Crystal Growth*, **283**, 367, 2005
18. K. Y. Wu, P. C. Liu, C. Y. Lee, C. H. Chen, H. K. Wei, C. M. Yeh, C. W. Chen, C. S. Kou, C. D. Lee, and J. Hwang, "Liquid Crystal Alignment on a-C:H Films by Nitrogen Plasma Beam Scanning" *J. Appl. Phys.*, **98**, 083518, 2005
19. Jennchang Hwang, C. J. Huang, C. M. Yeh, M. Y. Chen, C. S. Kou."Field emission from a carbon nano-fiber/carbon nano-cone composite structure fabricated by a two-step growth process" accepted

- by J. Electrochemical Society 2005.
20. S. Kanazawa etc., J. Phys. D: Appl. Phys., vol.21, pp. 836, 1988.
 21. T. Yokoyama etc., J. Phys. D: Appl. Phys., vol.23, pp. 1125, 1990.
 22. X.J. Dai etc. Textile Institute 81st World Conference, Melbourne, Australia, April 2001.
 23. M.G. McCord etc., Textile Res. J.72(6), 491-498(2002)
 24. Yuri P. Raizer, "Gas Discharge Physics," Springer-Verlag (1991).
 25. Min Hur and Sang Hee Hong, "Comparative analysis of turbulent effects on thermal plasma characteristics inside the plasma torches with rod- and well-type cathodes," J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) 1946-1954.
 26. Mingdong Li etc., "Study on Arc Movement in the Hollow Electrode Plasma Generators with Impressed Double Magnetic Fields," Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 24, No. 1 (2004) 73-84.
 27. C. C. Tzeng etc., "Treatment of radioactive wastes by plasma incineration and vitrification for final disposal," Journal of Hazardous Materials 58(1998) 207-220.
 28. Masao Ushio, "Plasma applications in the steel industry in Japan," Pure & Appl. Chem., Vol. 64, No. 5 (1992) 677-683.
 29. Seung-Min Oh and Dong-Wha Park, "Production of ultrafine titanium dioxide by DC plasma jet," Thin Solid Films 386 (2001) 233-238.
 30. J.R. Conrad, J.L. Radtke, R.A. Dodd, F.J. Worzala, N.C. Tran, J. Appl. Phys. 62 (1987) 4591.
 31. A. Anders, Surf. Coat. Technol. 156 (2002) 3.
 32. A. Anders, "Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition", John Wiley & Sons, New York, 2000.
 33. S. Qin, Z. Jin, and C. Chan, J. Appl. Phys. 78 (1995) 55.
 34. R. Gunzel, J. Brutscher, Surf. Coat. Technol. 85 (1996) 98-104.
 35. S. Rossi, Y. Massiani, E. Bertassi, F. Torregrosa, L. Fedrizzi, Thin Solid Films, 416 (2002) 160.
 36. J.I. Onate, M. Comin, I. Braceras, A. Garcia, J.L. Viviente, M. Brizuela, N. Garagorri, J.L. Peris, J.I. Alava, Surf. Coat. Technol. 142-144 (2001) 1056.
 37. H. Klingenberg, J. Arps, R. Wei, J. Demaree, J. Hirvonen, Surf. Coat. Technol. 158-159 (2002) 164.
 38. E.I. Meletis, A. Erdemir, G.R. Fenske, Surf. Coat. Technol. 73 (1995)
 39. <http://www.cityu.edu.hk/ap/plasma/default.htm>.
-
-
- #### 作者簡介
- 柳克強
副教授 清華大學 工程與系統科學系
kcleou@ess.nthu.edu.tw
- 翁政輝
博士生 清華大學 工程與系統科學系
chweng@ess.nthu.edu.tw
- 魏鴻文
博士生 清華大學 工程與系統科學系
d907121@oz.nthu.edu.tw
- 張家豪
博士生 清華大學 工程與系統科學系
d897109@oz.nthu.edu.tw
- 李安平，寇崇善
清華大學物理系
- 吳敏文，曾錦清，蔡文發，鄭國川
原子能委員會核能研究所