

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

電漿蝕刻製程的先進製程控制

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2212-E-009-055-

執行期間：91年12月01日至92年10月31日

執行單位：國立交通大學機械工程學系

計畫主持人：林家瑞

計畫參與人員：張朝雯，李介民

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 1 月 15 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

電漿蝕刻製程的先進製程控制

Advanced Process Control of Plasma Etching Process

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：91-2212-E-009-055-

執行期間：91年12月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程學系

計畫主持人：林家瑞

計畫參與人員：張朝雯 李介民

成果報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 92 年 01 月 13 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

電漿蝕刻製程的先進製程控制

計畫編號：91-2212-E-009-055-

執行期限：91年12月01日至92年7月31日

主持人：林家瑞 國立交通大學機械工程學系

計畫參與人員：張朝雯 李介民

一、中文摘要

電漿因其在材料處理上的特殊性質，故在半導體製程中廣泛的被應用。然而雖然電漿有許多應用上的優點，卻也因為但複雜的反應機制會造成蝕刻結構的變化與傷害，此外因製程技術的發展瓶頸，無法達到每年成本降低之目標，因此先進製程控制的引進一項重要的課題。電漿蝕刻製程的模型基礎式製程控制 (Model-Based Process Control; MBPC) 是本計畫努力以赴的主要專題研究。電漿蝕刻製程及設備的模型分為兩段式，首先建立電漿蝕刻設備和電漿的模型，接著建立電漿和電漿蝕刻製程的模型。結合兩段模型就是電漿蝕刻設備和電漿蝕刻製程的模型。藉由在線(In-situ)感測器即時(Real Time)修正電漿蝕刻設備和電漿蝕刻製程的模型，製程控制方案可以作最有效的設計及執行。

本研究計畫的主要目標是建立電漿蝕刻設備和電漿蝕刻製程的理論模型，並藉由自激發電子電漿共振儀(SEERS, Self Excited Electron Plasma Resonance Spectroscopy) 驗證電漿蝕刻設備和電漿蝕刻製程的理論模型。

關鍵詞：二維流體模型，區域平均模式模型，自激發電子電漿共振儀

Abstract

Plasma is widely used in semiconductor material processing. Because of the complex properties in plasma processing tool, some problems of production yield are caused by plasma processing. However, to improve production yield and reliability, the more accurate process monitoring and control is required in the advanced semiconductor manufacturing. Model Based Process Control (MBPC) of plasma etching process is the primary objective of this research project. Plasma etching model consists of two parts. The first part is the model between the plasma etching equipment and the plasma itself. The second part is the model between the plasma and the plasma etching process. Combine these two model, we get the model between the

plasma equipment and plasma etching process. Through in-situ sensor (SEERS), we can modify the model in real-time, MBPC can be designed and executed in the most effective way.

The main target of this research project is to establish the theoretical model between the plasma etching equipment and plasma etching process first, then this theoretical model will be verified through Self Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS).

Keywords : Two-dimensional Fluid Model , Global model , Self Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS)

二、研究目的

電漿在半導體領域的運用有電漿蝕刻或是電漿增益化學氣相沈積等，隨著積體電路的尺寸越作越小的趨勢，在蝕刻時，能否精準的完成微影時所定義的圖像，便是在半導體製程中極為重要的一個環節。當半導體元件不斷縮小其尺寸，深寬比的要求也越來越嚴苛，於是電漿乾式蝕刻便漸漸取代傳統的濕式蝕刻，使用電漿乾式蝕刻最重要的原因便是電漿蝕刻的非等向性比較好，所以可以達到較佳的深寬比，但如何降低成本、提高產品精密度便是當前重要的研究課題。為了因應製程上的不斷改善，減少晶圓報廢的數量，對於半導體製程及設備需要提出改善產品的良率之具體方案。這種具體方案需要藉著在線(In-situ)感測器即時(Real Time)自動提供給生產線上操作員。自激發電子電漿共振儀(SEERS, Self Excited Electron Plasma Resonance Spectroscopy)能夠提供電漿電子密度，電子碰撞頻率的在線測量。

電漿模擬的發展約自 1980 年代早期開始【1】【2】，最初是探討氟化合物電漿化學問題，到了 1980 年代中期，使用一維流體模式模擬電容式 RF 電漿源陸續被發表出來，1980 年代晚期至 1990 年代早期，電漿模擬所使用的模式逐漸趨於成熟，逐步包含複雜的電漿物理及相關之化學機制，但主要仍以一維流體模式為模擬對象。隨著 1990 年代電腦科技的快速發展，以及對電漿物理及化學性質的瞭解，二維電漿流體模擬陸續出現，用來處理平行板反應性離子蝕刻電漿源(Reactive Ion Etch, RIE)，而電子迴旋共振電漿源(Electron Cyclotron Resonance, ECR)及電感耦合式電漿源(Inductive Coupled Plasma, ICP)的模擬隨後也相繼提出【3】【4】。1994 年，Lieberman 等人，發展了一個區域平均模式模型，針對電漿中氧的物理性質及化學機制做模擬，輸入參數有氣體流量、工作壓力及電漿吸收功率，將粒子平衡式與能量平衡式結合，以數值方法解多維度之穩態非線性方程組，以得到各粒子的密度與電子溫度之變化【5】【6】【7】。

三、實驗設備

a、變壓耦合式電漿源(TCP)

本專題實驗為 Lam TCP 9400SE 之機台。在 TCP 電漿蝕刻機中，是利用放

置於電漿腔體頂端之 Antennas，通以一時變 RF 電流（頻率約在 13.56MHz），而這個時變電流便會在電漿腔體內感應出一時變磁場、電場及電流，在能量足以維持電漿的平衡，電漿便會生成，此時，時變電流在電漿腔體內所感應出的電場與電流便是維持電漿的主要能量來源。如圖一所示，腔體上方有一個 RF 電源輸入，其主要功能是供應線圈電流，進而產生感應磁場，再而產生感應電場，相關的概念圖可由圖一中位於下方的圖看出。而位於腔體下方之 RF 電源則主要是產生 Bias（偏壓），用以產生自偏壓(self-bias)，形成所謂的 RF Bias Sheath Field，此偏壓場會加速離子撞擊晶圓，並使離子有較佳的方向性，從而得到較佳的蝕刻輪廓【8】。

b、自激發電子電漿共振儀(SEERS)

自激發電子電漿共振儀(SEERS) 經由量測電漿中的 RF 電流，如圖二所示，能提供電漿電子密度，電子碰撞頻率的在線測量【9】、【10】，經由 SEERS 實施電漿蝕刻製程及設備的在線測量，進一步提供電漿蝕刻製程及設備的 APC(Advanced Process Control)先進控制方案，並藉由自激發電子電漿共振儀驗證電漿蝕刻設備和電漿蝕刻製程的理論模型。

四、電漿模型建立

、二維流體模型

因為感應電場的產生，可以由線圈所感應出的磁場來推導，由已知的輸入參數，如電流、介電常數等等，便可利用 Biot-Savart law 求出 antennas 在 chamber 中感應出的磁場向量位能強度。Biot-Savart law 的公式如下：

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{i \cdot d\vec{s} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \right) \quad (4-1)$$

μ_0 : permeability of the medium , i : coil current , $d\vec{s}$: coil 上一小段長度

$$\vec{A} = \frac{\mu I a}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi \cdot d\phi}{R} \quad (4-2)$$

其中 \vec{A} 是 magnetic vector potential、 I 是 amplitude of the RF current、 a 是線圈的半徑。當有 n 組線圈時，所求出的值必須互相累加後才是整個腔體中電磁向量位能的大小值。由上列公式，便可對腔體內任何一點得出感應的電磁向量位能大小，之後再將其帶入 Maxwell's equation 中，藉以求出 chamber 中感應出的電流及電場。至於 Maxwell's equation 之相關方程式，條列如下：

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (4-3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t \quad (4-4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad , \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (4-5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad , \quad \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (4-6)$$

\vec{J} : volume current density , ρ : the volume charge

ε : permittivity of the dielectric medium , μ : permeability of the dielectric
最後整理得出最終關係式如下所示 :

$$\nabla^2 \bar{A} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} = -\mu \cdot \bar{J} \quad (4-7)$$

由於輸入源是 RF 電源為時變函數 , 所以可以將參數表示成如下所示 :

$$\bar{A} = \tilde{A} \cdot e^{i\omega t}; \bar{J} = \tilde{J} \cdot e^{i\omega t}; \bar{E} = \tilde{E} \cdot e^{i\omega t} \quad (4-8)$$

將 (4-7) 式以圓柱座標展開可得 :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(r \frac{\partial \tilde{A}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial t^2} + \left[(\mu\varepsilon\omega^2 - \frac{1}{r}) \right] \tilde{A} = -\mu \cdot \tilde{J} \quad (4-9)$$

感應電場、感應電流與磁向量位能關係如下 :

$$\tilde{E} = -i\omega\tilde{A}, \bar{J} = \bar{J}_{free} + \bar{J}_{mag} + \bar{J}_{pol} = \bar{J}_{plasma} = \sigma_p \cdot \bar{E} \quad (4-10)$$

其中, \bar{J}_{free} 是自由電流密度 \bar{J}_{mag} 是磁化電流密度 \bar{J}_{pol} 是極化電流密度, 而 \bar{J}_{plasma} 是電漿區的總電流密度, 至於 σ_p 是電漿的電導率 (Conductivity) 關於電漿的電

導率, 其公式如下 :

$$\sigma_p = \frac{n_e e^2}{m_e (v_e + j\omega)} \quad (4-11)$$

利用這些公式為基礎, 便可以架構出整個 TCP 電漿腔體中電磁場分佈、電場分佈的模型。

模型架構方面, Fluid Model 是利用粒子一些關係式, 包括連續方程式與動量方程式、電子能量的守衡方程式 (假設電子能量分佈為 Maxwellian), 解電漿中氣體分子、離子與電子的流體方程式。在二維的模擬中, 同時解粒子守衡方程式、帕松方程式 (Poisson equation) 麥斯威爾方程式以及電子能量守衡方程式以得到粒子密度的空間分佈、電位的空間分佈、感應電場分佈以及電子溫度的空間分佈。整體來說, Fluid Model 所需的運算資源最少, 但又可獲得相當多的電漿參數變化, 所以選擇 Fluid Model 來作電漿的特性分析。

主要的三大方程式, 其數學式條列如下 :

1、連續方程式

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla \cdot (n_j \bar{u}_j) = R_{j,source} - R_{j,sink} \quad (4-12)$$

2、動量方守恆程式

$$m_j n_j \left[\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + (\bar{u}_j \cdot \nabla) \bar{u}_j \right] = q_j n_j (\bar{E} + \bar{u}_j \times \bar{B}) - \nabla p_j + \sum_{j \neq k} P_{jk} \quad (4-13)$$

3、電子能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e K_B T_e \right) = -\nabla \cdot \bar{Q}_e - e \bar{E} \cdot \bar{\Gamma}_e + P_{abs} - P_{coll} \quad (4-14)$$

其中 n_j 為粒子 j 的密度、 \bar{u}_j 為粒子 j 的速度、 $R_{j,source}$ 為單位體積內產生出粒子 j 的速率、 $R_{j,sink}$ 為單位體積內消耗粒子的速率、 m_j 為粒子 j 的質量、 q_j 為粒子 j 所帶的電荷量、 \bar{E} 乃是空間電場、 \bar{B} 是外加的磁場、 P_j 為粒子 j 於空間中所造成之壓力、 $\sum_{j \neq k} P_{jk}$ 為粒子 j 與其他粒子發生碰撞時所造成的動量轉移總和、 K_B 為波茲曼常數、 \bar{Q}_e 為電子的熱通量、 $\bar{\Gamma}_e$ 為電子粒子通量、 P_{abs} 為外加的能量吸收量、 P_{coll} 是電子因為碰撞所損失的能量，流程圖如圖三所示。

、區域平均模式模型 (Global Model)

區域平均模式的發展，使得欲瞭解電漿成分之組成，無須解流體中複雜的關係，而是利用粒子平衡及能量平衡之觀念求解，此模型的優點在於能夠快速的瞭解電漿中各化學物質的組成，在使用區域平均模式時有下列假設條件：(1) 假設各粒子的密度在整個腔體中是均勻分佈，不隨空間變化；(2) 假設正離子的密度 n_i 在腔體中式均勻的，但在靠近腔壁的鞘層處驟降為鞘層邊緣密度 n_{is} ；

(3) 假設電子密度 n_e 在腔體中式均勻，但在鞘層處密度下降；負離子密度 n^- 在腔體體中呈拋物線分佈，在靠近腔壁的鞘層處密度為零。(4) 假設忽略離子與其他粒子因碰撞而損失之能量，及電子與正離子或負離子碰撞損失之能量，因為電漿組成成分中，中性粒子的數目遠大於帶電粒子；(5) 假設電子能量分佈函數為馬克斯威爾分佈 (Maxwellian Distribution)。

a、粒子平衡方程式

1、中性粒子平衡方程式：

隨時間變化之中性粒子 = 輸入腔體內之氣體粒子 (source) + 在腔體內反應生成之粒子 + 因反應或碰撞腔體壁而損失之粒子 + 經抽氣系統而排出之粒子。

其中 source 只有送入腔體的中性氣體粒子平衡方程式才會出現，其他中性粒子不會有此項。

2、帶電離子平衡方程式

隨時間變化之中性粒子 = 在腔體內反應生成之離子 + 因碰撞腔體壁而損失之離子 + 重新結合成中性粒子而消失之離子 + 經抽氣系統而排出之離子。

其中由於電漿相對於腔壁為正高電位，故負離子會被侷限在電漿中，不被抽氣系統所排掉，且負離子不會因碰撞到腔壁而損失，在等號右邊第二項及第四項

不適用於負離子。

b、電子能量平衡方程式

電子能量平衡方程式假設電漿的輸入功率完全被電漿所吸收，電漿吸收的能量為 P_{abs} ，而損失的途徑有三：(1) 經由電子與中性粒子發生游離、激發、彈性碰撞而損失之能量 P_c ；(2) 離子因撞擊腔壁所損失之能量 $P_{iw,i}$ ；(3) 電子因撞擊腔壁所損失之能量 P_{ew} 。將上述三種能量損失形式整理可用 4-15 式表示：

$$P_{abs} = P_c + \sum_{j=1}^r P_{iw,j} + P_{ew} \quad (4-15)$$

而對於因粒子間碰撞而損失之能量與因粒子撞擊腔壁而損失能量內容加以說明如下：

1、就單原子氣體而言，產生每一對電子離子對平均的碰撞能量損失 ε_L 為 4-16 式所示：

$$\varepsilon_L = \frac{1}{v_{iz}} (v_{iz} \varepsilon_{iz} + \sum_{k=1}^{N_{exc}} v_{exc,k} \varepsilon_{exc,k} + v_{elas} \frac{3m}{M} T_e) \quad (4-16)$$

上式中包含電子的游離、激發、彈性碰撞等反應所損失的能量。其中 $v_m = \langle \sigma v \rangle n_g$ 為碰撞頻率， $k = \langle \sigma v \rangle$ 為反應速率，如表一所示， σ 為碰撞截面， v 為電子速度，而 σ 、 v 皆為電子溫度之函數。 n_g 為中性分子密度， N_{exc} 為激發之能階， ε_{iz} 為中性粒子產生離子之臨界游離能 (Threshold Ionization Energy, 單位 eV)。而對於單原子粒子由 4-16 式可觀察出 ε_L 為電子溫度之函數；分子氣體中，各種粒子的密度與電子溫的變化較單原子氣體更為複雜，不再是簡單的函數關係，且與粒子組成比例有相當的關係。歸納上述，電子因與中性分子碰撞所造成之能量損失為 4-17 式所示：

$$P_{c,j} = en_e V \sum_{i=1}^r v_{iz,i} \varepsilon_{L,i} \quad (4-17)$$

2、對離子與電子因撞擊腔體而造成之能量損失由 4-18，4-19 式表示：

$$P_{iw,i} = en_{is,i} u_{B,i} A \varepsilon_{iw,i} \quad (4-18)$$

$$P_{ew} = en_{es} u_B A \varepsilon_{ew} \quad (4-19)$$

其中 $n_{is,i}$ 為離子在鞘層中之密度， u_B 為玻姆速度 (Bohm Velocity)， A 為腔體之總表面積， $\varepsilon_{iw,j}$ 為離子在腔體表面所損失之能量，一般介於 $5-8T_e$ ； n_{es} 為電子在鞘層中之密度， ε_{ew} 為電子在腔體表面所損失之能量，約為 $2T_e$ 。

c、Ar, Cl₂ 區域平均模式模型建立

在 Ar 的區域平均模式中，因為 Ar 為單原子分子，其電漿組成成分以 Ar^+ 及電子為主，其成分較 Cl_2 、 H_2 、 O_2 等分子簡單，若在氯氣中區域平均模型包含的粒子有： Cl_2 、 Cl 、 Cl_2^+ 、 Cl^+ 、 Cl^- 及電子，模型描述反應較 Ar 為複雜，4-20 式表示中性氣體之粒子平衡式；4-21 式表示帶電粒子之平衡式；4-22 式表示電子吸收能量之平衡關係式。

$$\frac{dn_g}{dt} = q + k_i n_e n_g + k_w u_{B,j} n_j - k_r n_g \quad (4-20)$$

$$\frac{dn_j}{dt} = k_i n_e n_g + k_i n_e n_j - k_w u_{B,j} n_j - k_r n_j \quad (4-21)$$

$$V \frac{\partial(\frac{3}{2} n_e k_B T)}{\partial t} = P_{abs} - P_{iw,j} - P_{ew} - P_{c,j} \quad (4-22)$$

q 為單位體積之氣體流量， $k_r = 1/\tau$ ， τ 為粒子停留於腔體中的時間常數， $k_i n_e n_g$

表示電子與中性原子間之反應； $k_i n_e n_j$ 表示電子與帶電粒子間之反應； $k_w u_{B,j} n_j$

表示帶電粒子因擴散至腔壁而損失之部分。

五、結果討論

流體模型分析 Ar 中，由於電子運動速度快，剛開始到達腔壁的電子會開始累積導致腔壁成負電荷進而使入射電子減少，根據電漿腔體流體模型所運算出的電子分佈如圖五所示，可看出模型與實際情形相符合，在接近上下腔壁與側壁有漸減的趨勢。至於流體模型所運算出吸收功率的分佈，由圖六所示，在接近線圈的位置由於感應電場大，固有明顯的吸收功率，在離線圈越遠的地方由於感應電場極小，故吸收功率下降的非常的快，趨勢上也可說明模型符合實際物理的狀態。而電子密度隨操作壓力與電漿吸收功率在圖六可觀察出成線性增加。

在模擬 Cl_2 區域平均模型中，在 Cl_2 密度隨電漿吸收功率上升而下降，主要因電漿吸收功率的增加，使得經由電子碰撞反應造成的損失增加所致；隨操作壓力上升 Cl_2 密度成線性增加，則是供給來源的粒子增多所致。而 Cl 的來源主為經電子解離 Cl_2 所產生，故密度隨電漿吸收功率增加而上升。而由模擬結果亦可發現，在高電漿吸收功率、低操作壓力下，腔體中主要的帶電粒子為 Cl^+ 及 n_e ，而在蝕刻 Poly-Si 中主要反應物為 Cl 及 Cl^+ ，故高電漿吸收功率下能增加蝕刻率。電子密度隨電漿吸收功率呈線性增加，但在壓力增加下電子密度並未成線性增加，而是呈現趨緩的現象，主要是因在高壓下電子能量低，影響游離率所致，與實驗相符。而電子溫度隨壓力上升而下降，因為在高壓力下粒子平均自由徑變

小，粒子間的碰撞增多所致，但電子溫度不同於 Ar 為 Cl_2 的電子溫度會隨電漿吸收功率而變化，不再只是簡單的壓力函數。此外在帶電粒子中發現 Cl_2^+ 與 Cl^- 隨電漿吸收功率與壓力變化有相同的趨勢； Cl^+ 與 n_e 隨電漿吸收功率與壓力變化有相同趨勢，與文獻所討論相同。並由實驗數據可發現電子密度與模型有相同趨勢，但因機台的輸入功率在過程中有能量的損失，故模型所計算出數值大於實際所量測到的值。

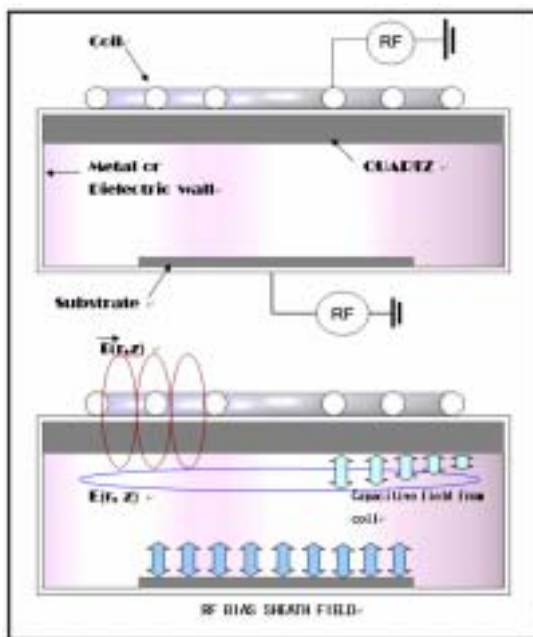
六、結論

本研究已利用程式語言 Visual Basic 及 Matlab 作為發展基礎平台，並以 Fluid Model、Global Model 理論架構，建構出 TCP 人機介面的電漿模型，利用此模型，可以改變不同輸入參數，如電流源、腔體壓力等等，藉以得知不同輸入在電漿腔體中所產生的電場分佈、吸收功率分佈、電子密度及電子溫度分佈情形等等。在電漿蝕刻設備及建立電漿蝕刻製程理論模型間加入控制的概念，藉由自激發電子電漿共振儀驗證電漿蝕刻設備和電漿蝕刻製程理論模型的準確性後，進行 wafer to wafer 的 AEC 及 APC，AEC 及 APC 以單輸入單輸出(SISO)或多輸入多輸出(MIMO)的自適應控制(Adaptive Control)作為設計基礎。AEC 以間接自適應系統(Model Based Adaptive Identification)；APC 以直接自適應系統(Model Based Adaptive Control)來設計完成，期許以最佳的電漿輸入(如輸入電源、氣體壓力等等)得到最好的電漿密度，再由電漿密度與蝕刻率、非等向性蝕刻之間的關係，便可以推導出到最好的蝕刻結果。

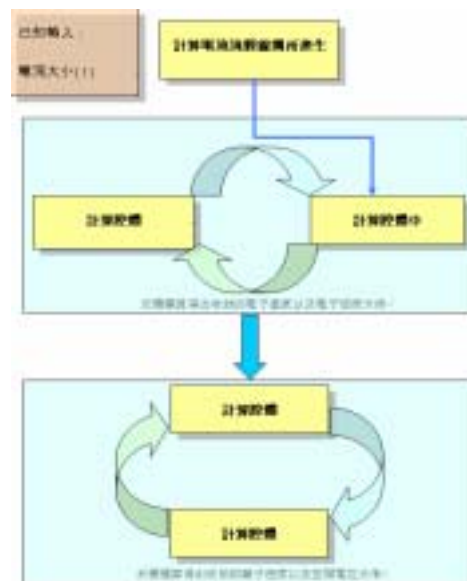
七、參考文獻

- 【1】M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, "Principles of plasma discharges and materials processing", John Wiley & Sons, New York, 1994.
- 【2】Brian Chapman, "Glow Discharge Process", John Wiley & Sons, New York, 1980.
- 【3】R. A. Stewart, P. Vitello, D. B. Graves, "Two-dimensional fluid model of high density inductively coupled plasma sources", J. Vac. Sci. Technol. B 12(1) 1994
- 【4】P. L. G. Ventzek, Robert J. Hoekstra and Mark J. Kushner, "Two-dimensional modeling of high plasma density inductively coupled source for materials processing", J. Vac. Sci. Technol. B 12(1) 1994
- 【5】C. Lee, D. B. Graves, M. A. Lieberman, D. W. Hess, "Global Model of Plasma Chemistry in a High Density Oxygen Discharge", J. Electrochem. Soc. Vol.141, No. 6, 1994

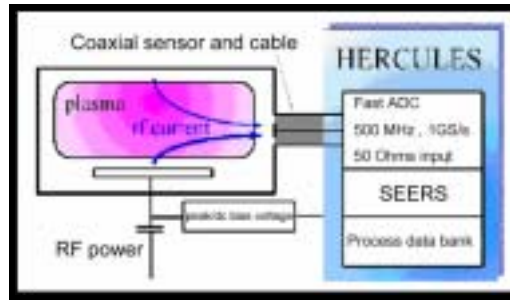
- 【6】 C. Lee, M. A. Lieberman, “Global model of Ar, O_2, Cl_2 and Ar/O_2 high-density plasma discharges”, J. Vac. Sci. Technol. A 13(2) 1995
- 【7】 Y. T. Lee, M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, “Global model for high pressure electronegative radio-frequency discharges”, J. Vac. Sci. Technol. A 15(1) 1997
- 【8】 Oleg A. Popov, “High Density Plasma Sources”, NOYES PUBLICATIONS, New Jersey, 1995
- 【9】 A. Steinbach, S. Wurm, Ch. Loelbl, D. Koehler, D. Knobloch, and F. Bell, “Real time plasma etch control by means of physical plasma parameters with Hercules”SemiPAC; 24-27 January, San Antonio/Texas, USA 1999.
- 【10】 M. Derie, “Critical dimension and oxide damage control during Poly/Polycide etching on a TCP 9400SE, using the SEERS plasma diagnostic system”, The European Symposium on Microelectronics Manufacturing Technologies, 19-21 May 1999, Caledonian Hotel, Edinburgh, Scotland, United Kingdom.
- 【11】 J. M. Lane, F. P. Klemens, K. H. A. Bogart, M. V. Malyshev, and J. T. C. Lee, “Feature evolution during plasma etching II Polycrystalline silicon etching”, J. Vac. Sci. Technol. A 18(1), 2000
- 【12】 M. V. Malyshev, N. C. Fuller, “Diagnostics of inductively coupled chlorine plasma: Measurement of Cl_2^+ and Cl^+ densities” J. Applied Physics V(88) 5
- 【13】 M. V. Malyshev, V. M. Donnelly, “Diagnostics of inductively coupled chlorine plasma: Measurement of Cl_2 and Cl densities” J. Applied Physics V(88) 11



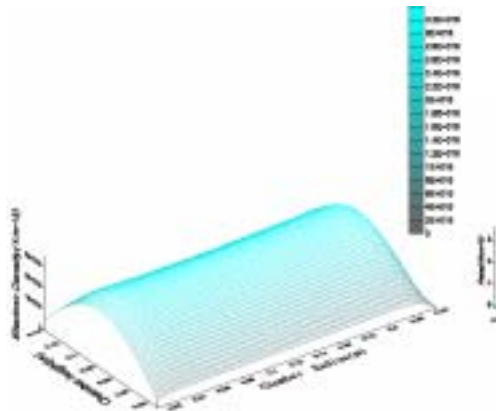
【圖一】變壓耦合式電漿源示意圖



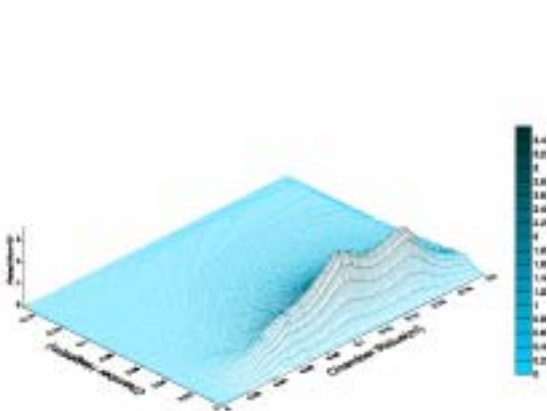
【圖三】電腦模擬流程圖



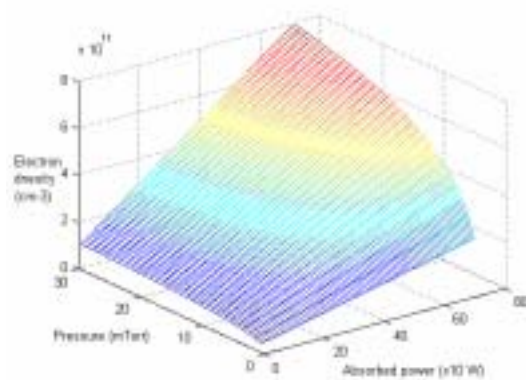
【圖二】自激發電子電漿共振儀示意圖



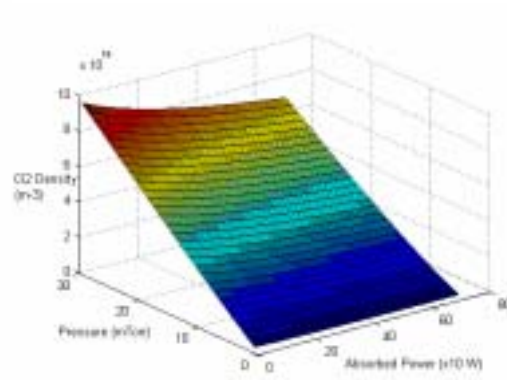
【圖四】工作氣體為氬氣 12mTorr、400W 電子密度隨空間之變化圖 (Fluid Model)



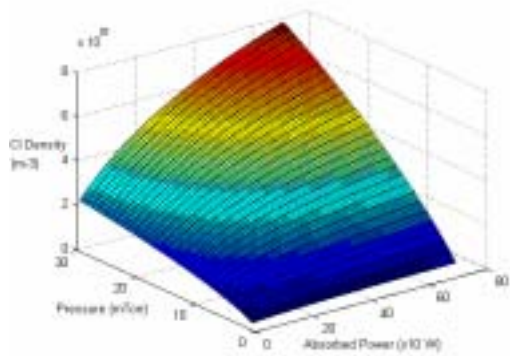
【圖五】工作氣體為氬氣 12mTorr、400W 電漿吸收功率隨空間之變化圖 (Fluid Model)



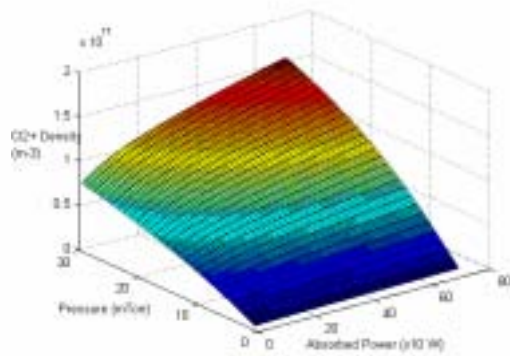
【圖六】工作氣體為氬氣下，電子密度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



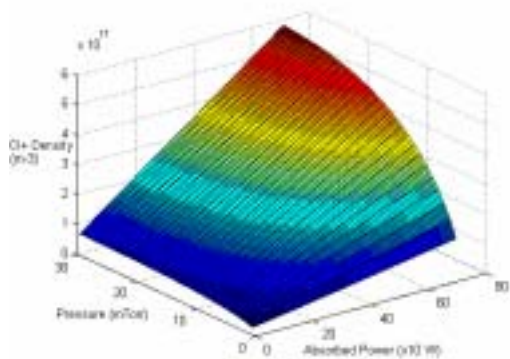
【圖七】工作氣體為氯氣下， Cl_2 密度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



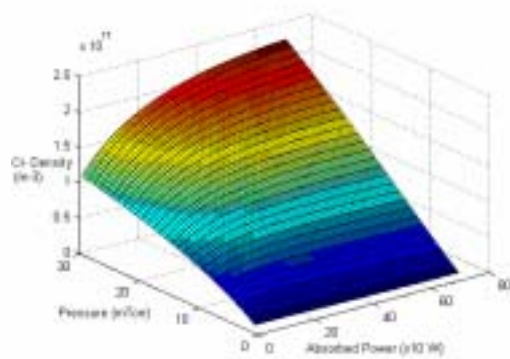
【圖八】工作氣體為氯氣下，Cl 密度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



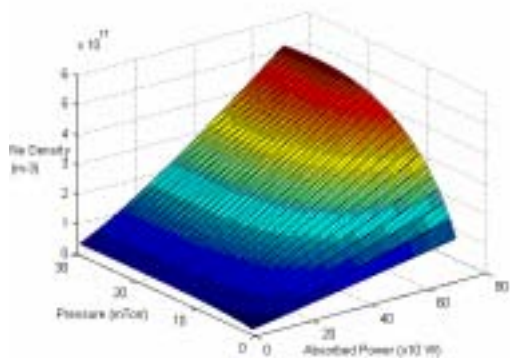
【圖九】工作氣體為氯氣下，Cl₂⁺ 密度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



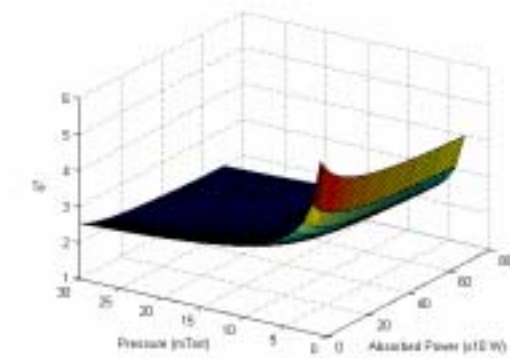
【圖十】工作氣體為氯氣下，Cl⁺ 密度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



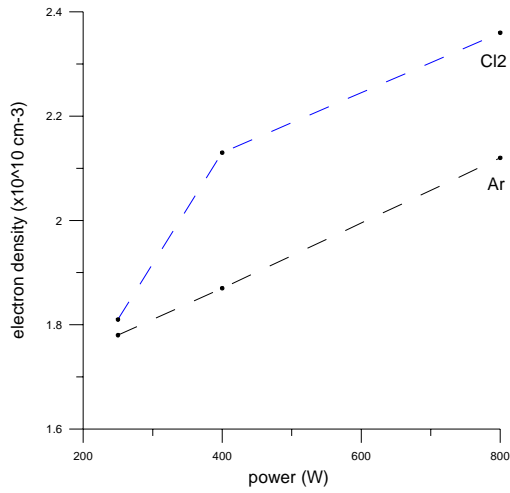
【圖十一】工作氣體為氯氣下，Cl⁻ 密度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



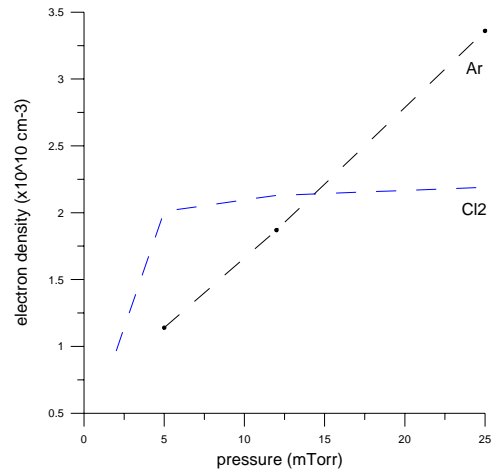
【圖十二】工作氣體為氯氣下，電子密度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



【圖十三】工作氣體為氯氣下，電子溫度隨工作壓力及電漿吸收功率之變化圖 (Global Model)



【圖十四】電子密度隨輸入功率之變化圖
(實驗操作在 12mTorr , 80sccm)



【圖十五】電子密度隨操作壓力之變化圖
(實驗操作在 400W , 80sccm)

Reaction	Rate coefficient ($m^3 s^{-1}$)	Threshold energy (eV)
$e + Ar \rightarrow Ar^+ + 2e$	$k_1 = 1.23 \times 10^{-14} \exp(-18.68/T_e)$	15.76
$e + Cl_2 \rightarrow Cl_2^+ + 2e$	$k_2 = 9.214 \times 10^{-14} \exp(-12.9/T_e)$	11.5
$e + Cl_2 \rightarrow Cl^+ + Cl + 2e$	$k_3 = 3.881 \times 10^{-14} \exp(-15.5/T_e)$	15.7
$e + Cl_2 \rightarrow Cl^+ + Cl^- + e$	$k_4 = 8.549 \times 10^{-16} \exp(-12.65/T_e)$	11.9
$e + Cl_2 \rightarrow 2Cl + e$	$k_5 = 5.52 \times 10^{-14} T_e^{1.66} \exp(-5.49/T_e)$	3.4
$e + Cl_2 \rightarrow Cl + Cl^-$	$k_6 = 3.69 \times 10^{-16} \exp(\sum_{i=1}^5 \frac{a_i}{T_e^i})$ $a_1 = -1.68$ 、 $a_2 = 1.457$ 、 $a_3 = -0.44$ $a_4 = 0.0572$ 、 $a_5 = -0.0026$	
$e + Cl \rightarrow Cl^+ + 2e$	$k_7 = 3 \times 10^{-14} (T_e)^{0.559} \exp(-13.21/T_e)$	13.5
$e + Cl^- \rightarrow Cl + 2e$	$k_8 = 2.627 \times 10^{-14} \exp(-5.37/T_e)$	3.61
$Cl^- + Cl_2^+ \rightarrow Cl + Cl_2$	$k_9 = 5 \times 10^{-14}$	
$Cl^- + Cl^+ \rightarrow 2Cl$	$k_{10} = 5 \times 10^{-14}$	
$Cl + wall \rightarrow 1/2 Cl_2$	$k_{11} = \gamma_{rec} D_{eff} / \Lambda^2$	
$\left\{ \begin{array}{l} Cl^+ + wall \rightarrow Cl \\ Cl_2^+ + wall \rightarrow Cl_2 \\ Ar^+ + wall \rightarrow Ar \end{array} \right.$	$k_w = \frac{(2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R)}{\pi R^2 L}$	

r_{rec} 為在結合係數， $D_{eff} = (1/D_{AA^*} + 1/D_{KN})^{-1}$ ， D_{AA^*} 為擴散係數， D_{KN} 為 Knudsen 自由擴散係數， Λ 為有效擴散長度，在氯氣中 h_L 、 h_R 修正為

$$\left\{ \begin{array}{l} h_L = \frac{1 + 3(n_{Cl^-} T_i / n_e T_e)}{1 + (n_{Cl^-} / n_e)} \frac{0.86}{[3 + L / 2\lambda_i + (0.86 L u_B / \pi D_a)^2]^{0.5}} \\ h_R = \frac{1 + 3(n_{Cl^-} T_i / n_e T_e)}{1 + (n_{Cl^-} / n_e)} \frac{0.8}{[4 + R / \lambda_i + (0.8 R u_B / 2.405 [J_1(2.405) D_a])^2]^{0.5}} \end{array} \right.$$

【表一】氬氣、氯氣化學反應式【6】、【7】