

13. 智慧型監控之微波電漿束燒結系統

蘇春熿 教授、黃加閔、莊元魁、李岱倫
臺北科技大學 製造科技研究所
機電科技、整合研究所

摘要

微波電漿束處理的範圍非常廣泛，且未來應用之市場正迅速增長中。由於微波電漿束法為控制條件較多的製程技術，在使用過程中，如何讓系統快速達到穩定狀態並提高再現性為影響製程成敗之重要參考指標。

本研究主要致力於建立微波電漿束燒結系統 (Microwave Plasma Jet Sintering System, MPJSS) 系統之智慧型遠端控制模組，目的為經由MPJSS系統中之微波電磁場調整器[E-H tuner]之智慧型參數調控並配合HFSS (High Frequency Structure Simulator) 電磁場分析軟體模擬計算，期能提高控制結果之精確度與製程之再現性，使燒結後之材料能具有特定之微結構而獲得特定之性能。

關鍵字：微波電漿束系統、智慧型控制模組

一、前言

智慧型控制的研究與應用，為目前國內產業升級及自動化推展之重要研究項目。如何針對一項複雜的技術提出一套有效的控制方法，並進行各部份之間的整合與測試，為建立智慧型控制重要的關鍵技術。目前智慧型控制理論主要以模糊控制、類神經網路、灰色理論、基因演算法...等應用最廣，受控系統透過智慧型控制方法之最佳化後，能夠大幅提高效率與穩定性，特別是複雜之機構運動如現今最熱門之機器人，最常運用此類技術。因此處於一個10倍速的科技發展時代中，智慧型之整合控制為各產業必須導入運用之重點。

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，舉凡不同材料薄膜成長，以及電路的蝕刻皆普遍由電漿技術達成。另外在半導體封裝及紡織業方面，皆使用電漿作為清潔及改變材料表面以達到特殊功能及效果。

微波加熱具有快速、均質與選擇性之特點[1-2]，已被廣泛使用於各種材料之合成、加工與表面成膜應用，結合奈米材料在微波吸收與物性改變，微波材料處理應用有新之發展，特殊設計微波吸收材料與微波場分佈，可達成特定區域材料加工效果，如粉體表面改質、高緻密性成膜、異質材料接合等等用途[3-5]。化學反應過程也可應用微波能量之催化效果，使反應物在微波作用下有更高反應速率，產物於微波作用下有更好結晶性。微波高穿透性與特定材料作用性，使原不易製作材料能有良好結晶與分散性的奈米粉體粒子、厚度數微米高緻密性的功能膜層、耐火材料間的無縫接合、有機與金屬表面的超硬度處理等等，均可經由材料合成設計與微波場作用來獲得，微波能量的作用提供奈米材料與結構新的

製作方法，進一步擴充奈米科技的新產品應用。

真空腔體之氣氛比、壓力之調整值會影響電漿組成、密度與分佈，進行影響結構品質，所以電漿監控成為重要之工具。有藉於上述智慧型監控與微波電漿束之二者優點結合，本研究利用智慧型控制技術與微奈米材料製程結合透過智慧型控制之優點有效使製程穩定，大幅提高材料品質與結構。主要針對具有極多優點之氧化鋅 (ZnO) 以及發展多年之遠端監控法則，以遠端監控法及配合HFSS模擬分析結果嵌入微波電漿束燒結系統 (Microwave Plasma Jet Sintering System, MPJSS) 系統中，利用MPJSS系統燒結成長出高結構性能之元件，以便將來元件技術上之應用。

國內目前對於電漿研究的發展，鮮少有能和鍍膜系統搭配的，目前清大林滄浪、柳克強、徐重仁等人[7]，已成功發展出搭配電感式電漿蝕刻機的電漿檢測技術，此套電漿量測技術主要是利用CCD Camera擷取電漿影像來進行分析，且對於單一氣體的電漿狀態也能很有效的分析與改善其解離率，但是對於鍍膜系統較複雜的電漿環境（通常是兩種以上的反應氣體電漿），就尚未觸及到。而鍍膜技術對於目前的高科技產業來說，有其重要的地位，因此朝鍍膜系統與電漿量測技術整合的目標發展是有其必要性的。

C. B. Brooks[8]等人直接用CCD camera加band pass filter(允許通過波長為 $670 \pm 40\text{nm}$)與 neutral density filter，在ECR系統上直接快速的獲得電漿影像，此ECR系統使用2.45 GHz，如圖一，此二維剖面影像可迅速直接判斷電漿在腔體中加熱均勻分佈的情形。由實驗圖形看出，此系統在高氣壓時電漿影像不均勻，可知此ECR系統在高氣壓時不穩定。

為了得到電漿光譜的空間分佈，F. Debal[9-10]等人利用電漿放射光譜加上tomography imaging方法來量測RF-power magnetron電漿源。圖二為實驗示意圖，他們使用一組(十個)光纖頭(並排使用)、單光儀(monochromator)與CCD組成觀測系統，並利用可準直光源的準直器(collimator)來改善實驗的準確性，藉由轉動十個光纖頭組成的量測系統快速量測整個電漿源。將資料利用影像重建程式處理，獲得電漿的放射剖面圖，圖三為Ar工作氣壓324 mTorr，輸入功率56 W，量測Ar I (763.5 nm)強度變化，成功的發展一套電漿影像重建技術。

二、實驗程序

本研究架設完成E-H Tuner遠端監控系統，主要透過調整E-H Tuner來改變微波之反射功率，X、Y軸為其微波幅的大小，而Z軸則調整其駐波位置，進而影響工作腔體內電漿反射功率之大小，其微波電漿束燒結系統圖如圖四所示。本研究為使實驗結果更為精確之結果

及提高實驗正確性，故使用三維電場模擬軟體計算，其分析軟體使用Ansoft公司之HFSS (High Frequency Structure Simulator) 場分析軟體，HFSS業界公認的三維電磁場設計和分析的電子設計工業標準，以求其微波電漿束燒結系統之電場分佈。

2.1 微波電場模擬分析

波導腔體主要由WR340矩形波導管所構成，其高頻波導與共振(諧振)相關電磁行為，橫電波又稱TE波、H波，將一段長度L的矩形波導，兩端以金屬片封閉，就構成了矩形腔體。Ansoft HFSS模擬分析獲得E-H Tuner最佳位置後，建立三維MPJSS系統圖包含了真空、石英管、空氣、金屬導體等各種介質複雜的電磁和幾何結構特性適合以電腦建立模型模擬加以求解，並給予2.45GHz之微波頻率且改變XYZ軸調整器位置情況下記錄其電場隨變化情況之分佈狀況。設定X軸範圍由220~400 mm、Y軸範圍由270~445 mm及Z軸範圍由0~218 mm，模擬每5 mm改變量之電場變化，圖五為三維腔體建模型圖，圖六為三維腔體無調控下模擬分析。

於已建立之E-H Tuner系統調控X與Y軸進行系統測試，氣體使用為純Ar於燒結氧化鋅之實驗中，發射功率調整為25%為750W，然後以X、Y軸E-H Tuner，每10 mm為一個分隔等分，所得反射功率值數據之分佈圖如圖七所示，因若微波在腔體中傳遞無法產生共振，將造成反射功率過高而產生不良之熱效應，影響MPJSS系統之壽命；因此E-H Tuner 位置之選擇為製程中重要之參數。其模擬分析結果顯示當E-H Tuner實驗之X軸為40 mm Y軸60 mm、X軸為130 mm Y軸60 mm、X軸為40 mm Y軸150 mm、X軸為120 mm Y軸150 mm其四點位置有反射功率值最低。以HFSS模擬其E-H Tuner模擬分析其實驗結果之X軸Y軸E電場值互相印證，於圖八(a)顯示當X軸為40mm Y軸60 mm其E電場值為 $3.948e^3$ (V/m)。於圖八(b)顯示當X軸為40 mm Y軸60 mm其E電場值為 $1.1534e^3$ (V/m)。於圖八(c)顯示當X軸為130 mm Y軸150 mm其E電場值為 $1.1534e^5$ (V/m)。於圖八(d)顯示當X軸為120 mm Y軸150 mm其E電場值為 $2.2031e^5$ (V/m)，其餘電場雖較高但電場未聚焦於試片處。

2.2 遠端監控系統

本控制系統主要是以新世代智慧型機光電材整合設備之實驗工作平臺，其系統使用之微波電漿束燒結系統(Microwave Plasma Jet Sintering System, MPJSS)為研究對象，並架設其自動化所需之設備。以設備感測器所提供之訊號判斷參數是否正確，並透過單晶片處理輸出控制訊號至實驗工作平台控制器以達成控制之目的。本系統可提供三種參數設定模式，原有工作平台之手動操控模式，近端手動遙控操作模式及遠端網路監控模式，可提高系統操作方便性、精確性、重現性、成功率及低反射功率，增加日後實驗的多元性。並藉由此控制技術來對產業界電漿技術，提供一套有效、完善的電漿控制方法，將可提供學術界及產業界應用。

本文之遠端監控系統系統以主要電漿影像擷取、微波產生器的控制及反射功率擷取、壓力控制系統、溫度控制系統、氣體流量控制系統、E-H tuner手動遙控控制及遠端網路監控為架構。遠端監控系統整體的方塊圖，如圖九所示，淺綠色部分為所附加上去的遠端監控系統

部分，依照箭頭顏色順序(紅、粉紅、棕、橘、紫)，將系統一一架設上去，首先是擷取電漿影像，以及周邊的儀器設定影像，並將Pic_Server連結上網，接著讀取壓力流量資訊，以及反射功率的讀取，接著控制發射功率以及EH-tuner。而整個系統是由Pic_Server核心建構起來的。

本監控系統採用Pic_Server為遠端監控模組單晶片、Microchip PIC16F877為近端手動遙控模組單晶片(Pic_Protol)，因為系統需求需要做多重的模式切換，如遠端監控模式、近端手動遙控模式、遠端網路遙控切換，以及遠近端單晶片重置與程式寫入模式，所以需要另外增設遠近端切換介面電路，利用DC 5V微型繼電器作為模式切換用，所以製作遠近端切換電路板遠端監控模組Pic_Server 是一套設計八位元單晶，僅需16 kB程式記憶體的韌體乙太網路驅動程式。PIC18F系列中40腳以上的單晶片就可以驅動乙太網路控制晶片 RTL8019進而與乙太網路(Ethernet)或網際網路(Internet, 或稱互連網)上遠距的電腦通訊，實現伺服器(server)與網路用戶(client)的功能。

Microchip公司PIC16F877單晶片微控制器為核心的單板控制器，F877共有33個I/O點，內建8通道10位元AD及2通道10位元高速PWM輸出或DA，板上還有USART、MSSP等序列式網路通訊介面以提供記憶體擴充、高性能AD/DA擴充、區域網路建構或與PC連線的RS232介面等功能，也可加裝16x2的LCD顯示器或3x4鍵盤等人機介面，此外，板上還有擴充電路開發區以及8通道的切換式功率放大器可用來驅動各種交直流馬達、繼電器、電磁閥或電熱器等總功率在160W以下的負載。

2.3 E-H tuner控制系統

本研究預計使用電動缸取代採用外掛式導螺桿利用步進馬達驅動，如使用步進馬達驅動則整體重量預估約為5 kg即為過重將可能造成E-H tuner支撐力不足，而整個體積也提高許多。E-H tuner控制系統如圖十所示，將讀取微波功率監控系統之反射功率訊號，轉換成驅動X、Y、Z軸上的驅動器控制訊號，並且讀取各軸原點的訊號，作為各軸歸零時使用。控制策略為反射功率10%以下為安全範圍。驅動X軸電動缸前進，至接收反射功率訊號為最小處停止，即為反射功率前後相減，直至相減等於時0停止或小於0時往回。驅動Y軸電動缸前進，至接收反射功率訊號為最小處停止，即為反射功率前後相減，直至相減等於時0停止或小於0時往回。

2.4 電漿製程監測

不同製程方法與前驅物成分濃度，其電漿放射光譜皆不同，各可視為製程指紋(Fingerprint)，作為製程監控之依據[10]。

本節以放射光譜(Optical Emission Spectroscopy; OES)之原理和電漿製程監測之應用。OES技術為一種非侵入式量測，適合電漿之診斷。藉由收光器將電漿內受激原子、離子、分子之放光訊號聚焦到光纖頭，然後將光由光纖導入光譜儀中，由光譜儀分析電漿之譜線與強度，一般光譜範圍(200~850nm)，藉由資料庫之比對，可確認譜線所對應化學成份(Species)，除可量測原子譜線(e.g. Ar、H α 、H β)，還可觀察到雙原子分子(e.g. N $_2$ 、自由基CH、CN)之譜線，由於自由

基大多在化學反應中以反應中間物(Intermediate)形式存在，對化學反應扮演重要角色，所以診斷(Diagnosis)電漿放光光譜可提供訊息以瞭解製程之中間反應。此外，不同製程方法與前驅物(Precursor)成份濃度，其電漿光譜皆不同，故可視為是製程指紋(Fingerprint)，作為製程監控之依據。其OES電漿製成監測系統圖如圖十一所示。

三、結果與討論

如前所述，本文提出一智慧型監控之微波電漿束燒結系統，經由遠端控制及HFSS模擬分析法獲得微波燒結之結構。

3.1 微波電漿束燒結遠端監控系統

在奈米級時代來臨的現在，各產業無不朝向以奈米技術為目標的方面來發展，透過微小化的處理來應用在電子原件及複合材料方面，而找出替代元素來突破微小化的困境，將是一關鍵技術。其中以奈米碳管之開發為例，而製造奈米碳管使用微波電漿束化學氣相沈積法為其主流，由於微波電漿束化學氣相沈積為一較新穎之技術，目前研究設備中缺乏精度較高的控制基準，如何將製程及電鍍物的良率提高便成為重要的一環，而要達成有較好的良率，製程上的控制及環境便佔有極大因素，因此研發工作具有其重要性。

現有之微波電漿束化學氣相沈積系統採用人工手動方式進行實驗操作，為提升實驗之精確度及鑑於節省人力及避免造成時間的浪費，並配合Pic_Server及搭配光機電監控機構設備和軟硬體架構來進行遠端控制微波電漿束化學氣相沈積系統之電漿反射功率大小以及即時電漿影像傳輸，來達到更好的實驗結果，增加微波電漿束化學氣相沈積系統之快速穩定及重現性，進而提供製程中參數變化之選擇設定。其遠端監控系統實體圖如圖十二所示。E-H Tuner控制系統實體圖如圖十三所示。

3.2 OES光譜分析儀監測實驗結果

光譜儀擷取率高則需儲存與處理之資料量大，若慢則無法監測電漿瞬間之變化。故需考慮曝光時間效應，若電漿放光之訊號弱，就必須採用較常曝光時間（獲稱積分時間；Integration Time），否則小訊號會因經過類比數位轉換後，引進新的Truncation Error，而無法辨識，一旦用較長曝光時間則每秒擷取光譜張數會漸少，則對動態變化快之電漿製程無法及時監測瞬間之變化，所以使用OES於特定電漿製程之即時監測時，必須依據其電漿原特性，選擇最佳擷取率與曝光時間。在將類比轉數位後之資料藉由高速資料傳遞傳送至電腦進行資料儲存與分析處理，即可作即時監測。

本實驗即利用微波電漿束系統解離氣體分子，藉由收光器將電漿光譜聚焦到光纖頭，然後將光導入光譜儀中，在利用光譜儀分析光譜。圖十四所示N₂氣體經微波解離產生電漿之OES結果圖。

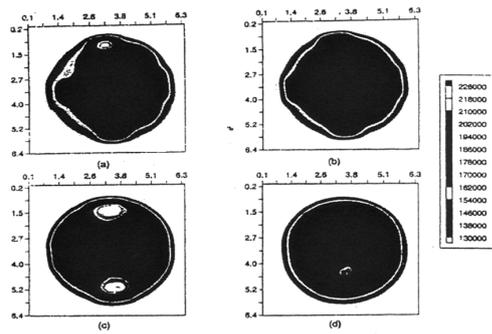
四、結論

電漿是人類近代科學史上重大的發現之一，也因為電漿的發現，造就了許多新興科技的蓬勃發展。電漿技術的應用非常廣泛，其中又以鍍膜科技的應用最為顯著，近幾年來已有許多真空鍍膜技術陸續的被發展出來，並廣泛的被應用於諸如半導體、機械、生醫科技等產業上，而電漿正是這些鍍膜技術的核心所在。此外，本計畫之著眼點在於製程參數控制、機電科技、自動化感測科技之技術，希望能開發出一套MPJSS電漿遠端控制系統，進而配合人機介面電系統，發展一套線上控制(on line control)系統，突破以往單純材料科技之研發，預料系統的開發將有利於往後更深入的研究。

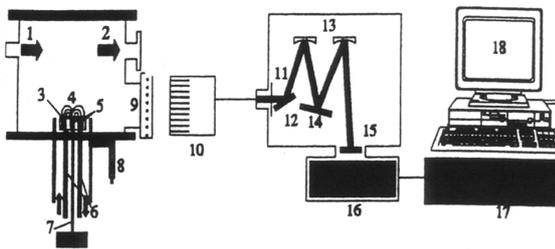
本研究主要以HFSS模擬分析微波電漿束燒結系統之電場分佈，於2.45GHz微波作用下藉由調整E-H Tuner之位置參數條件下來獲得電場分佈狀況。由模擬分析結果顯示，本微波導波天線可於天線末端位置有電場集中效果如圖十五所示，則可運用此結果藉由微波導波天線將電漿導引至實驗所需位置，即可減少使用手動調整E-H Tuner時間冗長之缺點及批次量產之目標。本系統未來將建立溫度監測控溫及氣氛控制系統，使之有效地控制微波燒結製程及以便能進行需以氣氛控制之材料。

參考文獻

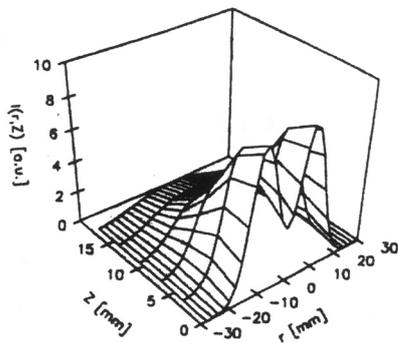
- [1] W.H.Sutton, American Ceramic Society Bulletin, 68 (2), pp. 376-386.,1989.
- [2] W.H.Sutton, Microwave Processing of Materials III, Mater. Res. Soc. Symp.Proc., pp. 269, 3~20,1992.
- [3] G.McMahon, Microwave Processing of Materials II, Mater. Res. Soc. Symp.Proc., pp. 189, 237~42, 1990.
- [4] R.R.Menezes, Journal of Materials Processing Technology 190 (1-3), pp. 223-229, 2007.
- [5] C. Zhang, Journal of the European Ceramic Society 28 (13), pp. 2529-2538, 2008.
- [6] 徐重仁, “電感式電漿源之光譜量測與分析”, 國立清華大學工程與系統科學研究所碩士論文, 民國88年7月
- [7] C. B. Brooks and M. L. Brake, IEEE Transactions on Plasma Sci.Vol24 NO. 1 (1996)pp.8
- [8] F. Debal, M. Wautelet, Applied Spectroscopy, Vol. 51, Number 9 pp.1340
- [9] J. P. Dauchot and M. Hecq Meas. Sci. Tech. 8 (1997) pp.618
- [10] 廖駿偉, OES技術於電漿製程監測之應用,工業材料雜誌 213期 P171-P176



圖一 功率125W，不同腔體壓力下，Ar II(670.0 ± 10 nm) 的電漿剖面影像，(a)22 mtorr (b)16 mtorr (c)5.9 mtorr (d)3.7 mtorr[2]



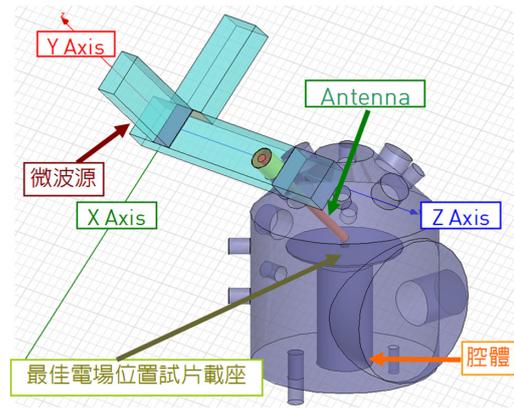
圖二 實驗裝置圖，其中(4)為discharge zone (7)rf power supply (10)collimator + optical fibres (14)diffraction grating (15)CCD[3]



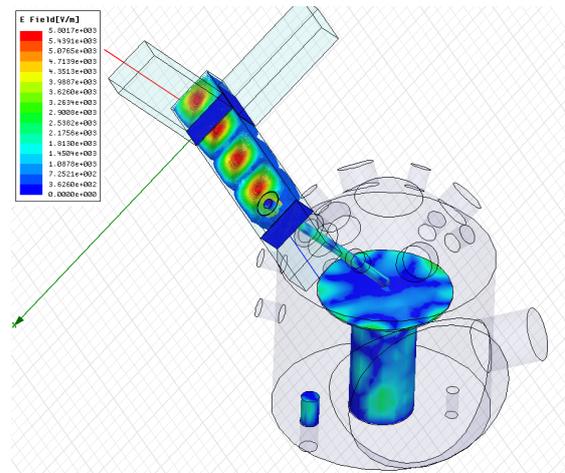
圖三 X方向標示為半徑，Y方向為距底部位置，Z方向為相對強度[4]



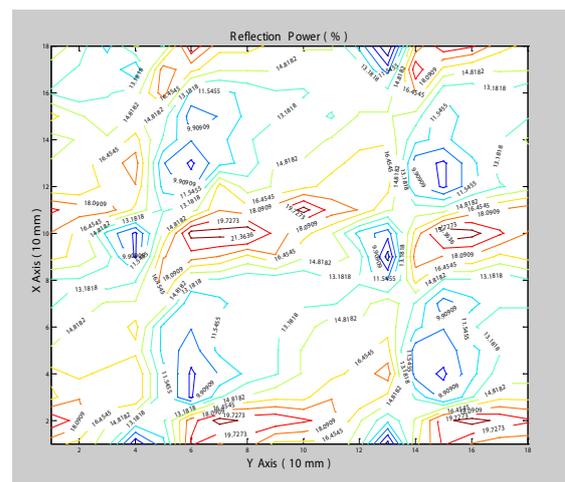
圖四 微波電漿束燒結系統



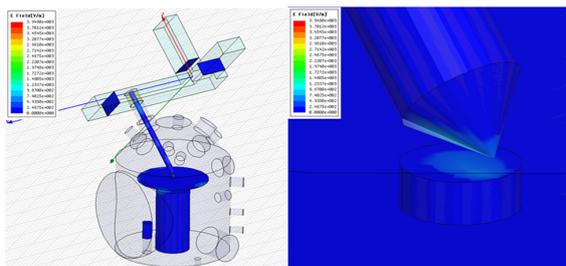
圖五 HFSS三維腔體建模型圖



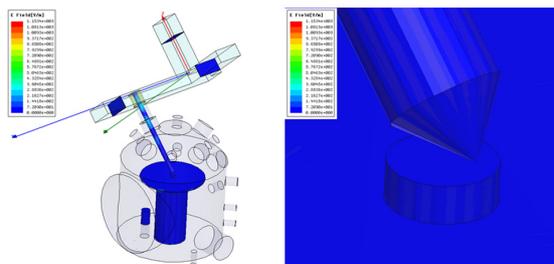
圖六 HFSS模擬分析之E電場圖



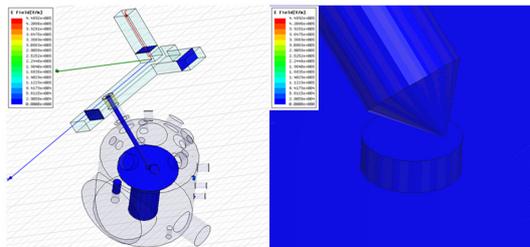
圖七 調控E-H Tuner之X與Y軸造成之微波反射量



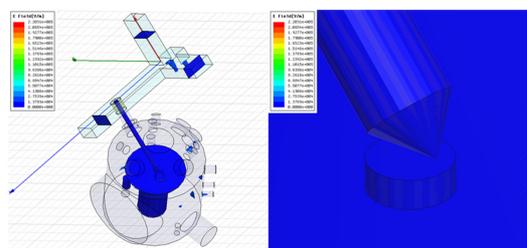
(a) X軸40mm Y軸60mm之電場值為 $3.948e^3$ (V/m)



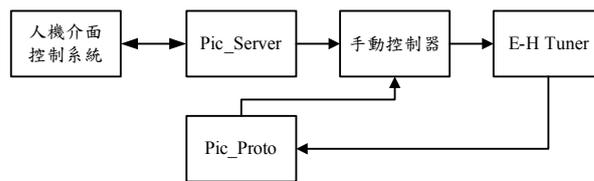
(b) X軸130mm Y軸60mm之電場值為 $1.1534e^3$ (V/m)



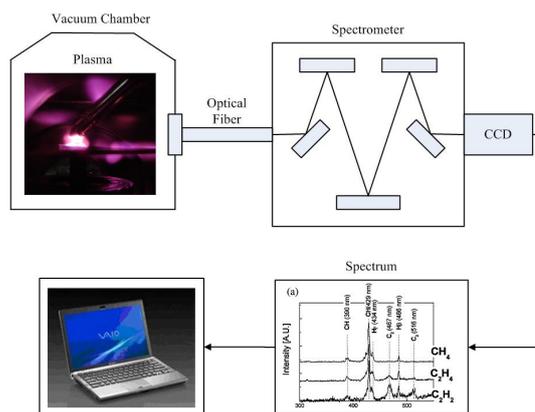
(c) X軸130mm Y軸150mm之電場值為 $1.1534e^5$ (V/m)



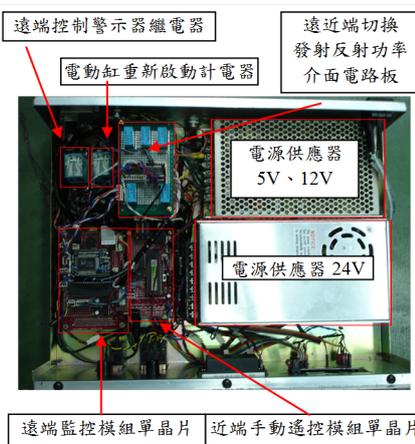
(d) X軸120mm Y軸150mm之電場值為 $2.2031e^5$ (V/m)
圖八 HFSS模擬分析



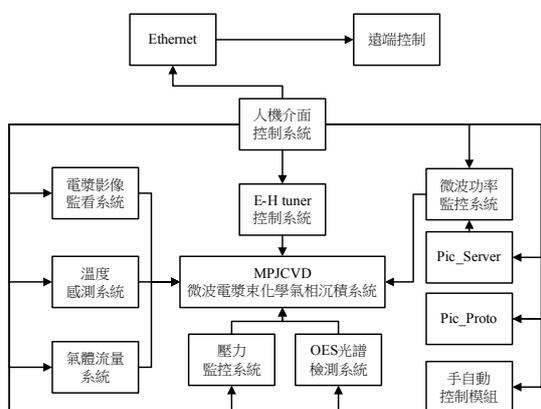
圖十 OES電漿監測系統圖



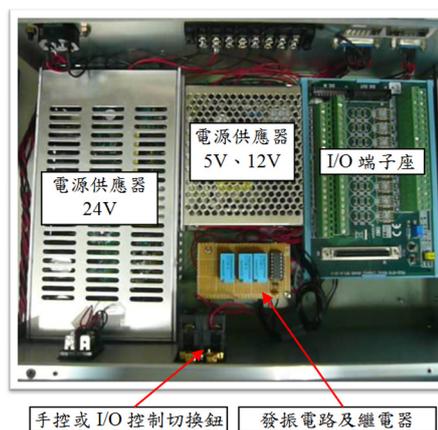
圖十一 OES電漿監測系統圖



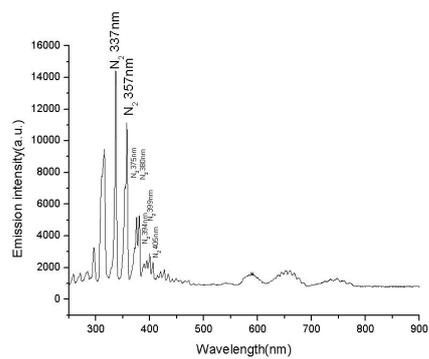
圖十二 遠端監控系統實體圖



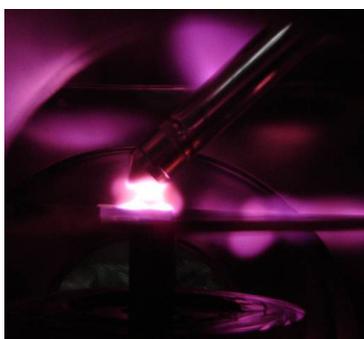
圖九 系統方塊圖



圖十三 E-H Tuner控制系統實體圖



圖十四 N₂氣體經微波解離產生之電漿的OES圖



圖十五 微波電漿束圖