

電漿密度量測系統的製作與評估

廖 峻 德 游 永 祥

中原大學醫學工程學系
臺灣省中壢市普仁 22 號

魏 大 欽

中原大學化學工程學系
臺灣省中壢市普仁 22 號

(Received: January 20, 1999; Accepted: March 25, 1999)

摘要

本研究設計是以白金線或鎢線探針穿入電漿產生室內部，以靜電式量測電漿中的電子溫度、電子流束。以此量測操作時，操作室內的電漿離子化密度、均勻性與隨時間變化的穩定度等相關資訊。利用量測所得的電漿狀態這些數據，可調整各項電漿製程的操作參數，使非穩定低溫電漿的產生保持在可控制的狀況。實驗結果顯示：本設計對電子溫度（或將之推算為電漿密度）之量測，藉由 F.F.Chen 與 Bohm 的計算模式，對大面積的陣列天線式微波電漿系統之電子密度的估算約達 10^9 cm^{-3} 以上 (N_2 及 O_2 電漿)；對較大型加極板的高周波密度則推測在 10^8 cm^{-3} 以上。結果與一般理論值在合理的差距範圍。本裝置除了提供使用者監測電漿反應器內的電漿狀態外，也有利於作為電漿相關製程之改良或修正的參考。

關鍵詞：探測針，電漿製程，電漿密度。

壹、緒論

目前業界與學界使用的電漿種類可分為兩大類：高溫的電漿製程和低溫的電漿製程。而高溫的電漿製程一般均使用在核融合與其元件的製作上。至於低溫的電漿製程則較常被使用在半導體的製程中，而在醫界的使用則多半應用於高分子材料與熱敏感材料的製作與改質上。所謂的電漿為氣體被部分離子化後（低溫的電漿製程）所產生的物質狀態。因氣體被離子化的程度，與通入的氣體種類、流量大小、氣體受激發的方式、帶有高能量的電子與其他物質間的碰撞情況和壓力等相互關聯[1-3]。故電漿的離子化程度和電子的密度、電子溫度有著極密切的關係[1-5]。

目前一般常用的電漿機型，依其產生器之激發源以高週波頻率（~13.56 MHz）及微波頻率（~2.45 GHz）範圍為主。為擴大可處理面積、增進電漿製程有效涵蓋面，需要進一步瞭解各式電漿反應器之密度分佈及使用時間對電漿密度之影響，以評估工業化製程時的穩定度。本研究之量測是以業界可進行量產型的電漿原型機臺為主，當氣體被離子化後，其電漿密度可以由具有相同電荷的電子數來推得，因為整個原子受能量激發的荷電數之和為零。藉由漸進電壓變化，追蹤電子數在空間分佈情形，進而推導出離子化的密度。並藉由改變量測的位置與時間，以瞭解電漿反應器在不同條件下之均勻度與穩定性。

貳、材料與量測系統製作方法

一、量測系統設計

本實驗針對兩種可量產機臺的陣列天線式的微波電漿機臺與有極板的高週波電漿機臺來做電漿密度的量測比較。而量測系統的設計分為兩個主要部分：（一）硬體機構製作：即探測棒的設計與製成；（二）量測軟體，乃利用電腦來進行數據的紀錄與採用不同理論模式加以分析。

二、基礎機構設計之架構

由連接至電漿室內的鎢線探測棒，先接上一精密電流計，再連接一台可調 ±60V 以上的電源供應器，再以數位式 VOM（三用電表）或電腦來進行數據的紀錄。整個機構的設計考量較多的參考測試點（取點位置包括平面與縱向面[1,6,7]，藉以作為最佳取樣數據的驗證（圖一、二）。

三、硬、軟體製作方面

在進行量測電漿離子時，因電漿室內不能有金屬性物質和塑膠的物質參與，這是因為金屬性物質會受電漿作用使得量測棒成為一導電體，而塑膠的物質則會被電漿改質，故在探測棒的材質使用上，以玻璃和陶瓷製為主要的考量。其目的在避免因金屬性物質和塑膠性的物質受電漿作用後，對離子密度量測系統造成干擾（圖三、四）。量測系統軟體是採用由凌華（ADlink）公司所推出的實驗卡：ACL-9188 和 ACL-8112PG，並結合以實驗分析軟體 Visual

Lab M 所自行設計的量測程式與數據顯示畫面(圖五、六)，來觀察電漿離子化濃度的情形。

四、量測實驗

現階段的電漿機台量測實驗，分別採用：陣列天線式微波電漿機臺（中原大學醫工系生醫材料力學暨表面改質研究室）與加有極板的高周波電漿機臺（中國紡織研究中心）兩式機臺（圖七、八）來進行。此兩機臺的共通點為均具較大可處理體積的反應操作室，藉由本系統的量測來判別其電漿密度是否達到均勻與穩定。

五、數據分析

本項量測所使用的氣體為雙原子分子 O_2 、 N_2 ，參數為：壓力 0.2 torr、氣體流量 300 s.c.c.m.、功率的輸出為：陣列天線式微波電漿機臺 800W、有極板的高週波電漿機臺 2KW (依機臺最佳化的參數特性)。量測到 I^2-V 與 $I-V$ 的對應數據分析，採用由 F. F. Chen 和 Bohm criterion 對電漿離子濃度和電子溫度的計算模式[2,3,5]加以驗證：

(一) F.F.Chen 計算方程式：

$$Te = \frac{(I_1 + I_2) - 1.7 S \Delta V_a}{2(2 \frac{dI}{dV} + S)}$$

$$ne = \left(3.85 \times 10^{-14} \frac{M}{L^2 [rp(kTe)]^{2/3}} \frac{dI}{dV} \right)^{3/4}$$

其方程式中參數的含意為：

Te ：表電子溫度 (eV)

$I_{1,2}$ ：表探測線上的飽和電流值

S ：表飽和電流曲線斜率

ΔV_a ：表曲線斜率和 dI/dV 相交點的電壓值

dI/dV ：表過零點的斜率

ne ：表電子密度 (離子密度)

$M+$ ：表離子的重量

rp 、 L ：表 probe 的線徑與長度

(二) Bohm criterion 計算方程式：

$$Te = 0.244 \left[\frac{I_1 + I_2}{(dI/dV)|_{V=0} - 0.82 S} \right]$$

$$ne = \frac{1}{2} \left(\frac{I_1 A_1 + I_2 A_2}{A_1 A_2} \right)$$

$$ne = \frac{J_e}{0.61} \sqrt{\frac{m}{kTe}}$$

其方程式中參數的含意為：

$I_{1,2}$ ：表探測線上的飽和電流

$A_{1,2}$ ：表探線面積

m_i ：表離子重量

Te ：表電子溫度 (eV)

S ：表曲線斜率

ne ：表電子密度 (離子密度)

J_e ：表所測量到的電流密度

參、結果與討論

兩種計算模式之不同處在於數據紀錄圖形的分析上，F. F. Chen 是將量測值做成 I^2-V 的曲線分析圖；而 Bohm 則為 $I-V$ 曲線分析圖。將其量測數據代入其計算式，所得到的電漿離子（電漿電子）的濃度數據列如表一、表二。

表一 (N_2)

	陣列天線式 微波電漿機臺	加有極板的 高週波電漿機臺
F. F. Chen	2.557×10^9 (cm^{-3})	6.224×10^8 (cm^{-3})
Bohm criterion	3.886×10^9 (cm^{-3})	7.23×10^8 (cm^{-3})

表二 (O_2)

	陣列天線式 微波電漿機臺	加有極板的 高週波電漿機臺
F. F. Chen	1.667×10^9 (cm^{-3})	2.335×10^8 (cm^{-3})
Bohm criterion	1.215×10^9 (cm^{-3})	1.992×10^8 (cm^{-3})

由於本實驗所取的量測點是以單一量測點，進行多次量測後，再取平均值而得到的數據。如與一般順流 (Downstream) 型微波電漿計算的電子密度理論值在 10^8 - $10^{12} cm^{-3}$ 之間，和高周波型微波電漿計算的電子密度理論值在 10^6 - $10^{10} cm^{-3}$ 之間相比較。由表一與表二的計算數據結果可知，藉由 F. F. Chen 與 Bohm 的計算模式所得的數據來分析，其兩者的結果相較都很趨近於本量測系統的期望值。從另外一個角度來看，本實驗所使用之電漿反應器，乃是利用陣列天線元件，將微波分佈到一個可傳遞能量之兩室隔離玻璃厚板。此種設計使微波的傳遞不受擴大涵蓋面的影響，而且微波衰減率小。因此，所得的電子密度約在 $10^8 cm^{-3}$ 以上的量測值是可以接受的。

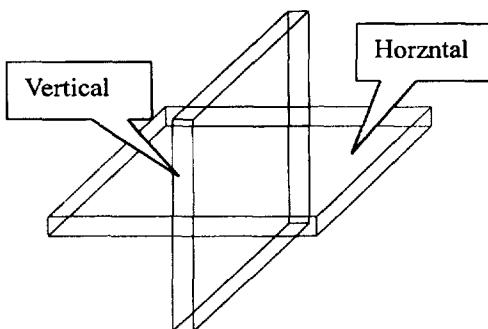


Figure 1. 量測取點的方式。



Figure 5. 主程式方塊圖。

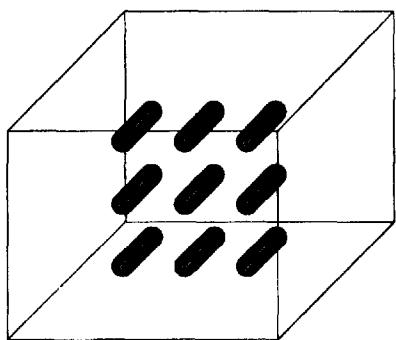


Figure 2. 反應腔室內的取點圖。

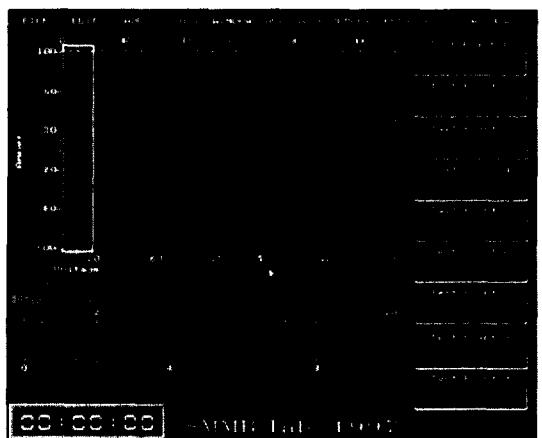


Figure 6. 量測畫面顯示圖。

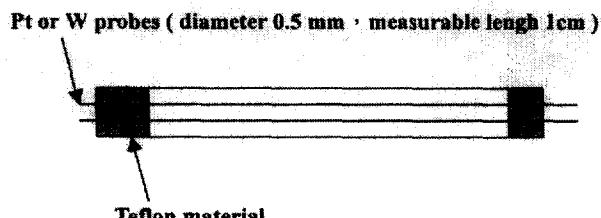


Figure 3. 量測系統內棒圖。

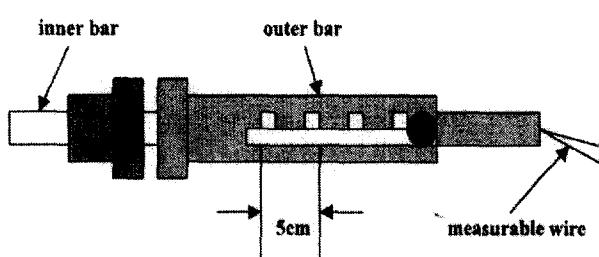


Figure 4. 量測系統外棒圖。

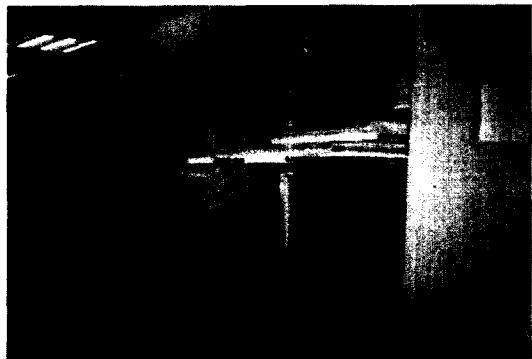


(a)



(b)

Figure 7. (a)陣列天線式微波電漿機台，
(b)固定式的量測系統。



(a)



(b)

Figure 8. (a)加有極板的大型高週波電漿機台，
(b)專用的可調整位置之量測系統。

肆、結論

因電漿為處於不平衡狀態的物質，當離子化密度愈高，不平衡態衰減至低荷電態的傾向應會增加。因此，在

量測電子密度時，這種動態的變化不易抓取或需縮短抓取時間。而本研究所設計的量測裝置，對電漿密度的初步量測值，在不考慮不同電漿機型的影響，利用 F. F. Chen 的 I-V 計算模式所得的結果，明顯地與 Bohm 的 I-V 模式所得的結果相近，驗證本靜電式探針可量測較高密度電漿產生系統。此結果提供了一種實用的檢測裝置，有利於更進一步對動態電漿製程的修正研究。

誌謝

本研究感謝工學院創新育成中心廠商碩傑公司、中國紡織研究中心、及本研究室翁志強、王明誠同學所提供的協助。

參考文獻

1. I. Brow, "Fundamental Process", *Handbook of ion source*, Chap. 1, 1- 22, 1995.
2. Peter Wei, "Characterization and Modeling of Microwave Plasma Used for Materials Processing", Ph. D thesis, The Pennsylvania State University, 1995.
3. Alfred Grill, "Cold Plasma in Materials Fabrication", From Fundamentals to Application, IEEE Press, 129 -137, 1993.
4. B. N. Chapman, 「Glow Discharge Processes」, Chap. 3, *Plasma*, by Jhon Wiley & Sons, Inc. 1980.
5. V. E. Golant, "Microwave Plasma Diagnostic Techniques", Soviet Physics TECHNICAL PHYSICS, A Translation of the "Zburnal Tekhnicheskoi Fiziki", Vol. 5, No.11, 1197-1310, May 1961.
6. R. M. Clements, "Plasma diagnostics with electron probes", J. Vac. Sci. Technol. 15 (2) March/April 1978.
7. I. D. Sudit and R. C. Woods, "A study of the accuracy of various Langmuir probe theories", J. Appl. Phys. 76 (8) 15 Oct. 1994.

Making and Evaluation of a Plasma Density Measuring System

J. D. LIAO AND Y. S. YU

Department of Biomedical Engineering
Chung Yuan Christian University
Chung Li, Taiwan 32023, R.O.C.

PETER WEI

Department of Chemical Engineering
Chung Yuan Christian University
Chung Li, Taiwan 32023, R.O.C.

ABSTRACT

Current design utilizes a Pt or W probe penetrated through the plasma reactive chamber and measures statically the state of electron flow to

monitor the electron (or ion) density, uniformity and stability of generated plasma. The data can provide information to adjust the various parameters in operation and to maintain its state in a controllable condition. The result has demonstrated a reproducible approach to a theoretical value on the measurement of electron temperature, referred to as plasma density). Using the calculation models from Chen and Bohm, a 3-A antenna array microwave plasma produces an electron density of *ca.* $10^7\text{--}10^9 \text{ cm}^{-3}$ (for N₂ and O₂ plasma), compared with Radio-frequency plasma discharge (with electrode) of *ca.* $10^6\text{--}10^8 \text{ cm}^{-3}$. The result has good agreement with most of theoretical calculations. This device not only provides an approach to trace plasma states, but also a basis for improving and adjusting the plasma-related process.

Key words: *probe, plasma processing, plasma density.*

