

國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

變壓耦合式電漿製程設備之先進設備控制

Advanced Equipment Control in Transformer Coupled

Plasma Processing Equipment



研究生：張朝雯

指導教授：林家瑞 博士

中華民國九十三年六月

變壓耦合式電漿製程設備之先進設備控制

**Advanced Equipment Control in Transformer Coupled Plasma Processing
Equipment**

研究生：張朝雯

Student : Chao-wen Chang

指導教授：林家瑞 博士

Advisor : Prof. Chia-shui Lin

國 立 交 通 大 學
機 械 工 程 研 究 所
碩 士 論 文



Submitted to Institute of Mechanical Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of Requirements

For the Degree of Science

In

Mechanical Engineering

June 2004

HsinChu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月


變壓耦合式電漿製程設備之先進設備控制

研究生：張朝雯

指導教授：林家瑞 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

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，卻也因為複雜的反應機制會造成蝕刻結構的變化與傷害，因此如何達到元件性能的需求，先進製程（設備）控制的引進成為一項重要的課題。而物理化學模型的建立成為描述設備參數與製程參數間重要的關鍵，本項研究將電漿蝕刻製程分為設備模型與製程模型兩段，先架構電漿蝕刻設備模型，並以區域平均模式模型來描述設備輸入參數與電漿製程參數間之關係，再與實驗結果及文獻相互印證。而控制部分則針對電漿成分中之關鍵參數『電子密度』做監控，因為在電漿反應中，主要的能量吸收、反應機制大多由電子來傳遞，故電子的行為可以用來掌控電漿之狀況。控制器設計分為動態模型控制器設計、穩態模型控制器設計兩種。動態模型採用順滑模態的設計方式，設計單一輸入（電漿吸收功率）單一輸出（電子密度）之控制器來控制電漿設備，不受環境擾動及系統參數變動的影響；穩態模型則以反應曲面法的概念設計控制器，模擬數據顯示控制器皆能對外界干擾源做補償，將系統維持在設定的目標值上，以提供製程一穩定的環境。

Advanced Equipment Control in Transformer Coupled Plasma Processing Equipment

Student : Chao-wen Chang

Advisor : Prof. Chia-shui Lin

Institute of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Plasma is widely used in semiconductor processing because of its special property for material processing. Although there are many advantages for application, some problems of structure variation and damage are caused by complex physical and chemical reaction. Therefore, real-time Advanced Process (Equipment) Control is a major area of research and development in improving the desired device performance. Using physical and chemical model is the key approach to describe relationship between equipment parameters and processing parameters. In this thesis, modeling the plasma etching process consists of equipment model and processing model. The first objective is to focus on equipment model by Spatial Averaged Model to explain relationship between input equipment parameters and output plasma parameters in Transformer Coupled Plasma system and confirm the model from experiment data. The second objective of this thesis is to design a controller in order to control electron density. The most important factor of sustaining the glow discharge in plasma is electron behavior which impacts ionization and power absorption in plasma processing tool. There are two types of controller to achieve controller design goal : dynamic model approach and steady state model approach. The sliding mode controller controls the plasma processing equipment and rejects disturbance and parameter variation using single input (plasma absorption power) single output (electron density) in dynamic model approach. Steady state model approach uses response surface method (RSM) which is based on experiment data or theoretical model. Theoretical model is used in this thesis for controller design. Simulation results show that both types of controller can compensate disturbance effect and parameter change and improve performance of plasma equipment.

致謝

感謝指導教授林家瑞博士兩年來的細心指導，使我能正確瞭解研究的方法、精神與做事的態度，對於控制理論則更深一步的認識，看到的不僅只是數學式，並且是看到背後的物理意義。其次，感謝陳宗麟博士與莊琇惠博士在論文口試時的寶貴意見，以及 NDL 與 NDL 工程師許慶龍先生在百忙中對於實驗的協助，有你們的寶貴意見使本論文得以順利完成。

在研究所求學的過程中，感謝在身旁一起努力打拼的伙伴介民、建宇、永洲，雖然路上難免有崎嶇，但我們終究一起將它克服，有了你們，我的研究生活多了幾分樂趣。感謝大學與高中的朋友們，是你們讓我的學生生涯充滿了歡笑與喜悅，謝謝你們。

最後，感謝一路上默默支持我與鼓勵我的家人，讓我能心無旁騖的在學業上認真學習，是你們給予我最大的力量，由衷希望所有我關心的及關心我的朋友、家人能夠擁有一個快樂、健康的人生旅途。



目錄

中文摘要

英文摘要

致謝

目錄

圖表目錄

變數符號表

第一章 緒論

1-1 研究動機與組織架構 1

1-2 文獻回顧 5

第二章 電漿基本原理與應用

2-1 電漿之生成與蝕刻原理 8

2-1-1 電漿之生成 8

2-1-2 電漿蝕刻機制 9

2-2 變壓耦合式電漿源 11

2-2-1 高密度電漿源 11

2-2-2 變壓耦合式電漿源加熱機制 12

第三章 模型建立與分析

3-1 區域平均模式基本原理 16

3-1-1 模型假設條件 16

3-1-2 粒子與能量平衡方程式 17



3-2	Ar 區域平均模式模型建立	19
3-2-1	穩態模型之推導	19
3-2-2	動態模型之建立	21
3-3	Cl_2 區域平均模式模型建立與分析	23
第四章 實驗設計與分析		
4-1	實驗設計法	26
4-2	實驗之準備與分析	29
第五章 控制器設計與模擬		
5-1	控制理論	35
5-1-1	順滑模態控制原理	35
5-1-2	模型線性化	37
5-2	控制設計與模擬	41
5-2-1	控制器設計	41
5-2-2	系統模擬	44
5-3	穩態模型控制器設計與模擬	46
5-3-1	反應曲面法	46
5-3-2	控制器設計與模擬	49
第六章 結論與未來研究方向		
6-1	結論	52
6-2	未來研究方向	54
參考文獻		94



圖表目錄

表一、電容式電漿源與高密度電漿源特性比較【22】	56
表二、氫氣、氯氣之化學反應及反應速率【10】【11】	57
表三、氫氣、氯氣之臨界游離能【10】【11】	58
表四、 $L_9(3^4)$ 直交表配置圖【30】	58
表五、輔助表【30】	59
表六、變異數分析表【30】	59
表七、實驗控制參數規劃表	60
表八、電子密度實驗配置和 SN 比表	60
表九、電子密度輔助表	61
表十、電子密度變異數分析表	61
表十一、電子碰撞率實驗配置和 SN 比表	62
表十二、電子碰撞率輔助表	62
表十三、電子碰撞率變異數分析表	62
圖 1-1、電漿蝕刻系統示意圖	63
圖 2-1、鞘層中離子與電子運動行為示意圖	63
圖 2-2 變壓耦合式電漿源示意圖【4】	64
圖 2-3 感應電場與感應磁場示意圖【22】	64
圖 2-4 一維非碰撞加熱機制圖【23】	65
圖 3-1 (a)離子在腔體中的密度分佈 (b)電子、負離子在腔體中的密度分佈【10】	65
圖 3-2、電子密度隨電漿吸收功率之變化圖，虛線穩態模型、實線動態模型	66

圖 3-3、氬氣電子密度隨操作壓力之變化圖，虛線穩態模型、實線動態模型	66
圖 3-4、氬氣電子溫度隨操作壓力之變化圖，虛線穩態模型、實線動態模型	67
圖 3-5、氬氣電子密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	67
圖 3-6、氬氣電子溫度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	68
圖 3-7、 Cl_2 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	68
圖 3-8、 Cl 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	69
圖 3-9、 Cl_2^+ 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	69
圖 3-10、 Cl^+ 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	70
圖 3-11、 Cl^- 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	70
圖 3-12、電子密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	71
圖 3-13、氯氣電漿中電子與粒子間碰撞率隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	71
圖 3-14、氯氣電漿中電子溫度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖	72
圖 3-15、在電漿吸收功率 400W、操作壓力 12mTorr 下，不同 R_{rec} 對電子密度之影響	72
圖 4-1、實驗設備圖示，左：蝕刻機台、右：感測器	73
圖 4-2 自激發電子電漿共振儀(SEERS)【1】	73
圖 4-3 電子密度在製程基準線下改變 source power 之變化圖(pattern wafer)	74
圖 4-4 電子密度在製程基準線下改變 bias power 之變化圖(pattern wafer)	74
圖 4-5 電子密度在製程基準線下改變壓力之變化圖(pattern wafer)	75
圖 4-6 電子碰撞率在製程基準線下改變 source power 之變化圖(pattern wafer)	75
圖 4-7 電子碰撞率在製程基準線下改變 bias power 之變化圖(pattern wafer)	76
圖 4-8 電子碰撞率在製程基準線下改變壓力之變化圖(pattern wafer)	76

圖 4-9、電子密度在 source power 400W、無 bias power 下受 breakthrough 隨壓力變化圖(blanket wafer)	77
圖 4-10、電子密度在 source power 400W 在 breakthrough 後受 bias power 之影響隨壓力變化圖(blanket wafer)	77
圖 4-11、電子密度在 source power 400W、bias power150W , 在 breakthrough 後蝕刻 pattern wafer 與 blanket wafer 隨壓力變化圖	78
圖 4-12、電子密度之因子效應圖(pattern wafer)	78
圖 4-13、電子碰撞率之因子效應圖(pattern wafer)	79
圖 5-1、順滑模態產生過程示意圖【33】	79
圖 5-2、Feedback linearization block diagram【34】	80
圖5-3、順滑模態控制器控制流程圖	80
圖 5-4、控制器設計圖	81
圖 5-5、操作壓力於 10mTorr ,考慮 step disturbance 在未受控制下電子密度圖	81
圖5-6、操作壓力於10mTorr , 在sliding layer=0.1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7 控制輸入圖	82
圖5-7、操作壓力於10mTorr , 在sliding layer=0.1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7 電子密度與順滑平面圖	82
圖5-8、操作壓力於10mTorr , 在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7 控制輸入圖	83
圖5-9、操作壓力於10mTorr , 在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7 電子密度與順滑平面圖	83
圖5-10、操作壓力於10mTorr , 電漿吸收功率介於53%~58%間未受控制電子密度圖	84
圖5-11、操作壓力於10mTorr , 在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置	

於pole=7，電漿吸收功率介於53%~58%間控制輸入圖	84
圖5-12、操作壓力於10mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7，電漿吸收功率介於53%~58%間電子密度與順滑平面圖	85
圖5-13、操作壓力於15mTorr，電漿吸收功率介於58%~63%間未受控制之電子密度圖	85
圖5-14、操作壓力於15mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7，電漿吸收功率介於58%~63%間控制輸入圖	86
圖5-15、操作壓力於15mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7，電漿吸收功率介於58%~63%間電子密度與順滑平面圖	86
圖 5-16、穩態系統模型建構與控制流程圖	87
圖 5-17、氯氣電漿源中電子密度對吸收功率與壓力之反應曲面等高線圖（無因子交互作用）	88
圖 5-18、氯氣電漿源中電子密度對吸收功率與壓力之反應曲面等高線圖（含因子交互作用）	88
圖 5-19、模擬 $\lambda = 1$ 時致動器變化圖	89
圖 5-20、模擬 $\lambda = 1$ 時電子密度變化圖	89
圖 5-21、模擬 $\lambda = 0.8$ 時致動器變化圖	90
圖 5-22、模擬 $\lambda = 0.8$ 時電子密度變化圖	90
圖 5-23、模擬 $\lambda = 0.5$ 時致動器變化圖	91
圖 5-24、模擬 $\lambda = 0.5$ 時電子密度變化圖	91
圖 5-25 模擬在不受控制下因環境變異造成電子密度的飄移圖	92
圖5-26、模擬 $\lambda = 0.8$ 時因環境因素所造成電子密度偏移控制器輸入對系統的補償	92
圖 5-27 模擬在不受控制下因環境變異造成電子密度的飄移圖	93
圖5-28、模擬 $\lambda = 0.8$ 時因環境因素所造成電子密度偏移控制器輸入對系統的補償	93

變數符號表

符號	名稱
$F_b^a(\alpha)$	統計上 F 檢定
h_L 、 h_R	離子密度在鞘層區域修正係數
k_B	波茲曼常數 (Boltzmann constant , $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J / K}$)
k_{iz} 、 k_{ex}	反應速率 (cm^3 / s)
k_w	粒子經由腔壁損失速率 ($1/s$)
L	腔體高度 (cm)
m	電子質量 ($9.1095 \times 10^{-31} \text{ kg}$)
M	質子質量 ($1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$)
MS_i	因子均方和
n_g	中性氣體密度 (cm^{-3})
n_e	電子密度 (cm^{-3})
n_i	離子密度 (cm^{-3})
n_{is}	離子於鞘層中密度值 (cm^{-3})
P	操作壓力 ($mTorr$)
P_{iw} 、 P_{ew} 、 P_{ev}	粒子能量損失
P_{abs}	電漿吸收功率 (W)
Q	氣體流量 ($sccm$)
R^2	決斷係數
R	腔體半徑 (cm)
$S(x)$	順滑平面
SS_i	因子平方和
T_e	電子溫度 (eV)
T_i	離子溫度 (eV)
u_B	玻姆速度 (Bohm velocity , $u_B \approx 9.8 \times 10^5 \sqrt{T_e / M} \text{ cm / s}$)
V	腔體體積 (cm^3 / s)
v	電子速度 (cm / s)

ν_m	碰撞頻率 ($1/s$)
σ_i	碰撞截面 (cm^2)
δ	肌膚深度 (skin depth , cm)
ε_{iz} 、 ε_{exc}	臨界游離能 (eV)
λ	收斂速度
λ_i	平均自由徑 (cm)
η	信號雜訊比、迫近條件
ρ	因子貢獻率
ε	順滑層厚度
τ	粒子停留於腔體中時間常數 (sec)



第一章 緒論

1-1 研究動機與組織架構

隨著製程技術的快速發展，晶圓廠設備投資成本將大幅增加，但設備使用壽命卻快速縮減。1980 年代平均建造一座晶圓廠只需 1 億美金，壽命週期約為 10 年，可是目前建造一座晶圓廠卻需要 30 億美金，而壽命週期卻只縮減為 5 年，預計未來晶圓廠的壽命週期將會更短，所以晶圓廠必須不斷提升良率 (Yield)、增大晶圓尺寸 (Wafer Size)、減小元件線寬 (Feature Size) 及改善機台生產能力等方式來降低生產成本。但依據 SEMATECH 的研究指出，未來的晶圓將難以只由改善製程缺陷、增大晶圓尺寸這兩種方式來達到大幅降低成本的目標，因為現在低良率的原因不再是經由污染物所造成，並且大尺寸的晶圓亦使均勻性 (Uniformity) 降低所致。


現階段大部分的晶圓廠是利用統計製程控制的方式 (Statistical Process Control, SPC) 來提高製程的穩定性及改善機台的生產力，但這種控制方式必須依賴事後檢測來追溯製程偏離與變異，然而此策略似乎面臨瓶頸，不但可靠度低、費用昂貴，在察覺問題發生時可能已經造成大量的晶圓報廢，嚴重影響晶圓廠的營運，無法達到每年降低 25%-30% 單位製造成本的目標。故根據半導體工業協會 (Semiconductor Industry Association, SIA) 及 SEMATECH 的研究指出，採用臨場 (In-situ) 感測器的先進製程控制 (Advanced Process Control, APC) 和先進設備控制 (Advanced Equipment Control, AEC) 技術，將可以克服此問題。

先進製程控制的引進在半導體界成為一項重要的課題，半導體廠引入 APC 技術的效益有：

- 1、降低製程或設備變異所導致的報廢晶片數

- 2、由系統即時偵測並診斷機台錯誤，正確掌握機台之狀況
- 3、增加設備利用率及達到預防性之安全操作目標等

其中 APC 大致可略分為模型基礎式製程控制(Model-Based Process Control, MBPC)與失誤偵測與分類(Fault Detection and Classification, FDC)兩項技術。MBPC 是線上即時整合機台設備、製程操作、狀態變數及晶片量測品質等變數，透過製程模式之預測估算，進行線上回饋調整製程參數；FDC 則強調即時預測機台或元件失效，透過失誤分類技術尋找失效或異常狀態之根本原因，以期掌握設備健康狀態(Equipment Health Condition)，進而達成以預測性維修為基準之設備維修機制，減少控片之使用並避免不必要之維修，以增加機台之產率及操作效率【1】、【2】、【3】。



電漿因其在材料處理上的特性，在半導體製程上扮演重要的角色：如濺鍍(Sputtering)、物理氣相沈積(Physical Vapor Deposition, PVD)、電漿輔助化學沈積(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)、乾蝕刻(Dry Etching)、表面清洗(Surface Cleaning)等皆有應用，尤其在線寬越來越精細的製程需求下，具備高均勻度、高效率的電漿源才能符合製程需求，然而高密度電漿源雖有許多優點，但複雜的反應機制卻可能因參數選取不當造成蝕刻結構的變化與傷害。電漿蝕刻製程參數中一般包括了射頻(Radio-frequency, RF)功率、操作壓力、氣體種類、流量、蝕刻溫度及腔體的設計等因素。而這些因素綜合的結果將直接或間接影響蝕刻的結果。射頻功率是用來產生電漿及提供離子能量的來源，因此功率的改變將影響電漿中離子密度、離子撞擊晶圓能量，進而對蝕刻結果發生影響；工作壓力也會影響離子的密度及撞擊能量；氣體流量的大小則會影響反應物及生成物滯留在腔體內的時間，增加氣體流量將減少蝕刻生成物滯留的時間，並可提供更多未反應的蝕刻反應物，因此改變氣體流量也會影響蝕刻速率。在影響蝕刻特性的參數中，一般作法為在實驗設計中選定可控的操作變數，

在改變輸入參數的情況下觀察蝕刻率 (Etch Rate)、均勻度、選擇率 (Selectivity) 等晶圓輸出結果【4】、【5】，而在設計參數中尋找一最佳化的配方。然而製程環境是隨時間變化，因此在未有 APC 技術的引進，對於如何提供製程一穩定的環境、機台健康狀況的掌握只賴於以往工程師的經驗。

在本項研究中為建立一電漿蝕刻設備模型，並對蝕刻製程參數做一控制，以提供蝕刻系統一穩定的環境。將電漿蝕刻製程分為設備模型與製程模型兩段，如圖 1-1 所示，而本論文著重在於電漿設備模型建立與控制上，即由設備的輸入參數 (壓力) 來描述製程參數 (電子密度) 間之關係，將電漿蝕刻系統細分為兩部分的主要原因在於，電漿系統的複雜性，單純由固定的設備參數去控制晶圓的品質，而並未對製程參數有所瞭解，對於晶圓良率、品質未有相對的提升。在蝕刻過程中來自於環境的變異，致動器性能的飄移皆會影響著製程參數，如電子密度、電子碰撞率等變化，即使對於相同的晶圓在不同時間所做之製程，所面對的製程環境也不盡相同，如何提供一穩定的製程參數變成為一項重要課題。然而面對此課題前首先必需對物理現象有所瞭解，因此電漿蝕刻設備模型的發展，透過區域平均模式模型 (Spatial Averaged Model , Global Model) 來描述機台設備輸入參數與電漿製程參數間關係，以利瞭解所面對的問題，模型中可調整參數有氣體流量、操作壓力、電漿吸收功率及部分環境參數，電漿蝕刻設備模型輸出有離子密度、電子密度、電子溫度及中性氣體密度等，經由電腦模擬便可瞭解在不同的設備參數下，電漿系統所發生的反應情形，並透過直交實驗表的設計尋找出主要影響電漿性質的參數，與一次一因子法對模型作一驗證及觀察在不同因子水準下系統變化情形。而控制部分則針對電漿成分中之關鍵參數『電子密度』做監控，因為電漿反應中，主要的能量吸收、反應機制大多由電子做為媒介，且在不同的環境變化下，電子密度能夠反映出系統的情形，故電子的行為可以用來掌控電漿系統之狀況。在本論文中控制電子密度採取兩種方法討論，對於電漿系統的動態模型，選擇以順滑模態模式 (Sliding Mode) 設計一單輸入 (電漿吸收功率)

單輸出(電子密度)之控制器,以掌握系統狀況及修正電子密度的偏移。另一方面以區域平均模式模型所建構出之模型,透過線性迴歸的方式設計一穩態控制器,相同的以電漿吸收功率作為輸入,控制電子密度在所設定的目標值上。模擬顯示,控制器皆能將系統的變異消除,使蝕刻系統在一穩定環境下進行。

本論文共分為六章,第一章簡介並說明研究動機、電漿研究之背景與論文架構,並對電腦模擬發展過程及相關電漿製程控制的研究做一描述;第二章是電漿基本原理,對於整個電漿系統作一簡述,其中包含說明電漿生成機制、蝕刻原理及變壓耦合式電漿源(Transformer Coupled Plasma, TCP)操作原理與加熱機制;第三章為模型的建立與模擬,利用區域平均模式模型描述電漿在氫氣、氯氣為工作氣體的應用,並分別就氫氣穩態模型及動態模型之輸出結果作觀察比較,及氯氣各粒子間關係的討論;第四章中說明實驗設計方法與實驗流程,並由實驗中印證氯氣模型的正確性及尋找主要影響系統的可控因子;第五章為控制理論的架構,首先就平滑模態的控制原理與系統線性化做一說明,並以此概念對氫氣設計控制器與進行模擬,接而之為利用反應曲面法的實驗設計概念,尋找一適合的氯氣迴歸模型,並針對此穩態模型設計一控制器來進行模擬;第六章則為對整個論文內容做一總結與對未來工作的展望。

1-2 文獻回顧

電漿模擬的發展約自 1980 年代早期開始，最初是探討氟化合物電漿化學 (Fluorocarbon Plasma Chemistry) 問題，到了 1980 年代中期，使用一維流體模式模擬電容式射頻電漿源 (Capacitive Coupled Plasma, CCP) 陸續被發表出來，1980 年代晚期至 1990 年代早期，電漿模擬中所使用的流體模式逐漸趨於成熟，因此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)、電漿輔助化學氣相沈積電漿源，而電子迴旋共振電漿源 (Electron Cyclotron Resonance, ECR) 及電感耦合式電漿源 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 的模擬隨後也相繼提出。在 1994 年 R. A. Stewart 等人發展了二維 (r, z) 流體模式電感式電漿源模擬中【6】，使用簡化的流體模型模擬出電子溫度、電子密度、電漿電位、游離率在空間中分佈狀況。此外 1992-1994 年，Peter L. G. Ventzek 等人發展了一個結合蒙地卡羅與流體模式之二維混合模式電漿模擬 (Hybrid Monte Carlo-Fluid Simulation) 【7】、【8】，模擬中包括電子的蒙地卡羅模擬 (Electron Monte Carlo Simulation)、電磁模組 (Electromagnetic Module)、流體方程式與化學反應方程式的動力學模擬 (Fluid-Chemical Kinetics Simulation) 及離線之電漿化學蒙地卡羅模擬 (Off-line Plasma Chemistry Monte Carlo Simulation) 模擬氣體種類包含 Ar 、 O_2 及 $Ar/CF_4/O_2$ 之混合氣體。模擬顯示電漿吸收功率及電漿密度最大值出現在偏離軸線的位置，且電漿吸收功率主要集中在肌膚深度 (Skin Depth) 內。隨著二維流體模擬電漿性質的進步，研究因進氣效應、抽氣效應、電漿腔體結構、感應線圈的設計也開始著手進行。

1994 年，C. Lee、M. A. Lieberman 與 D. W. Hess，發展了一個區域平均模式模型【9】，研究在 0.5 至 100mTorr 之高密度電漿源中，針對電漿中氧的物理性質及化學機制做模擬，考慮的粒子有 O_2^+ 、 O^+ 、 O^- 、 O_2 、 O 、 O^* (Metastable)，輸入參數有氣體流量、操作壓力及電漿吸收功率，並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情形，模擬結果發現氧電漿中主要之離子為 O^+ 非 O_2^+ ，中性氣體為 O ，且當電漿吸收功率大於 0.1 W/cm^2 時，主要帶負電之粒子為電子非 O^- 。1995 年，C. Lee 及 M. A. Lieberman 又以區域平均模式模擬高密度電漿源中 Ar 、 O_2 、 Cl_2 、 Ar/O_2 的放電狀況【10】，模擬發現分子氣體中電子溫度不再單純為工作壓力的函數，而是受電漿成分所影響。1997 年 Lieberman 等人再利用區域平均模式深入探討氯氣中各粒子成分間之關係【11】。

1995 年，Ventzek 等人發表電漿參數即時迴授控制應用於 ICP 系統的模擬研究【12】。主要是藉由一比例型控制器調整天線線圈 (Coil) 內圈與外圈的獨立射頻電源，在混和 $BCl_3/Cl_2/Ar$ 氣體所生成的電漿下進行討論，期以達到控制均勻性、電漿密度及蝕刻速率的目的。1998 年，Rauf 等人提出 VPEM (Virtual Plasma Equipment Model) 作為電漿即時迴授控制控制的環境，控制器的設計是利用反應曲面法 (Response Surface) 尋找出系統的關係式進而推導其控制法則【13】。由於 VPEM 模型所表示的電漿特性為半穩態，因此模擬的取樣時間必須大於 0.1 秒。模擬中致動器分別採用電感電源 (Inductive Power)、電容電源 (Capacitive Power)、電極電壓 (Electrode Voltage) 為輸入，模擬在 Ar 及 Ar/Cl_2 的反應氣體中，控制系統能有效控制致動器的飄移、環境因素干擾所造成的不穩定現象。2000 年，Partick 等人發表在變壓耦合式電漿源中偏壓控制的研究【14】。研究中經由實驗結果顯示，電漿功率、操作壓力、反應氣體組成成分對於鞘層電位有耦合的關係，因此以開迴路控制偏壓之功率產生器並無法達到控制蝕刻率之效果，閉迴路即時偏壓控制概念因而產生。量測裝置為一直接置於晶圓座下方的射

頻峰值電壓式感測器，實驗證明如此閉迴路設計不但可以獨立控制離子能量，亦可對於不同之匹配電路、電容電阻不匹配等狀況所造成蝕刻誤差加以補償。2001年，Cheng-Hung 等人利用 36 GHz 外差式毫微米波干涉儀，以非侵入式方法量測氫氣的電子密度【15】。依據電磁波穿透電漿時，因不同之電漿密度所造成的相位延遲來得知電子密度訊息，且毫米波波長比光波波長，可克服光學診斷中真空窗的污染問題。文中依據 Ziegler-Nichols 法則設計一比例積分型控制器 (PI Controller)，並以 $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 為目標值進行控制器設計，經由實驗獲得 k_p 和 k_I 分別為 0.72 及 1.15，最佳的取樣時間在 .075 秒至 0.225 秒間，致動器為射頻功率產生器，改變氣壓作為干擾源印證控制系統的效能，並設計一順向補償器使得射頻功率和電子密度的 overshoot 能被消除。2003 年，Cheng-Hung 等人繼續討論電漿即時控制問題在 Cl_2 上之應用【16】，致動器為 RF Source Power 與 Bias Power，控制對象為電漿中離子電流與離子密度，並討論開迴路與閉迴路控制狀況下對蝕刻率的影響，實驗顯示在閉迴路狀況下，對於製程的穩定性有較佳之輸出結果。此外亦有學者利用類神經網路之方式建構電漿蝕刻模型，網路中分輸入層、輸出層及隱藏層，透過實驗數據的資料來訓練神經網路，並設計適當控制器來達到期待的目標值【17】、【18】。

第二章 電漿基本原理與應用

2-1 電漿簡介

2-1-1 電漿之生成

最早在 1920 年代，Langmuir 等人首先研究電漿中的現象，而在 1929 年 Langmuir 使用了『plasma』來敘述此一離子化氣體的現象。因其型態不同於固、液、氣三態，故電漿稱為物質的第四態，就物理角度而言，電漿是一團帶正、負電荷之粒子與中性氣體分子所組合而成的狀態，而且在正常狀況下，正電荷之總數等於負電荷之總數。在半導體製程的電漿系統而言，電漿中的化學反應與電漿蝕刻結果取決於設備操作變數，例如：操作壓力、氣體種類、輸入功率、射頻頻率、腔體結構 等。電漿的產生主要是由電子從外加電磁場來獲得能量，並藉著非彈性碰撞來產生激發（Excitation）、解離性附著（Dissociative Attachment）、解離（Dissociation）、離子化（Ionization）、再結合（Recombination）反應，藉以生成二次電子、原子、分子、離子等物質，然而在解離碰撞中，電子可能與氣體離子有再結合作用，或者因為漂移及擴散而離開電場範圍等原因消失，因此當電子產生與消失的速率相等時，此時的電漿即可以達到穩定狀態。

以 Ar 作為說明，當電子獲得外界之能量成為高動能電子時，與碰撞氣體原子或分子產生游離，形成一正離子和一電子之反應如 2-1 式：

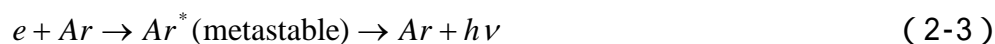


但電子在碰撞前的能量，需滿足電子在電場中累積到大於離子化所須的最低能量（Threshold Energy），此能量的累積量取決於電場和平均自由徑（Mean Free Path）的大小。平均自由徑是指電子平均移動多少距離就會碰撞到一個原子或分子，電子每經過一次碰撞，原先累積的能量就會消失，而需重新累積起，其中平均自由

徑和壓力成反比($\lambda_i = \frac{1}{n_g \sigma_i} \approx \frac{1}{330P} \text{ cm}$, n_g 表示中性氣體密度、 σ_i 為碰撞截面、 P 表壓力 (Torr))。因此，為使電子具有足夠的能量來游離中性氣體如反應 2-1 式，通常需施加能量於低氣壓的氣體內，而一旦電子的能量足夠發生游離反應時，在反應 2-1 中所產生的二個電子，會再被電場加速進一步產生解離而形成四個電子，如此周而復始。然而電子和正離子亦會再結合，再結合反應表示如下：



因此，當游離速率和結合速率相等時，電漿中的電子、離子對濃度即達到一穩定值，而形成一穩定狀態的電漿，電漿皆會放出光，即由反應 2-2 或 2-3 所造成。



電漿中所放出的光譜波長一般在可見光的範圍內，而波長與電漿內氣體的種類有極密切的關係。2-3 式為當原子或分子吸收外來的能量後，常會使一個或數個價電子從低能階遷躍到較高的能階，稱為激發，由於在高能階的電子不穩定，遲早會落回基態，而放出光子，稱為降激，放出的光子就是量測得到的電漿光譜，不同的粒子皆有特定的波長光譜，利用此光譜強度及特定波長即可判斷反應腔體中粒子密度及種類【19】。

2-1-2 電漿蝕刻機制

而在積體電路製造過程中，常需要在晶圓上定義出極細微尺寸的圖案，這些圖案主要的形成方式是藉由蝕刻技術來達成，將微影 (Micro-lithography) 後所產生的光阻圖案轉印至光阻下的材質上，以形成積體電路的複雜架構。電漿蝕刻方式可區分為物理性蝕刻及化學性蝕刻兩類，而依其反應機制又可細分四種蝕刻型態：

1、純物理性離子轟擊蝕刻 (Sputtering)：

純物理性蝕刻可視為一種物理濺鍍方式，它是利用輝光放電（Glow Discharge），將氣體如 Ar ，解離成帶正電的離子，再利用偏壓將離子加速，濺擊在被蝕刻物的表面，而將被蝕刻物質原子擊出。此過程乃完全利用物理上能量的轉移，故稱之物理性蝕刻。其特色為離子撞擊擁有很好的方向性，可獲得接近垂直的蝕刻輪廓，但缺點是由於離子是以撞擊的方式達到蝕刻的目的，因此光阻與待蝕刻材料兩者將同時遭受蝕刻，對於底層物質的選擇比很低，且被擊出的物質往往非揮發性物質，而這些物質容易再度沉積至被蝕刻物薄膜的表面或側壁。

2、純化學反應性蝕刻（Pure Chemical Etching）：

純化學反應性蝕刻則是利用電漿產生化學活性強的自由基，此自由基擴散至待蝕刻物質的表面，與待蝕刻物質反應產生揮發性之反應生成物，並被真空設備抽離製程腔體，因此種反應完全利用化學反應來達成，故稱化學反應性蝕刻。此種蝕刻方式類似於濕式蝕刻，只是反應物及產物的狀態由液態改變為氣態，並利用電漿來促進蝕刻的速率。因此純化學反應性蝕刻擁有類似於濕式蝕刻的優點及缺點，即高選擇比及等向性蝕刻。

3、離子能量催化蝕刻（Ion Energy Driven Etching）：

離子能量催化蝕刻，此反應包含蝕刻反應物及高能離子，電漿中的高能離子會加強蝕刻反應，離子被電漿鞘層（Sheath）中電場加速撞擊薄膜表面，破壞薄膜表面原子結構與原子間之鍵結，加速了薄膜表面材料的化學反應，此產物容易揮發成氣態分子，被真空系統抽離，因此蝕刻率較純化學性蝕刻為快。

4、抗蝕層離子蝕刻（Ion Enhanced Inhibitor Etching）：

抗蝕層離子蝕刻，薄膜表面在蝕刻反應進行時，同時會有鈍化反應在進行，這些鈍化反應的生成物會覆蓋在薄膜表面形成抗蝕層，阻止蝕刻反應物和薄膜反

應，此時離子在電漿鞘層中被電場加速加速，產生高能離子撞擊薄膜表面，可以清除抗蝕層產生高揮發性氣體產物離開薄膜表面，因在側壁的抗蝕層不易被清除，因此蝕刻凹槽底部處的蝕刻率較高，可以得到較佳的蝕刻側壁。但如果蝕刻側壁的抗蝕層厚度持續增加則會導致蝕刻測壁的角度增加，進而影響蝕刻結果【20】。

2-2 變壓耦合式電漿源 (TCP)

2-2-1 高密度電漿源

電容耦合式電漿源是最早利用射頻技術所發展出來的電漿系統，其利用加在相鄰兩側電極板上之射頻電壓以產生電漿，然而操作方式功率主要消耗在鞘層的電壓降，導致產生電漿的功率並不是很好，電漿密度通常在 $\sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 間，為提高電漿密度通常將其工作壓力操作 20 mTorr 至 2 Torr 間，因此反應主要掌控於自由基，製程可控性降低；而在高密度電漿蝕刻系統中，離子密度與活性基密度相近，離子密度在 10^{11} cm^{-3} 以上，因此製程反應可掌控於離子。高密度電漿蝕刻的優點為：

- 1、低壓下操作，粒子間碰撞的平均自由徑大，因此離子通過鞘層途中與其他粒子間碰撞機率減小，故有較佳的垂直性，如圖 2-1 所示。
- 2、高離子密度使得離子主控蝕刻過程，因此可減少甚至不需要聚合物 (Polymer) 的側壁保護，製程將變得更乾淨，且蝕刻後的輪廓更具非等向性。
- 3、高離子密度可減少偏壓之使用，並且相對於電容式電漿源，此高密度電漿源有較低之電漿電位 (Plasma Potential) 約 $\sim 10\text{V}$ ，因而降低或消除電漿所導致的元件損傷，而蝕刻速率也因離子密度的增加而增加。

4、由於離子密度與離子能量並無關係，因此製程可變性加大。

電容式電漿源與高密度電漿源特性比較如表一。產生高密度電漿的基本原則為讓自由電子在反應腔體內所滯留的時間變長並獲得能量，如此一來便能增加自由電子與氣體分子間的碰撞機率，電漿的解離程度才能提高。增加自由電子在反應腔體內所滯留時間的方法可為：

a、加入固定的磁場

b、利用磁場來形成環狀的電場

因此高密度電漿源有：電子迴旋共振（ECR）、感應耦合式電漿（ICP）或變壓耦合式電漿（TCP）磁場強化活性離子蝕刻（MERIE, Magnetic Enhanced Reactive Ion Etching）等數種型態【21】。

2-2-2 變壓耦合式電漿源加熱機制

目前最普遍使用的高密度電漿源為變壓耦合式電漿源，使用射頻功率源，結構如圖 2-2 所示，變壓耦合式電漿源主要的工作原理為在腔體外的線圈經通入一時變電流，經由安培定律（*Ampere's law*）2-4 式：

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} = \vec{J}_{coil} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2-4)$$

其中 \vec{B} 為感應磁場， \vec{J} 為線圈電流密度， μ_0 為真空中的磁導率。當感應線圈通入為 θ 方向時變的電流時，在腔體內感應出 r 方向與 z 方向的磁場，再由法拉第定律（*Faraday's law*）2-5 式：

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-5)$$

其中 \vec{E} 為感應電場，可以發現感應的 r 、 z 方向時變磁場會感應出 θ 方向的感應電場，工作氣體的游離電子經此 θ 方向的感應電場加速以獲得能量，並發生游離再結合等反應，達到自我維持 (Self-sustain) 的狀態。電流密度 \vec{J} 、感應磁場 \vec{B} 、感應電場 \vec{E} 三者關係如圖 2-3 所示。

電子受感應電場加熱的機制可分為兩類，一是發生於肌膚深度內的碰撞 (歐姆) 加熱，再則發生於主電漿 (Bulk Plasma) 中電子與鞘層間的能量轉換，由於此機制為低碰撞頻率的情況下才越顯顯著，故稱非碰撞加熱 (Collisionless heating) 或非區域性加熱 (Nonlocal heating)。

1、歐姆加熱：

一電子於時變電場中，前半週期受電場加速，後半週期因受電場方向反轉而減速，經一週期該電子淨能量並無改變，為要有功率的傳遞，必須要某種機制的存在，以打破電子在電場中一往一復的規律運動。而當加入與中性氣體碰撞因素時，電子有機會在電場方向發生改變的時候，由於碰撞而改變其行徑方向，如此便能持續獲得電場加速，但碰撞發生過於頻繁，任一半週期內電場方向雖未改變，反而電子方向變化多次，平均下來亦無法獲得加速。可見碰撞頻率過高或過低時，碰撞加熱的反應並不顯著，而當碰撞頻率等於 RF 頻率時，碰撞加熱效果最好。基本推導如下，考慮一維電子之運動，因為離子質量遠大於電子，相較於電子，離子從電場中獲得加速得到的能量很小，因此假設電漿中離子固定不動，只觀察電子在 x 軸的運動行為的運動行為，則電子的受力方程式為 2-6 式：

$$m \frac{d\bar{u}_x}{dt} = -e\vec{E}_x - mv_m \bar{u}_x \quad (2-6)$$

u_x 與 E_x 表示為 x 軸方向電子的運動速度與所受電場， v_m 為電子與其他粒子間碰撞頻率。對於平均週期內電漿的吸收功率可由 2-7 式表示：

$$P_{abs} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{J}_{TX}(t) \cdot \vec{E}(t) dt = \frac{1}{2} \text{Re}(\tilde{J}_{TX} \cdot \tilde{E}) = \frac{1}{2} |\tilde{E}|^2 \frac{\epsilon_0 v_m \omega_{pe}^2}{\omega^2 + v_m^2} \quad (2-7)$$

J_{TX} 為電漿之感應電流強度，由 2-7 式可觀察出當 $\omega = v_m$ 時，電漿吸收功率有最大值【22】。其中 ϵ_0 為真空介電常數（Permittivity of Free Space）， \tilde{E} 為振幅大小， ω 為角頻率， ω_{pe} 稱為電子的電漿頻率（Electron Plasma Frequency， $\omega_{pe} = (\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e})^{1/2}$ ）。

2、非碰撞加熱：

在低工作壓力下，由於電子的平均自由徑變大，使得在腔體中電子與中性粒子的碰撞頻率變小，根據上述的碰撞加熱機制，由於碰撞頻率的下降，將導致功率傳遞越趨近於零。然而在一般的應用中發現，在低工作壓力下仍有相當的功率傳遞現象，那是由於雖無碰撞反應來打破電子的規律運動，但仍有另一機制來達成電子加熱之效果。圖 2-4 為非碰撞加熱機制的示意圖，設電場隨軸向及時間的分佈為 2-8 式：

$$E_\theta(z,t) = E_0 e^{-\frac{z}{\delta}} \sin(\omega t + \phi_0) \quad (2-8)$$

其中 E_0 為在 $Z=0$ 的電場值、 δ 為肌膚深度、 ϕ_0 為電子初始看到的電場相位。考慮鞘層外 Z_0 上的一電子向鞘層移動，由於鞘層電位較低而受到排斥使電子轉向離開鞘層，其間沒有發生碰撞，電子速度僅單純軸向的改變，在加上電子通過肌膚深度的時間比 RF 電場週期短時，電子將受到同一方向電場的加速而獲得能量【23】。

此外電感式電漿源的功率操作模式可分為兩種：

a、電感模式（H Mode）

b、電容模式 (E Mode)

其操作模式在輸入功率較小時為電容模式，輸入功率較大時為電感模式，除此外也可由電漿密度來判斷，然而感應電場在電漿中所造成與 RF 電流相反方向的電漿電流必須大於一低限電流值 (Threshold Current) ，才能使電漿產生之機制操作在電感耦合模式。換言之，電感式高密度電漿源在較低輸入功率之下，其產生電漿機制是電容耦合模式；而隨輸入功率增加產生足夠的電漿電流，而轉換為由電感耦合模式主導，由於電感耦合模式其功率吸收較電容模式來的佳，此時電漿密度將顯著增加【24】。



第三章 模型建立與分析

3-1 區域平均模式基本原理

3-1-1 模型假設條件

區域平均模式的發展【9】【10】【11】，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了解電漿中各化學物質的組成，並作為配方上的參考依據，因此在使用區域平均模式時有下列 6 項假設條件：

- 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} ，如圖 3-1 (a) 所示。
- 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^- 在腔體中呈拋物線分佈，在靠近腔壁的鞘層處密度為零，如圖 3-1 (b) 所示。在腔體中 $n_i = n_e + n^-$ ，而在鞘層中 $n_i = n_e = n_{is}$ 。
- 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 (Electron Energy Distribution Function , EEDF) 為馬克斯威爾分佈 (*Maxwellian* Distribution) 。
- 6、假設離子溫度 T_i 為 $0.5 eV$ ，中性氣體溫度為 $600K$ 。

區域平均模式模型主要是利用解各粒子間的粒子平衡方程式及電子的能量平衡方程式，來求得腔體內各粒子穩態的平均密度及電子溫度，對單原子氣體的區域平均模式模型分析中，電子溫度是氣體壓力及有效電漿尺寸乘積之函數，電子密度則跟電漿吸收功率成正比；分子氣體中，各種粒子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。動態區域平均模式模型分析理論亦是考慮粒子平衡與電子能量平衡方程式。

3-1-2 粒子與能量平衡方程式

a、粒子平衡方程式

1、中性粒子平衡方程式：

輸入腔體內之氣體粒子 (source) + 在腔體內反應生成之粒子 =
停留在腔體內之粒子 + 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：

在腔體內反應生成之離子 =
停留在腔體內之離子 + 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。

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，負離子唯一的損失途徑只有經由反應。

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_{ev} 。
- 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 3-1 式表示：

$$P_{abs} = P_{ev} + \sum_{i=1}^r P_{iw,i} + P_{ew} \quad (3-1)$$

r 表示空間中粒子的種類，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 3-2 式所示：

$$\varepsilon_L = \frac{1}{v_{iz}} (v_{iz} \varepsilon_{iz} + \sum_{k=1}^{N_{exc}} v_{exc,k} \varepsilon_{exc,k} + v_{elas} \frac{3m}{M} T_e) \quad (3-2)$$

上式中包含電子的游離 (v_{iz} 、 ε_{iz})、激發 (v_{exc} 、 ε_{exc})、彈性碰撞 (v_{elas}) 等反應的反應速度與損失的能量。其中 $v_{iz} = \langle \sigma_{iz} v \rangle n_g$ 等為碰撞頻率，通常會以 $k = \langle \sigma v \rangle$ 來表示反應速率，如表二所示， 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_{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)。對於單原子粒子由 3-2 式可觀察出 ε_L 為電子溫度之函數。歸納上述，對於整個空間電子因與中性分子碰撞所造成之能量損失為 3-3 式所示， V 為腔體體積：

$$P_{ev} = en_e V \sum_{i=1}^r v_{iz,i} \varepsilon_{L,i} \quad (3-3)$$

2、對離子與電子因撞擊腔體而造成之能量損失由 3-4, 3-5 式表示：

$$P_{iw,i} = en_{is,i} u_{B,i} A \varepsilon_{iw,i} \quad (3-4)$$

$$P_{ew} = en_{es} u_B A \varepsilon_{ew} \quad (3-5)$$

其中 $n_{is,i}$ 為離子在鞘層中之密度， u_B 為玻姆速度 (Bohm Velocity, $u_B = (\frac{eT_e}{M})^{\frac{1}{2}}$)， A 為腔體之總表面積， $\varepsilon_{iw,i}$ 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 $2T_e$ 。

3-2 Ar 區域平均模式模型建立

3-2-1 穩態模型之推導

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，此外電漿是呈電中性（quasi neutral），所以在 Lieberman 的研究中考慮的是電子粒子平衡及電子能量平衡之穩態方程式【22】、【25】，其假設系統到達穩態時，所有對時間的變化量可設為零。

1、穩態粒子平衡方程式為 3-6 式：

$$n_e u_B (2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R) = k_{iz} n_g n_e \pi R^2 L \quad (3-6)$$

在上述等式左邊表示粒子經由腔壁而損失之部分，等號右邊為在腔體內經由游離反應而產生的粒子。

2、穩態之電子能量平衡方程式為 3-7 式：

$$P_{abs} = e u_B (2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R) n_e (\varepsilon_{iw} + \varepsilon_{ew}) + e V k_{iz} n_e n_g \varepsilon_L \quad (3-7)$$

在上述等式右邊第一項表示粒子經撞擊腔壁而損失之能量，第二項表示產生一電子離子對損消耗的能量。 R 、 L 分別表示腔體半徑與高度、 n_e 為電子密度， T_e 為電子溫度， k_{iz} 為游離速率， n_g 為氬氣密度， k_{iz} 為根據電子速度分佈所得之反應速率常數。 ε_{iz} 及 ε_{ew} 為離子、電子撞擊腔體表面損失之能量。電漿腔體密度與鞘層中電漿密度的關係 h_R 、 h_L 是根據 Godyak 與 Maximov 利用解擴散方程式求得在鞘層中電漿密度與中心區域電漿密度之比值可以約略分為：

1、低氣壓 ($\lambda_i \geq (R, L)$)：平均自由徑遠大於腔體半徑以及高度，此時 3-8 式：

$$\begin{cases} \frac{n_{is}}{n_g} \approx 0.5 & L \ll R \\ \frac{n_{is}}{n_g} \approx 0.4 & L \gg R \end{cases} \quad (3-8)$$

2、中等氣壓 ($(R,L) \geq \lambda_i \geq (\frac{T_i}{T_e})(R,L)$) : 平均自由徑小於腔體半徑以及腔體高度時

3-9 式 :

$$\begin{cases} h_L = \frac{n_{is,L}}{n_g} \approx 0.86(3 + \frac{L}{2\lambda_i})^{-1} \\ h_R = \frac{n_{is,R}}{n_g} \approx 0.8(4 + \frac{R}{\lambda_i})^{-1} \end{cases} \quad (3-9)$$

3、高氣壓 ($\lambda_i \leq (\frac{T_i}{T_e})(R,L)$) : 平均自由徑遠小於腔體半徑以及腔體高度時 3-10

式 :

$$h_L = \frac{n_{is,L}}{n_g} \approx \left[1 + \left(\frac{1}{\pi} \frac{u_B}{D_a} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3-10)$$

D_a 為 ambipolar diffusion coefficient , 而在 TCP 系統為中等操作壓力 , 故使用第二個條件之 h_L 、 h_R , 經整理得 3-6 式得 3-11 式 :

$$\frac{k_{iz}(T_e)}{u_B(T_e)} = \frac{1}{n_g} \frac{2RL}{Rh_L + Lh_R} \quad (3-11)$$

在上式中 , 等號左邊項是電子溫度的函數 , 右邊項為中性粒子密度與腔體特徵尺寸的函數 , 與輸入之功率大小無關 , 故可推算得電子溫度。定義

$\varepsilon_T = \varepsilon_L + \varepsilon_{iw} + \varepsilon_{ew}$, 其中 $\varepsilon_{iw} = V_s + \frac{1}{2}T_e$, $V_s = \frac{T_e}{2} \ln(\frac{M}{2\pi m})$, 化簡 3-7 式可得 3-12

式 :

$$P_{abs} = eu_B(2\pi R^2 h_L + 2\pi RL h_R) n_e \varepsilon_T \quad (3-12)$$

在由 3-11 式電子溫度確定後可得電子密度 3-13 式 :

$$n_e = \frac{P_{abs}}{eu_B \varepsilon_T (2\pi R^2 h_L + 2\pi RLh_R)} \quad (3-13)$$

對上述二式分析以腔體特徵尺寸，半徑 17.75 cm 高 15 cm 進行模擬，結果如圖 3-2、3-3、3-4 所示，在圖 3-2 中，操作在 5 mTorr 之氬氣電子密度，隨電漿吸收功率呈線性之增加。在 3-3 圖中，固定電漿吸收功率於 250W，改變工作壓力時，可觀察出隨工作壓力的上升，電子密度亦隨之增加，但並非成線性之增加，主要是在高工作壓力下，電子能量會降低，而影響游離率。圖 3-4 中，電子溫度隨工作壓力的增加而遞減，因在高工作壓力下粒子平均自由徑較小，碰撞率增加，故維持粒子平衡所需要電子溫度會較低。

3-2-2 動態模型之建立

在動態區域平均模式模型中，相同的考慮粒子平衡方程式及能量平衡方程式，並且重新加入中性氣體、離子、氣體流量於整個模型一起討論，使模型能夠符合實際狀況。下述的動態模型共包含四個狀態變數，分別為氬氣氣體密度 n_{Ar} 、氬氣離子密度 n_{Ar^+} 、電子密度 n_e 、電子溫度 T_e ，模型中相關係數在表二、三中描述，而模型的敘述如下：

1、粒子平衡：

$$\frac{dn_{Ar}}{dt} = q - k_{iz} n_e n_{Ar} + k_w n_{Ar^+} - k_r n_{Ar} \quad (3-14)$$

$$\frac{dn_{Ar^+}}{dt} = k_{iz} n_e n_{Ar} - k_w n_{Ar^+} - k_r n_{Ar^+} \quad (3-15)$$

$$\frac{dn_e}{dt} = k_{iz} n_e n_{Ar} - k_w n_e - k_r n_e \quad (3-16)$$

2、能量平衡式：

$$V \frac{\partial(\frac{3}{2}n_e k_B T)}{\partial t} = P_{abs} - eu_B(2\pi R^2 h_L + 2\pi RLh_R)n_{Ar^+}(\varepsilon_{iw} + \varepsilon_{ew}) - eVn_{Ar}n_e(k_{iz}\varepsilon_{iz} + k_{ex}\varepsilon_{ex} + k_{el}\frac{3m}{M_{Ar}}T_e) \quad (3-17)$$

其中 $k_{el} = 10^{-15}(0.514 + 5.51T_e + 22.9T_e^2 - 6.42T_e^3 + 6T_e^4)$, k_B 為 Boltzmann 常數 , q 為單位體積之氣體流量 ($q = \frac{Q}{V}$) , Q 為氣體輸入之總流量 (單位 *sccm*) , $1sccm = 2.69 \times 10^{19}$ 分子/min , V 為腔體體積 , $k_r = \frac{1}{\tau}$, τ 為粒子停留於腔體中的時間常數 , 可用 3-18 式表示 :

$$\tau = \frac{V}{S} = \frac{V}{\frac{Q}{P}} = \frac{PV}{Q} \quad (3-18)$$

S 為真空幫浦的抽氣速率 (單位 *liter/sec*) 與氣體流量存在 $Q = PS$ 之關係 , P 為操作壓力。由上述關係式可知在腔體體積固定狀況下 , 壓力越大則粒子停留於腔體中的時間越長 , 同理 , 流量越大則粒子停留的時間則縮短。對 3-14、3-15、3-16、3-17 式做計算 , 並對穩態之值繪於圖 3-2、3-3、3-4 , 並與穩態模型做比較後可得相同的結果 , 其中電子密度平均誤差 $2.43 \times 10^{-2} \%$, 電子溫度平均誤差 $8.97 \times 10^{-4} \%$, 此外並以電漿吸收功率及操作壓力為軸繪圖於 3-5、3-6 , 可發現電漿吸收功率對電子溫度並無影響。最後整理系統的動態模型表示為 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u$ 之形式 , 如下所示 :

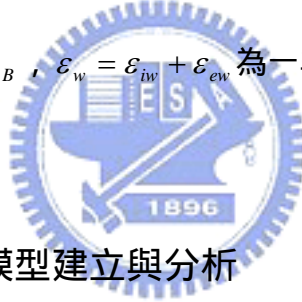
$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ f_3(\mathbf{x}) \\ f_4(\mathbf{x}) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} q - k_{iz}x_1x_3 + k_w x_2 - k_r x_1 \\ k_{iz}x_1x_3 - k_w x_2 - k_r x_2 \\ k_{iz}x_1x_3 - k_w x_3 - k_r x_3 \\ -\frac{2}{3}k_w \varepsilon_w x_4 - \frac{2}{3}x_1(k_{iz}\varepsilon_{iz} + k_{ex}\varepsilon_{ex} + k_{el}\frac{3m}{M_{Ar}})x_4 - k_{iz}x_1x_4 + (k_w + k_r)x_4 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ g(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{2}{3} \frac{1}{V \varepsilon x_3} \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

$$\text{狀態變數 } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{Ar} \\ n_{Ar^+} \\ n_e \\ T_e \end{bmatrix}, u = P_{abs} \quad (3-21)$$

其中 $k_w = \frac{2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R}{V} u_B$, $\varepsilon_w = \varepsilon_{iw} + \varepsilon_{ew}$ 為一非線性系統。



3-3 Cl_2 區域平均模式模型建立與分析

對於氯氣電漿的區域平均模式模型同樣利用粒子平衡與能量平衡方程式，化學反應速率及反應臨界能如表二、三所示。由於氯氣為分子氣體，其在電漿中主要粒子有 Cl_2 、 Cl 、 Cl_2^+ 、 Cl^+ 、 Cl^- 及電子，模型描述如下：

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} = \frac{dn_{Cl_2}}{dt} &= q - k_1 n_e n_{Cl_2} - k_2 n_e n_{Cl_2} - k_3 n_e n_{Cl_2} - k_4 n_e n_{Cl_2} - k_5 n_e n_{Cl_2} + k_7 n_{Cl^-} n_{Cl_2^+} \\ &+ \frac{1}{2} k_{10} n_{Cl} + k_{w2} n_{Cl_2^+} - k_r n_{Cl_2^+} \end{aligned} \quad (3-22)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_2}{dt} = \frac{dn_{Cl}}{dt} &= k_2 n_e n_{Cl_2} + 2k_4 n_e n_{Cl_2} + k_5 n_e n_{Cl_2} - k_6 n_e n_{Cl} + k_7 n_{Cl^-} n_{Cl_2^+} + 2k_8 n_{Cl^-} n_{Cl^+} \\ &+ k_9 n_e n_{Cl^-} - k_{10} n_{Cl} + k_{w1} n_{Cl^+} - k_r n_{Cl} \end{aligned} \quad (3-23)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{dn_{Cl_2^+}}{dt} = k_1 n_e n_{Cl_2} - k_7 n_{Cl^-} n_{Cl_2^+} - k_{w2} n_{Cl_2^+} - k_r n_{Cl_2^+} \quad (3-24)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = \frac{dn_{Cl^+}}{dt} = k_2 n_e n_{Cl_2} + k_3 n_e n_{Cl_2} + k_6 n_e n_{Cl} - k_8 n_{Cl^-} n_{Cl^+} - (k_{w1} + k_r) n_{Cl^+} \quad (3-25)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = \frac{dn_{Cl^-}}{dt} = k_3 n_e n_{Cl_2} + k_5 n_e n_{Cl_2} - k_7 n_{Cl^-} n_{Cl_2^+} - k_8 n_{Cl^-} n_{Cl^+} - k_9 n_e n_{Cl^-} \quad (3-26)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_6}{dt} = \frac{dn_e}{dt} = & k_1 n_e n_{Cl_2} + k_2 n_e n_{Cl_2} - k_5 n_e n_{Cl_2} + k_6 n_e n_{Cl} + k_9 n_e n_{Cl^-} - k_{w1} n_{Cl^+} \\ & - k_{w2} n_{Cl_2^+} - k_r n_{Cl^+} - k_r n_{Cl_2^+} \end{aligned} \quad (3-27)$$

$$\begin{aligned} V \frac{\partial(\frac{3}{2} n_e k_B T)}{\partial t} = & P_{abs} - e(2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R)(u_{B,Cl^+} n_{Cl^+} + u_{B,Cl_2} n_{Cl_2^+})(\varepsilon_{iw} + \varepsilon_{ew}) \\ & - Ven_e(k_2 n_{Cl_2} \varepsilon_2 + k_3 n_{Cl_2} \varepsilon_3 + k_6 n_{Cl} \varepsilon_6) - Vek_4 n_e n_{Cl_2} \varepsilon_5 \\ & - Ven_e n_{Cl_2} (k_1 \varepsilon_1 + 3k_{11} \frac{m_e}{m_{Cl_2}} T_e) \end{aligned} \quad (3-28)$$

模擬結果如圖 3-7、3-8、3-9、3-10、3-11、3-12、3-13、3-14，在模擬 Cl_2 區域平均模型中，模擬圖可分為中性氣體與帶電粒子兩類。第一類在中性氣體裡，圖 3-7 中， 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，使得經由電子碰撞造成的解離反應增加所致；隨操作壓力上升 Cl_2 密度成線性增加，則是因為供給來源的粒子增多所影響。圖 3-8 裡， Cl 的來源主為經由電子解離 Cl_2 所產生，故密度隨電漿吸收功率增加而上升；在較高的操作壓力下，因為提供電漿系統能量不足以解離更多的 Cl_2 ，故 Cl 密度並未對壓力的增加而線性增加，因此在模擬中可發現高操作壓力下粒子的增加有呈現趨緩現象。第二類為帶電粒子，首先在圖 3-9 中， Cl_2^+ 的密度隨操作壓力上升是因為主要供給來源 Cl_2 增加，此外隨著電漿吸收功率的增加帶電粒子均有增加的現象。圖 3-10 所顯示為 Cl^+ 的變化情形，圖中可以明顯觀察出密度隨著壓力的變化情形， Cl^+ 密度在低壓部分有先隨壓力的上升而上升，隨之在壓力持續增加下，密度即隨壓力上升而下降，主要是在低壓時外界供給系統能量足以游離反應所致，故在高壓時 Cl^+ 密度隨之下降。圖 3-11 所顯示為 Cl^- 密度變化情形，由表二中可以發現 Cl^- 的生成主要來自於 k_3 及 k_5 兩反應式，故在壓力上升時 Cl^- 隨之增加，相同的隨電

漿吸收功率增加，帶電粒子均有增加的現象。圖 3-12 裡所顯示為電子密度的變化情形，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增加，而是呈現趨降的現象，主要也是因在高操作壓力下電子能量低，影響游離率所致，且電子與粒子間碰撞是隨壓力上升而增加，故密度隨壓力上升而下降。此可由圖 3-13 中電子碰撞率觀察此現象，因為在高操作壓力下粒子平均自由徑變小，粒子間的碰撞增多，故高操作壓力有較多的粒子碰撞機會。此亦影響著電子溫度的狀況如圖 3-14，一方面在高操作壓力時所需維持粒子平衡的電子溫度不需如在低操作壓力狀況下高，另一方面則因電子在高操作壓力下碰撞機會變多，以致平均每電子所帶的能量不如低操作壓力的環境，但電子溫度不同於 Ar 為 Cl_2 的電子會隨電漿吸收功率而變化，不再只是簡單的壓力函數。此外在帶電粒子中由模擬結果主要可發現，帶電粒子裡 Cl^+ 與 n_e 對於電漿吸收功率與操作壓力有相同的變化情形，相同的 Cl_2^+ 與 Cl^- 隨電漿吸收功率與壓力變化亦有相同的趨勢，此部分與文獻所討論相同【26】、【27】、【28】。因此在高電漿吸收功率、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；低工作壓力下能使得粒子間平均自由徑變大，離子通過鞘層時不因與其他粒子間的碰撞而失去垂直性，所以有較佳的蝕刻輪廓。圖 3-15 所表示的為在不同之再結合係數下對電子密度的影響性，再結合係數 (R_{rec}) 所表示為 Cl 經由擴散效應，在電漿腔壁發生結合成 Cl_2 的現象，此係數由環境因素所決定，圖中顯示當 R_{rec} 較大時，電子密度有明顯隨壓力上升而密度下降的現象，此為腔體中的 Cl 原子有較多的粒子經由腔壁結合為 Cl_2 或經蝕刻反應消耗 Cl 所致，因此相當於增加工作壓力的效果，不過在低壓部分電子密度隨壓力有上升狀況，此部分為外界提供足夠能量給系統所致。反觀當 R_{rec} 值較小時，電子密度就無明顯的下降現象。

第四章 實驗設計與分析

4-1 實驗設計法【29】、【30】、【31】

無論是最終的產品或製程中的中間產物皆存在有目標值，決定產品合格與否的允差。田口式實驗設計即基於上述之理由發展而出的一套實驗設計法則，其主要目的為以有限的實驗來獲得最多實驗結果並有效分析之，故田口式實驗是一種很有效率的實驗設計法則。田口實驗將傳統實驗設計中因子的交互作用視為雜音因素，因此適合在可控因子交互作用所佔比例不大的實驗上，其主效果分析將提供實驗最佳的因子水準組合，因此在實驗設計法則中最主要的就是依據不同之品質特性型態訂出適當的訊號雜訊比（SN ratio），來加以分析討論，根據 SN 比計算公式，依據品質特性型態分別有：

1、望大特性型：

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad (4-1)$$

2、望小特性型：

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4-2)$$

3、望目特性型：

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - T)^2 \right) \quad (4-3)$$

其中 y_i 為產品特性量測值、 T 為產品目標值，所計算出 η 即為 SN 比，SN 比的習慣用法是越大越好，這和品質的習慣用法相同。直交性實驗能進行多種條件的比較，且實驗的可靠度和再現性都很高，普遍常用的 L_9 就是直交表的一種形式，如表四所示。當中 A、B、C、D 代表著不同實驗因子，阿拉伯數字 1、2、3 表示不同因子裡的不同 3 個水準值大小，表內每行間都呈現直交之關係。

直交表資料分析中包含三部分：1、因子效果估計；2、變異數分析表；3、實驗驗證。

1、因子效果估計：

以表四為例， y_{ij} 為實驗結果、 $\eta_1 \sim \eta_9$ 為訊號雜訊比，首先計算 A、B、C、D 的平均反應值填於輔助表表五內，A 的第一水準 A_1 平均反應值 $m_{A1} = \frac{(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)}{3}$ ，以此類推。當計算出各參數的反應值後，即可以評估各因子對結果的影響趨勢，並繪出因子效果圖來判斷最佳的組合方式與因子間的相對重異性。

2、變異數分析表：

以表六為例，依據 SN 比結果，利用變異數分析表探討各控制因子對品質特性的影響程度，並分析影響的大小其是否為主要影響因子，藉以掌握最有效的改良對策並做出正確的分析。首先先求出整個實驗的總平方和 4-4 式：

$$SS_{Total} = \sum \eta_i^2 - 9 \times \eta_{mean}^2 \quad (4-4)$$

η_{mean} 為所有 SN 比的平均值，接下來求 SS_i 為因子平方和 4-5 式：

$$SS_i = \sum_{i=1}^3 r_A (m_{Ai} - m)^2 \quad (4-5)$$

r_A 表示每一水準下之實驗個數，如 L_9 表中每一水準下實驗數為三次，得到 SS_i 後比較各因子的平方和，並將影響較小的因子合併視為誤差。實驗的自由度即有關獨立參數之個數，一個 L_9 的實驗中就有 9 個自由度，但總平均也又一個自由度，因此總平均和的自由度 $9-1=8$ ，各因子自由度為水準減一。均方和 (MS_i) 等於各平方和除以相對應自由度。最後將各因子的均方和分別除以誤差均方和就可以得到個別的 F 值，及計算因子的貢獻率 ρ 。 F 值通常是用來決定一個特定因子效果的信賴程度是否為真或為一隨機出現的影響，當某因子的 F 大於 $F_a^b(\alpha)$ 時表示該因子對實驗有明顯影響性，在信賴度為 $100 \times (1-\alpha)\%$ 時， $F_a^b(\alpha)$ 值可藉由查表可知， α 表示實驗的預估值在生產線上會有 $\alpha\%$ 的錯估機會，而 a、b 分別表示為誤差的自由度和因子自由度，在工程的應用中 F 大於 4 即表示因子對系統有明顯之影響。由前述信賴度判斷後，進一步用信賴度 F 值來定義信賴界限。因為要利用少數的實驗數據去預估其他生產的結果且經得起考驗，此時推定值必

須落在信賴界限中心值或左右某範圍區域內（推定值±信賴界限），才可認定這推定值是值得信賴的，而信賴界限定義為 4-6 式：

$$\hat{m} = \pm \sqrt{F_a^b(\alpha) \frac{MS_e}{n}} \quad (4-6)$$

其中 n 為有效反覆數，表示 m_{A1} 、 m_{A2} 是等多少個的平均數，在本文中 $n = 3$ 。此外因為使用 L_9 直交表分析實驗數據時，所有的自由度都用來估計因子效果，所以沒有自由度可估計誤差因子，因此將平方和較小的因子視為誤差。

3、實驗驗證：

直交表實驗中最後一個步驟，即預測與實驗驗證，此為最終亦為最重要的步驟，目的在於驗證直交表實驗加法模式是否成立，以及直交表實驗所建議最佳設定是否有確實帶來預期效果，此步驟首先以變異數分析整理各因子對產品的影響性，再將主要影響變異數的因子選出，並用其作為加法模式的預測。以這些因子作為後續最佳化的 SN 比，以 η_{opt} 表示，若 A1、B1、C1、D1 為最佳實驗組合時，且由變異數分析中發現僅 A、B、C、D 因子為主要影響變異的可控因子，則預測最佳化 SN 比如 4-7 式所示：

$$\eta_{opt} = m + (m_{A1} - m) + (m_{B1} - m) + (m_{C1} - m) + (m_{D1} - m) \quad (4-7)$$

最後將預測之 SN 比 η_{opt} 與實驗之 SN 比 η_{real} 相比較，若兩者在 $\hat{m} = \eta_{real} - \eta_{opt}$ 的範圍內，表示加法模式在各參數關係上是恰當，反之則為不恰當，其可能的原因有：

- a、因子間有強烈的交互作用
- b、不良的品質特性選取
- c、因子與水準選取的不恰當
- d、實驗過程中發生錯誤

4-2 實驗之準備與分析

實驗採用 NDL Lam TCP 9400SE 之機台作為研究對象，機台的結構如第二章所述，有兩組獨立控制的功率產生器，分別獨立控制電漿密度與離子能量，並在機台上裝置一能提供電漿製程參數的感測器，如圖 4-1 所示，圖中左側為蝕刻機台，右側為含感測器、電腦與能置於無塵室之推車。自激發電子電漿共振儀(Self Excited Electron Plasma Resonance Spectroscopy, SEERS)，此感測器工作原理為經由量測電漿中的 RF 電流，並非侵入式的量測，故對製程影響性甚小，圖 4-2 所示。此感測器能提供電漿製程中電子密度，電子碰撞頻率等製程參數的在線測量，故經由 SEERS 實施電漿蝕刻製程及設備的在線測量，進一步能提供電漿蝕刻製程及設備的 APC 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。晶圓的準備方面以六吋矽晶圓為基材，並送件請 NDL 代為加工，在晶圓上分別以爐管沈積 1000Å 的 SiO_2 與 5000Å 的 Poly-Si，接著以 NDL I-line 光學步進機作微影曝光的動作，在晶圓上做出不同線寬的圖樣，此圖樣最小線寬為 $0.4\ \mu m$ ，最後則經由實驗設計的方式作電漿模型與製程參數間的討論。

實驗首先透過一次一因子實驗方法，對於可控制參數每次只改變一個可控參數，觀察參數的變化對於系統特性的影響。圖 4-3、4-4、4-5 為可控參數的變化對於電子密度的影響狀況，圖中可觀察出影響電子密度較顯著是 source power 與 pressure 的改變，bias power 的改變對電子密度影響並不大，由此可發現 TCP 系統裡兩組 RF power 是分別獨立控制電漿密度與離子能量的設計。當 source power 增加時代表電漿吸收功率的增加，故電子密度增加；當操作壓力升高時因粒子平均自由徑減小，因碰撞而損失的機會變大，故電子密度減少，此與模擬圖 3-12 相吻合。圖 4-6、4-7、4-8 為可控參數的變化對於電子碰撞率的影響狀況，不同於電子密度為可控因子 source power、bias power、pressure 的改變皆對於電子碰撞率有明顯的影響，仍與模擬圖 3-13 相吻合，當壓力上升時電子碰撞率隨之增

加，source power 增加時影響電子溫度而減少碰撞率。

此外在圖 4-9 中所顯示為控片在開始蝕刻前，比較 breakthrough 對於電子密度的影響性，除 breakthrough 操作條件不同外，其餘條件皆相同為氯氣在 source power 400W、bias power 0W、gas flow 80sccm 下改變操作壓力，圖 4-9 中可以發現，在未加 breakthrough 的電子密度值比加 breakthrough 後的電子密度值高，可能的原因為在加 breakthrough 後晶圓上的薄氧化層被打掉，因此多晶矽接觸到電漿的機會比沒有 breakthrough 的晶圓高，於是腔體中的 Cl 與 Cl^+ 等粒子與晶圓表面發生化學反應，主要進行蝕刻的粒子 Cl 與 Cl^+ 被消耗，再由先前氯氣的模擬中觀察 Cl^+ 與電子密度具正相關性，因此在電子密度上有所差異。圖 4-10 能進一步加以說明，在以 source power 400W、gas flow 80sccm 製程條件下皆包含 breakthrough 此步驟，分別加不同的 bias power 0W 與 150W 下觀察電子密的影響情形，圖中可發現電子密度的差異較圖 4-9 為明顯，因為外加 bias power 使離子攜帶的能量增加，因此增加離子與 Si 基材做反應的機會，消耗更多 Cl 、 Cl^+ 粒子，所以電子密度明顯下降，若氯氣區域平均模式模型中的再結合係數 R_{rec} 作解釋，加 bias power 時，相同操作壓力下 Cl 原子消耗增加， R_{rec} 值變大，所以造成電子密度的下降。圖 4-11 所表示為 pattern wafer 與 blanket wafer 在相同製程條件下，晶圓表面的性質對電子密度之影響，圖中可觀察 pattern wafer 電子密度隨操作壓力有上升而有下降的現象，較符合區域平均模式模型中所模擬的結果，然而在較高操作壓力下 blanket wafer 與模擬結果有所不同，此部分需加入晶圓表面的化學反應來讓模型更加準確，但不同晶圓表面的材質是對電子密度有所影響。

最後對於模型與實驗結果作一比較討論，以圖 3-15、4-9、4-10、4-11 作為一說明，可以發現，雖然在圖 3-15 中可以模擬出對於不同再結合係數對電子密度的影響趨勢與實驗有所相關，但是模型所計算出電子密度皆高於實驗值一個級數，討論此部分可能的原因有：

1、因為在區域平均模式模型中所用的能量輸入為電漿吸收功率，此表示電漿系

統中真實的吸收功率，因此在機台設定之輸入功率並不等於電漿吸收功率，而是有部分能量以熱能方式在線圈中散失，或是在 RF matchbox 中因訊號源阻抗與負載端阻抗不相等、兩者不成共軛複數，造成匹配不完全而使功率無法達到最大轉移所致，故真實的電漿吸收功率小於設備輸入功率。有文獻曾對 Lam 300mm R&D 機台做一研究【32】，發現實際電漿系統的吸收功率約設備輸入功率的 70%。

- 2、在區域平均模式模型中所用的其中一項假設條件為，各粒子在空間中是平均分佈，但由流體模型所模擬出現象可以觀察到，帶電粒子在腔體中的分佈為偏離中央軸線區域有最大密度值，而密度漸往鞘層遞減，故利用區域平均模式模型所計算出密度值略大於流體模型，此外 SEERS 為裝置在腔壁上量測電流值經計算得電子密度，因此所量測出密度值皆小於文獻上所探討。一般而言有多種量測電漿製程參數的感測器，Langmuir probe 是實驗室中常使用的儀器之一，可以量測空間中粒子的密佈分佈狀況，配合流體模型瞭解粒子的分佈狀況，但因為侵入式量測方式，故在量產製程機台並無所使用，此外在文獻中亦有學者使用外差式毫微米波干涉儀 (Microwave Interferometer) 做測量工具【15】，因儀器放置高度所量測到電漿密度為腔體中高密度區域，所以與區域平均模式模型較能吻合。

由前面所述的一次一因子研究的方法雖然可以畫出美觀的曲線，但在其他因子條件改變的同時，是否依然會有如此的現象卻不能保證，因此為了不增加實驗所需的次數及重現性高的因素下，接下來便做直交表的設計，觀察系統是否符合加法原理或參數間存在著交互作用的現象，作為控制對象的選取。

直交實驗設計如表七所示，選取系統中的可控因子為 source power、bias power、pressure、gas flow，分別採用三個水準進行 L_9 直交實驗，在實驗進行中以氯氣作為蝕刻氣體持續 50 秒，此外因為 Poly-Si 在自然環境中會與氧結合形成一薄氧化層，故在每個實驗進行前多加一道步驟，此步驟的重點即在將此薄氧化層打掉 (Breakthrough)，使每片晶圓的基準點相同。依據製程的經驗，當外加的

bias power 大於 100 W 時可達到此目的，此製程步驟進行 5 秒即可達到所要之需求。

實驗的過程中，實驗順序為亂數排序，此目的在於降低實驗的變異，並將實驗數據整理於表八、表十一，分別代表電子密度與電子碰撞率的實驗數據。經望大值 4-1 式的計算求出系統的 SN 比 η ，並作輔助表於表九、表十二，在輔助表裡即可看出因子在不同水準下對於電子密度以及電子碰撞率的影響，將此輔助表繪製於圖 4-10、圖 4-11 以其更直觀能觀察出設備參數對於製程參數的影響狀況，由因子效應圖中可觀察到在電子密度方面，因子效應的影響與一次因子實驗結果有相同的趨勢，而電子碰撞率上就無明顯的關係存在。接下分析實驗的變異數，將相關數據計算結果填於表十、表十三，在制表的過程中，因 L_9 直交表中沒有自由度可估計誤差因子，因此以可控因子中平方和較小的因子氣體流量視為誤差因子，進而估算影響系統變化最主要的因子，並作 F 檢定及貢獻率 ρ 的計算。在 F 檢定上， $F_2^2(0.05)$ 查表得值為 19，在變異數分析表上以一顆星號 (*) 作為表示，當 F 值太小甚至接近 1 時一般都與誤差變異結合在一起，在本實驗的分析中誤差變異為選擇氣體流量視為誤差估算。而因子貢獻率 ρ 的計算中可發現，在電子密度裡以 pressure 為最顯著之因子、電子碰撞率上以 bias power 及 pressure 為顯著。在完成變異數分析表後所要做的就是實驗之印證，共分為電子密度與電子碰撞率兩方面的印證。

a、電子密度之實驗分析：

由變異數分析表中觀察出，影響電子密度變化以 pressure 最為顯著，其次 source power 再則 bias power。然而在實驗印證上首先計算系統的信賴區間 4-8 式：

$$\hat{m} = \pm \sqrt{F_2^2(0.05) \frac{MS_e}{n_e}} = \sqrt{19 \times \frac{1.019}{3}} = 2.54(\text{dB}) \quad (4-8)$$

在實驗預測上以各因子之最大水準 $A_3B_3C_3$ 以及 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_3C_2$ 作為預測對象，氣體流量因視為誤差故不加入計算，所預測的 SN 比如下：

$$\begin{aligned}\eta_{opt1} &= m + (m_{A3} - m) + (m_{B3} - m) + (m_{C3} - m) \\ &= 192.41 + (194.633 - 192.41) + (192.661 - 192.41) + (188.06 - 192.41) \quad (4-9) \\ &= 190.534\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{opt2} &= m + (m_{A2} - m) + (m_{B1} - m) + (m_{C2} - m) \\ &= 192.41 + (191.921 - 192.41) + (193.722 - 192.41) + (193.329 - 192.41) \quad (4-10) \\ &= 194.152\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{opt3} &= m + (m_{A2} - m) + (m_{B3} - m) + (m_{C2} - m) \\ &= 192.41 + (191.921 - 192.41) + (192.661 - 192.41) + (193.329 - 192.41) \quad (4-11) \\ &= 193.091\end{aligned}$$

實際量測到的電子密度分別為 $3.95 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.71 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.68 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ，同樣以 4-1 式做計算轉換成 SN 比分別為 $\eta_{real1} = 191.93 \text{ dB}$ 、 $\eta_{real2} = 195.132 \text{ dB}$ 及 $\eta_{real3} = 195.086 \text{ dB}$ 與預測值分別相差 1.396 dB、0.98 dB、1.995 dB 皆在信賴區間內符合預期，故對於電子密度而言加法模式成立。

b、電子碰撞率之實驗分析：

由變異數分析表十三中可觀察，影響電子碰撞率變化以 pressure 與 bias power 最為顯著，source power 的影響程度則不如影響電子密度般明顯，在電子碰撞率上的信賴區間為 4-12 式：

$$\hat{m} = \pm \sqrt{F_2^2(0.05) \frac{MS_e}{n_e}} = \sqrt{19 \times \frac{9.419}{3}} = 7.723(\text{dB}) \quad (4-12)$$

相同的以各因子之最大水準 $A_3B_3C_3$ 及 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_3C_2$ 作為預測，所預測的 SN 比為：

$$\begin{aligned}\eta_{opt4} &= m + (m_{A3} - m) + (m_{B3} - m) + (m_{C3} - m) \\ &= 150.81 + (154.487 - 150.81) + (151.323 - 150.81) + (151.1 - 150.81) \quad (4-13) \\ &= 167.36\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{opt5} &= m + (m_{A2} - m) + (m_{B1} - m) + (m_{C2} - m) \\ &= 150.81 + (144.982 - 150.81) + (140.457 - 150.81) + (144.003 - 150.81) \quad (4-14) \\ &= 127.822\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{opt6} &= m + (m_{A2} - m) + (m_{B3} - m) + (m_{C2} - m) \\ &= 150.81 + (144.982 - 150.81) + (151.323 - 150.81) + (144.003 - 150.81) \quad (4-15) \\ &= 138.688\end{aligned}$$

實際量測到的電子碰撞率分別為 $1.88 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 、 $2.08 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 、 $6.59 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ，轉換成 SN 比為 $\eta_{real4} = 165.48 \text{ dB}$ 、 $\eta_{real5} = 126.36 \text{ dB}$ 及 $\eta_{real6} = 156.377 \text{ dB}$ 與預測值分別相差相差 1.88 dB、1.462dB、17.692 dB 未落在信賴區間，故不符合加法性的預測，可能的原因有電子碰撞率有明顯的可控因子間交互作用或所選定的可控參數不足及實驗數據不足所致。



第五章 控制器設計與模擬

5-1 控制理論

5-1-1 順滑模態 (Sliding Mode) 控制原理【33】、【34】、【35】

順滑模態是可變結構 (Variable Structure) 控制系統中一個特殊的系統行為，早在 1950 年代前蘇聯科學家將可變結構系統的技術應用到馬達控制，而現代的可變結構控制幾乎架構在順滑模態的基礎來設計，由於具有可變結構技術的順滑模態控制有快速的收斂以及消除匹配式雜訊干擾 (Matched Noise) 的能力，因此發展了許多關於順滑模態控制的應用。

順滑模態控制具有三個重要的性質：

- 1、系統的穩定性與子結構穩定性無關。
- 2、系統可以具有順滑模態的行為。
- 3、系統對雜訊具有穩健性 (Robustness)。

此外若一系統要擁有順滑模態的行為，則必須要具備兩個條件：

- 1、必須存在一個順滑模態的超空間，而且所有的系統軌跡在有限的時間裡都會接觸到此超空間。
- 2、系統軌跡進入超空間後，必須順著此超空間滑向原點，而這樣的行為稱為順滑模態。

在上述第一個條件為迫近條件 (Approaching Condition)，主要是讓系統軌跡在有限時間內進入所規劃的超空間，而第二條件則稱為順滑條件 (Sliding Condition)，觀念是系統軌跡必須滑向原點或目標點。所以基本上一個順滑模態的發生可以有兩個程序，首先當系統在超空間 $s(\mathbf{x}) = 0$ 之外時，須確保所有系統軌跡在有限時間內接觸到此超空間，在這接觸的過程稱為迫近模態。而在系統進入此超空間後，則要保證不在離開此超空間並朝著平衡點 $\mathbf{x} = 0$ 逼近，此過程稱為順滑模態。如圖 5-1 所示，系統狀態 $\mathbf{x}(0)$ 自 $t = 0$ 被迫推向超空間 $s(\mathbf{x}) = 0$ ，並且在有限時間 t_h 內到達，然後在 $t > t_h$ 的時間裡系統不再脫離此超空間，而朝著

目標值 $\mathbf{x}(\infty) \rightarrow 0$ 移動，此超空間 $s(\mathbf{x}) = 0$ 又稱為順滑面 (Sliding Surface)。

若將非線性系統表示如 5-1、5-2 式：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u(\mathbf{x})) \quad (5-1)$$

$$y(\mathbf{x}, t) = h(\mathbf{x}(t)) \quad (5-2)$$

對於單輸入系統而言，通常切換條件 $u(\mathbf{x})$ 可表示為 5-3 式：

$$u(\mathbf{x}) = \begin{cases} u^+(\mathbf{x}) & s(\mathbf{x}) > 0 \\ u^-(\mathbf{x}) & s(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (5-3)$$

其中 $s(\mathbf{x})$ 為一切換函數 (Switching Function)，而且 $u^+(\mathbf{x}) \neq u^-(\mathbf{x})$

1、當 $s(\mathbf{x}) > 0$ 時， $s(\mathbf{x})$ 的值必須隨著時間遞減，即 $\dot{s}(\mathbf{x}) < 0$

2、當 $s(\mathbf{x}) < 0$ 時， $s(\mathbf{x})$ 的值必須隨著時間遞增，即 $\dot{s}(\mathbf{x}) > 0$

$$\text{即 } \lim_{s \rightarrow 0} s\dot{s} < 0 \quad (5-4)$$

5-4 式為順滑條件，然而進入順滑模態後的軌跡雖然為連續，但由 5-3 式觀察卻不是由連續的切換條件所產生，在這不連續切換條件與連續的順滑模態之間，存在著一層關係，這關係由 *Filippov* 提出等效控制 (Equivalent Control) 的概念而獲得解釋，在順滑面 $s(\mathbf{x}) = 0$ 中的 u 可視為連續的等效控制 u_{eq} ，使得 5-5 式：

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, u_{eq}) = \mu \mathbf{f}(\mathbf{x}, u^+) + (1 - \mu) \mathbf{f}(\mathbf{x}, u^-) \text{、其中 } 0 < \mu < 1 \quad (5-5)$$

至於迫近條件可因系統之不同而有不同的迫近條件，但無論是何種迫近條件都有滿足讓系統在有限時間內接觸到順滑模態，而最常使用的迫近條件如 5-6 式所述：

$$s\dot{s} < \eta|s| \text{ , } \eta > 0 \text{ 當 } s \neq 0 \quad (5-6)$$

這是利用 *Lyapunov* 原理來說明此條件如何保證系統在有限時間內接觸到順滑模態。若再觀察 5-6 式將發現：

$$s\dot{s} < \eta|s| \Rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} s\dot{s} < 0 \quad (5-7)$$

顯然由 5-6 式可以推得 5-7 式，保證順滑條件成立，因此 5-6 式不但可以在有限

時間內使系統進入順滑面，還可以保證順滑模態的產生，因此稱 5-6 式為迫近順滑條件 (Approaching and Sliding Condition)，這是順滑模態設計中最常使用到的條件之一。根據這兩種模態的特性，在順滑模態設計時通常循著兩個基本步驟：
 步驟一、選定順滑函數 $s(x)$ ，使得系統軌跡在沿著順滑模態時能滑向控制目標點
 步驟二、決定控制輸入時，使得系統在有限時間內能接觸到順滑面，並且產生順滑模態。

由上述步驟可觀察出設計次序上是先考慮順滑模態，再考慮迫近模式，因此和系統的行為次序剛好相反，在進行步驟一時必須先假設系統已經被成功的控制在順滑模態上，然後選擇適當的順滑函數確保系統的穩定性，接著才在第二步驟中決定控制法則以確定迫近模態的存在與順滑模態的產生。

然而為了符合迫近順滑條件，在控制輸入中使用了一個理想的切換函數 $sign(s)$ ，這函數必須藉由無窮大的切換頻率才能達成，可是這種切換頻率在實際系統中無法實現，因此一般都利用極高速的切換元件來達成，但如此一來系統必定會在順滑模態 $s(x) = 0$ 兩側的極小空間切換，這種無法預期的高頻震盪現象即所謂的切跳 (Chattering) 現象，因此 Slotine 在 1983 年提出以順滑層 (Sliding Layer) 概念來改進切跳現象，其方法是將 $sign(s)$ 函數修正為飽和函數：

$$sat(s, \varepsilon) = \begin{cases} 1 & s > \varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon} & |s| \leq \varepsilon \\ -1 & s < -\varepsilon \end{cases} = \begin{cases} sign(s) & |s| > \varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon} & |s| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (5-8)$$

ε 為順滑層厚度，順滑層的引用可使系統較平緩的在順滑層內朝控制目標移動，但卻要付出降低系統控制精準度的代價。

5-1-2 模型線性化

a、Lyapunov's method

在非線性系統中，欲把動態系統線性化，其中 Lyapunov's method 是根據系統的操作點 (Operating Point) 或平衡點 (Equilibrium Point) 做區域性線性化的作法，因此設計出之控制器有其操作區間，且當泰勒展開式中高次項不是微量變

化時，此方法不再適用，且設計出之控制器有其使用上的問題。線性化過程如 5-9 式，假設非線性系統的平衡操作點為 (\mathbf{x}_0, u_0) ，滿足 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_0, u_0) = 0$ ，以 5-1、5-2 式為系統之動態方程式：

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}, \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), u(t)) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}(t), u(t)) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}(t), u(t)) \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

將 5-1 及 5-2 式對平衡操作點做泰勒展開，假設忽略高次項（因為僅考慮系統微量之變化）即 5-10 式：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_0, u_0) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial \mathbf{f}_i(\mathbf{x}, u)}{\partial \mathbf{x}_j} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0, u=u_0} (\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_{0j}) \\ &+ \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial \mathbf{f}_i(\mathbf{x}, u)}{\partial u_j} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0, u=u_0} (u(t) - u_0) \end{aligned} \quad (5-10)$$

令微量變動 $\Delta \mathbf{x}_i(t)$ 、 $\Delta u(t)$ 為 $\Delta \mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_{0i}$ ， $\Delta u(t) = u(t) - u_0$ 則經整理可得

5-11 式：

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1(t) \\ \Delta \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \Delta \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0, u=u_0} \Delta \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u} \end{bmatrix} \Delta u(t) \quad (5-11)$$

同理 5-12 式：

$$\Delta y(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \vdots \\ \Delta x_n(t) \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

5-11 及 5-12 式即為在平衡操作點附近微量變化下之線性系統的動態行為，如此線性控制理論即可來設計控制器，以控制此微量變化的非線性系統，但如前面所述，所設計出之控制器有其操作區間、穩定範圍。

b、Feedback Linearization

Feedback Linearization 方法是將非線性系統線性化的另一途徑，其主要概念

為將原非線性系統經過相似轉換的動作，將非線性系統的動態方程部分或全部轉換為標準模式 (Canonical Form)，因此線性控制的理論便可應用，或是容易取得順滑函數的條件，如圖 5-2 所示。不同於 *Lyapunov's method* 的是 *Feedback Linearization* 為系統只有輸出可以量測，而系統的狀態則是不可知的。一般而言，*Feedback Linearization* 有兩種方法可將原非線性系統作相似轉換：

1、Full-state Linearization (Input-state Linearization)：

其選定之狀態變數可能為不具實際物理量之值，但經由此方法之相似轉換，轉換後的系統階數與原系統階數相同。

2、Input-output Linearization：

在 Input-output Linearization 方式中，系統輸出狀態可選定為一具物理量之狀態變數，利用此線性化的方法，尋找出控制輸入與輸出狀態間直接而簡單的關係，因此輸出可為具物理意義之狀態，但經由此方法所做出之相似轉換階數 r 與原系統階數 n 有一階數差 (Relative Degree)，關係為 $r \leq n$ ，當 $r < n$ 時，表示原系統有 $n - r$ 個狀態變數無法經由相似轉換後之關係觀察到 (Unobservable)，此部分的狀態稱為 internal dynamic 或 unobservable mode，然而使用 Input-output Linearization 所需考慮的是無法觀測到狀態變數之穩定性 (Stability)，其判斷方式為令選定之輸出狀態變數為零，代換至原系統判斷原系統是否穩定，若不穩定則需另選輸出變數使 internal dynamics 為穩定，此方法稱為 zero dynamics，若在線性系統，則有系統不能為非極小相位系統 (Non-minimum Phase System) 之限制，因為對於一非極小相位系統，雖然輸出可以達到控制目標，但卻在系統內造成內部不穩定，而導致整個系統癱瘓。

對 Input-output Linearization 方法做一說明，重新考慮一非線性系統，其動態方程式表示如 5-13、5-14 式：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \quad (5-13)$$

$$y = h(\mathbf{x}) \quad (5-14)$$

其運算方式如下，選定輸出狀態變數 $z_1 = h(\mathbf{x})$ 並對 z_1 微分：

$$\dot{z}_1 = \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u] \stackrel{def}{=} L_f h(\mathbf{x}) + L_g h(\mathbf{x})u \quad (5-15)$$

假設 $L_g h(\mathbf{x}) = 0$ 表示 \dot{z}_1 與 u 為獨立關係 (Independent), 繼續對 z_1 做微分

$$z_2 = \dot{z}_1 = \frac{\partial(L_f h)}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u] = L_f^2 h(\mathbf{x}) + L_g L_f h(\mathbf{x})u \quad (5-16)$$

同理, 如果 $L_g L_f h(\mathbf{x}) = 0$ 表示 \dot{z}_1 與 u 間仍為獨立關係, 重複微分動作直到 u 出現

$$z_1^{(r)} = L_f^r h(\mathbf{x}) + L_g L_f^{r-1} h(\mathbf{x})u \quad (5-17)$$

其中 $L_g L_f^{i-1} h(\mathbf{x}) = 0$, $i = 1, 2, \dots, r-1$, $L_g L_f^{r-1} h(\mathbf{x}) \neq 0$, 則原動態系統經相似轉

換可化為:

$$\mathbf{Z}^{\Delta} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \dot{z}_1 \\ \vdots \\ z_1^{r-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_r \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = z_4 \\ \vdots \\ \dot{z}_r = L_f^r h(\mathbf{x}) + L_g L_f^{r-1} h(\mathbf{x})u \end{cases} \quad (5-19)$$



於此重新考慮區域平均模式模型中氫氣動態方程式 3-19、3-20 式, 選定輸出狀態為電子密度 (n_e) 做 Input-output Linearization 則:

$$z_1 = h(\mathbf{x}) = n_e = x_3 \quad (5-20)$$

$$\dot{z}_1 = L_f h(\mathbf{x}) + L_g h(\mathbf{x})u$$

$$\begin{aligned} &= \left[\frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_1} \quad \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_2} \quad \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_3} \quad \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_4} \right] \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \left[\frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_1} \quad \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_2} \quad \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_3} \quad \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_4} \right] \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x})u \\ &= \{k_{iz} x_1 x_3 - k_w x_3 - k_r x_3\} + 0u \end{aligned} \quad (5-21)$$

因為 \dot{z}_1 與 u 為獨立關係, 繼續對 z_1 做微分得 5-22 式:

$$\begin{aligned}
\ddot{z}_1 &= L_f^2 h(\mathbf{x}) + L_g L_f h(\mathbf{x})u \\
&= \left[\frac{\partial(L_f h)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial(L_f h)}{\partial x_2} \quad \frac{\partial(L_f h)}{\partial x_3} \quad \frac{\partial(L_f h)}{\partial x_4} \right] \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \left[\frac{\partial(L_f h)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial(L_f h)}{\partial x_2} \quad \frac{\partial(L_f h)}{\partial x_3} \quad \frac{\partial(L_f h)}{\partial x_4} \right] \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x})u \\
&= \{k_{iz}x_3f_1 + (k_{iz}x_1 - k_w - k_r)f_3 + \frac{18.68}{x_4^2}k_{iz}x_1x_3f_4\} + \left\{ \frac{2}{3eV} \frac{18.68}{x_4^2}k_{iz}x_1 \right\} \cdot u \quad (5-22)
\end{aligned}$$

其中 $L_g L_f h(\mathbf{x})u \neq 0$ ，故相似轉換後的新系統動態如 5-23、5-24 式所示：

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} \quad (5-23)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = L_f^2 h(\mathbf{x}) + L_g L_f h(\mathbf{x})u \end{cases} \quad (5-24)$$

5-2 順滑模態控制器設計與模擬

5-2-1 控制器設計

系統流程如圖 5-3 所示，為方便日後設計，故將 3-21 式中狀態變數作一尺度變換，並加入因操作壓力變化所造成之干擾源，如下所示：

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{Ar} \\ n_{Ar^+} \\ n_e \\ T_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \tilde{x}_1 \\ \delta_2 \tilde{x}_2 \\ \delta_3 \tilde{x}_3 \\ \tilde{x}_4 \end{bmatrix} \quad (5-25)$$

則原動態模型 3-19、3-20 表示為 $\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x})u + \mathbf{D}(t)$ ，當固定氣體流量 Q 時，

壓力干擾源的變化在模型中是以 3-18 式影響 k_r 粒子停留時間，因此估計 k_r 在

1 mTorr 的變動範圍為 $|\Delta k_r| = |k'_r - k_r| = |D(t)| \leq 0.02k_r$ ，故：

$$\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \tilde{f}_1 \\ \tilde{f}_2 \\ \tilde{f}_3 \\ \tilde{f}_4 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} q/\delta_1 - \delta_3 k_{iz} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3 + (\delta_2/\delta_1) k_w \tilde{x}_2 - k_r \tilde{x}_1 \\ (\delta_1 \delta_3 / \delta_2) k_{iz} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3 - k_w \tilde{x}_2 - k_r \tilde{x}_2 \\ \delta_1 k_{iz} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3 - k_w \tilde{x}_3 - k_r \tilde{x}_3 \\ -\frac{2}{3} k_w \varepsilon_w \tilde{x}_4 - \frac{2}{3} \delta_1 \tilde{x}_1 (k_{iz} \varepsilon_{iz} + k_{ex} \varepsilon_{ex} + k_{el} \frac{3m}{M_{Ar}}) \tilde{x}_4 - \delta_1 k_{iz} \tilde{x}_1 \tilde{x}_4 + (k_w + k_r) \tilde{x}_4 \end{bmatrix} \quad (5-26)$$

$$\tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{2}{3} \frac{1}{\delta_3 V e \tilde{x}_3} \end{bmatrix} \quad (5-27)$$

相同的步驟選定電子密度 (n_e) 做 Input-output Linearization , 重新表示 5-20、5-21、5-22 式為 5-28、5-29、5-30 式 :

$$\tilde{z}_1 = \tilde{h}(\mathbf{x}) = \tilde{x}_3 \quad (5-28)$$

$$\tilde{z}_2 = \dot{\tilde{z}}_1 = \tilde{L}_f h(\mathbf{x}) + \tilde{L}_g h(\mathbf{x}) u = \delta_1 k_{iz} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3 - (k_w + k_r) \tilde{x}_3 + o \cdot u \quad (5-29)$$

$$\begin{aligned} \tilde{z}_2 = \dot{\tilde{z}}_1 = \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) + \tilde{L}_g L_f h(\mathbf{x}) u = \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) + \tilde{G}(\mathbf{x}) u = \{ \delta_1 k_{iz} \tilde{x}_3 \tilde{f}_1 + (\delta_1 k_{iz} \tilde{x}_1 \\ - k_w - k_r) \tilde{f}_3 + \delta_1 \frac{18.68}{\tilde{x}_4^2} k_{iz} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3 \tilde{f}_4 \} + \{ \frac{2\delta_1}{3\delta_3 e V} \cdot \frac{18.68}{\tilde{x}_4^2} k_{iz} \tilde{x}_1 \} \cdot u \end{aligned} \quad (5-30)$$

在設計順滑平面前首先定義 $z_1 = \tilde{z}_1 - \tilde{z}_{1d}$, $z_2 = \dot{z}_1 = \dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}$, \tilde{z}_{1d} 與 $\dot{\tilde{z}}_{1d}$ 為目標值 ,

則順滑平面可選擇為 5-31 式 :

$$S = \mathbf{C}^T \mathbf{Z} = [c_1 \quad 1] \cdot [z_1 \quad z_2]^T = c_1 z_1 + z_2 \quad (5-31)$$

$$\begin{aligned} \dot{S} &= c_1 \dot{z}_1 + \dot{z}_2 = c_1 (\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + (\ddot{\tilde{z}}_1 - \ddot{\tilde{z}}_{1d}) = c_1 (\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + (\dot{\tilde{z}}_2 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) \\ &= \{ c_1 (\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) - \ddot{\tilde{z}}_{1d} \} + \tilde{G}(\mathbf{x}) \cdot u \end{aligned} \quad (5-32)$$

在順滑平面中的 k_r 是不包含外界干擾源 , 選擇控制輸入 u 為 5-33 式 :

$$u = \frac{-1}{\tilde{G}(\mathbf{x})} \left[c_1 (\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) - \ddot{\tilde{z}}_{1d} + \eta \cdot \text{sign}(S) \right], \text{ 其中 } \eta > 0 \quad (5-33)$$

控制輸入中的 k_r 是包含外界干擾源 , 即 $k_{r(new)} = (1 + 0.02)k_r$, 將上式帶入 5-32 作

檢驗可發現 , 5-34 式滿足順滑條件且在有限時間內到達順滑模態。

$$S\dot{S} = -\eta \cdot S \cdot \text{sign}(S) = -\eta|S| < 0 \quad (5-34)$$

現在考慮一不定量控制 $\tilde{g}(\mathbf{x}) = \hat{g}(\mathbf{x}) + \delta g_a$ 或 $\tilde{g}(\mathbf{x}) = \hat{g}(\mathbf{x}) \cdot \delta g_m$ ，由於乘法估計模式比加法預測模式為佳，故在控制器設計推導時，以乘法模式作為估計，並假設：

$$\delta g_{\min} \leq \delta g_m = \frac{\tilde{g}(\mathbf{x})}{\hat{g}(\mathbf{x})} \leq \delta g_{\max} \quad (5-35)$$

$$\delta g_{\max} = \phi_{\max} \frac{2}{3\delta_3 Ve \tilde{x}_3} = \phi_{\max} \tilde{g}(\mathbf{x}) \quad (5-36)$$

$$\delta g_{\min} = \phi_{\min} \frac{2}{3\delta_3 Ve \tilde{x}_3} = \phi_{\min} \tilde{g}(\mathbf{x}) \quad (5-37)$$

$$\hat{g}(\mathbf{x}) = \sqrt{\phi_{\min} \tilde{g}(\mathbf{x}) \phi_{\max} \tilde{g}(\mathbf{x})} = \tilde{g}(\mathbf{x}) \sqrt{\phi_{\min} \cdot \phi_{\max}} \quad (5-38)$$

相同的可推得 5-30 式中 $\tilde{G}(\mathbf{x}) = \hat{G}(\mathbf{x}) \cdot \delta G_m$ ：

$$\delta G_{\min} \leq \delta G_m = \frac{\tilde{G}(\mathbf{x})}{\hat{G}(\mathbf{x})} \leq \delta G_{\max} \quad (5-39)$$

$$\delta G_{\max} = \phi_{\max} \frac{\delta_1}{\delta_3} \frac{2}{3Ve} \frac{18.68}{\tilde{x}_4^2} k_{iz} \tilde{x}_1 = \phi_{\max} \tilde{G}(\mathbf{x}) \quad (5-40)$$

$$\delta G_{\min} = \phi_{\min} \frac{\delta_1}{\delta_3} \frac{2}{3Ve} \frac{18.68}{\tilde{x}_4^2} k_{iz} \tilde{x}_1 = \phi_{\min} \tilde{G}(\mathbf{x}) \quad (5-41)$$

$$\hat{G}(\mathbf{x}) = \sqrt{\phi_{\min} \tilde{G}(\mathbf{x}) \phi_{\max} \tilde{G}(\mathbf{x})} = \tilde{G}(\mathbf{x}) \sqrt{\phi_{\min} \cdot \phi_{\max}} \quad (5-42)$$

其中 ϕ_{\min} 、 ϕ_{\max} 為模型與實際電漿吸收功率間之比例常數，此部分可由實驗數據或相關文獻中得知， \tilde{G} 為實際系統之輸入變動， δG_m 為估計吸收功率變動範圍，其值介於 δG_{\min} δG_{\max} 間， \hat{G} 為在控制器設計中估計模型輸入之函數。則 5-30 式改寫為 5-43 式：

$$\dot{\tilde{z}}_2 = \ddot{\tilde{z}}_1 = \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) + \tilde{G}(\mathbf{x}) = \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) + \hat{G}(\mathbf{x}) \delta G_m \cdot u \quad (5-43)$$

取與 5-31 式之相同順滑平面 $S(x)$ 微分可得 5-44 式：

$$\dot{S} = \left\{ c_1 (\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h(x) - \ddot{\tilde{z}}_{1d} \right\} + \hat{G}(x) \delta G_m \cdot u \quad (5-44)$$

重新選擇控制輸入 u 為 5-45 式：

$$u = \frac{-1}{\hat{G}(\mathbf{x})} \left[c_1(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) - \ddot{\tilde{z}}_{1d} + k \cdot \text{sign}(S) \right] \quad (5-45)$$

將 5-45 式代入 5-44 式得：

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \left\{ c_1(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) - \ddot{\tilde{z}}_{1d} \right\} + \hat{G} \delta G_m \frac{-1}{\hat{G}} \left\{ c_1(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h - \ddot{\tilde{z}}_{1d} + k \cdot \text{sign}(S) \right\} \\ &= (1 - \delta G_m) \left\{ c_1(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h - \ddot{\tilde{z}}_{1d} \right\} - \delta G_m k \cdot \text{sign}(S) \leq -\eta \end{aligned} \quad (5-46)$$

其中系統最差之狀況為 5-47 式所示：

$$k \geq \frac{(1 - \delta G_{\min}) \left[c_1(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) - \ddot{\tilde{z}}_{1d} \right] + \eta}{\delta G_{\min}} \quad (5-47)$$

此時 $\dot{S} \approx -\eta S \cdot \text{sign}(S) = -\eta |S| < 0$ ，亦滿足滿足順滑條件且在有限時間內到達順滑模態。為了避免不必要的高頻切換所產生的切跳現象，故將控制輸入 u 以下面形式實現：

$$u = \frac{-1}{\hat{G}(\mathbf{x})} \left[c_1(\dot{\tilde{z}}_1 - \dot{\tilde{z}}_{1d}) + \tilde{L}_f^2 h(\mathbf{x}) - \ddot{\tilde{z}}_{1d} + k \cdot \text{sat}(S, \varepsilon) \right] \quad (5-48)$$

程式開發初期，首先以 Matlab M-file 撰寫為主，待控制器設計無誤後，將程式轉為以 Matlab Simulink 作為模擬環境，如圖 5-4 所示，其所表示為控制器設計部分。

5-2-2 系統模擬

模擬討論裡以改變控制器設計中順滑層厚度 ε ，及對於不同的操作壓力作討論，模擬中所設定的電子密度目標值皆為 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。圖 5-5 中所表示為在 10 mTorr 操作壓力下，系統受一步階型態的干擾源在未受控制下，電子密度對干擾源的響應圖，接下來則對不同的順滑層做模擬，在圖 5-6、圖 5-7 中所模擬的條件為順滑層厚度 $\varepsilon = 0.1$ ，順滑平面設計中極點放置位置選擇在 $\text{pole} = 7$ ，以及迫近條件 $\eta = 1$ ，分別表示控制輸入值與電子密度、S 平面的行為於圖中，其中在表示 S 平面的兩圖形中，上圖 X 軸所用為對數刻度，下圖 X 軸所用為一般時間軸刻度。S 平面一圖裡可觀察到系統在有限時間內能接觸到順滑面，並且產生順滑模態，因此控制系統能將狀態帶至所設計的目標值上，故電子密度圖 5-7 一圖

中，電子密度在有限時間內被帶至目標值上，並且不因外界的干擾而離開目標值，與先前所述當系統進入順滑平面後，要保證不在離開此超空間並朝著平衡點逼近相符，然而觀察控制輸入一圖，因為所選取順滑層厚度 $\varepsilon = 0.1$ ，此 ε 所代表為要求系統的準確性，越小的 ε 穩態誤差越小，但所付出的代價為控制輸入會有較多的切換來達到此目標，於是控制輸入在模擬中發現有較大的 overshoot 發生。圖 5-8、圖 5-9 中與前述模擬條件相同，但改變順滑層厚度為 $\varepsilon = 1$ ，因為逼近條件沒有作更改，故在 S 平面一圖裡接觸到順滑面的時間與先前模擬時間相同，然而改變 ε 可以發現電子密度有較明顯的穩態誤差出現，並且是隨著外界干擾源頻率作變化，此部分為控制器設計中，雖能藉由使用較大的輸入能量壓抑住干擾源對系統的影響，但對干擾源的頻率卻無法消除，而會在輸出狀態中顯示出來，不過由於選擇 $\varepsilon = 1$ 的原因，所以在控制輸入圖 5-8 中較大的 overshoot 現象已被消除，整個輸入曲線較 $\varepsilon = 0.1$ 為平滑。

圖 5-10 所表示為模型與實際系統間誤差大小，或電漿設備輸入功率與實際電漿吸收功率間之比例對應電子密度圖，由於此部分實驗數據不足，所以參考文獻中相同為 TCP 系統，對於氬氣所做之實驗數據與本論文中模擬數據做一估計【15】，估計在 10 mTorr 操作壓力下，實驗數據是模型數據中以 53%~58% 的電漿吸收功率範圍所對應，因此以圖 5-5 相同的電漿吸收功率輸入模擬下，電子密度只有平均 $5.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，圖中並加入改變步階干擾源為弦波干擾 $\sin(4t)$ 加上輸入功率 53%~58% 的變化做模擬，於圖發現電子密度已無法達到所設定之目標值上。圖 5-11、圖 5-11 為經控制器設計下，控制輸入與所對應電子密度圖，可以發現經由不斷改變模擬條件，二圖中仍選擇 $pole = 7$ 、 $\eta = 1$ 、 $\varepsilon = 1$ 作為控制器設計條件能有較佳的結果，包含控制輸入有較小的 overshoot 行為及狀態被控制在所設定的目標值上，相同的在觀察電子密度響應圖中發現，對於外界的干擾能有效的被抑制但仍受其頻率所影響。接下來的圖 5-13、5-14、5-15 為改變工作壓力於 15 mTorr 下，持續觀察控制器是否依然能將系統控制在所設定的目標上，相同的比較實驗數據與模擬數據間的差異，約在 58%~63% 間，繼續以 $\sin(4t)$ 作

為干擾源、輸入功率在 58%~63%間做 $\cos(2t)$ 的變化，控制器設計中參數設定為 $pole = 7$ 、 $\eta = 1$ 、 $\varepsilon = 1$ ，在不同的操作壓力下控制器仍然可將系統控制在目標值。模擬圖中雖沒有針對迫近條件大小與極點的位置做圖形討論，在此做一說明，迫近條件的大小能改變系統進入 S 平面的時間，但過大的 η 需付出較大的能量輸入來達成此目標；而當系統進入順滑模態後整個系統的行為便類似於線性系統，其收斂速度由所選取的極點位置決定，因此改變極點的位置對於控制輸入與輸出狀態間有性能上的影響，經由不同 $pole$ 、 η 的選取可獲得的不同控制輸入 U 的型態，然而過大的控制輸入 U 並非是一好現象，故由不斷的模擬發現，配合著極點位置 $pole = 7$ 、迫近條件 $\eta = 1$ 為一適合的條件。

模擬至此已對氫氣的動態系統有所掌握，然而要進一步設計以氯氣為工作氣體的控制器發現，因氯氣的動態模型中有七個狀態變數，若以 Input-output Linearization 來化簡系統並做控制器設計的狀況下，系統複雜性將增加，考慮實現上的問題，狀態迴授將需更多的估測器來彌補感測器不足的現象，以及對於動態系統所使用的 DAQ 卡要求，另外因為 RF Matching Network 的動態行為尚未加入模擬一併考慮，所以接下來的氯氣模型控制器設計採取穩態控制器設計，利用反應曲面法尋求一適合的模型，並設計一適當的控制器，由於目前半導體機台間的溝通有完善的通訊協定，利用以 RS232-SECS 或 TCP/IP-HSMS 的方式即可達到穩態控制器的實現問題。

5-3 穩態模型控制器設計與模擬

5-3-1 反應曲面法【13】、【36】、【37】

反應曲面法 (Response Surface Method, RSM) 是一個有關係統建模和分析的數學與統計手法，在這些系統中有興趣的反應變數是受到數個變數影響，而目標是要最佳化這個反應，如 5-49 式：

$$Y = f(x_1, x_2, \dots) + \varepsilon \quad (5-49)$$

其中 ε 代表在反應 Y 中所觀察到的雜音或誤差，如果我們以 $E(Y) = f(x_1, x_2, \dots) = \eta$ 來表示期望反應，則由 $\eta = f(x_1, x_2, \dots)$ 所代表的曲面就稱為反應曲面。然而為了有助於看出反應曲面的形狀，通常會以等高線圖來表示，在等高線圖中反應值為常數的線被劃在 x_1 、 x_2 平面上，每一條等高線對應到一個反應曲面之特定高度。然而大多數 RSM 問題中，介於反應和獨立變數之間的關係形式未知，因此，RSM 的第一步驟是對於反應與獨立變數間的真正函數關係，找出一適當的近似，如果獨立變數的線性函數組合對於問題有好的解釋能力，則所選擇近似函數就是一階模型 (First-order Model) 5-50 式：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (5-50)$$

如果系統中有曲率，則必須利用較高階的多項式，如二階模型 (Second-order Model) 5-51 式來近似：

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5-51)$$

幾乎所有的 RSM 問題都會利用到這兩種模型中的一種或兩種並用。用一階模型在整個獨立變數的空間裡來近似系統是不太理想，但對於小範圍中的表現通常是良好的。

如果使用正確的實驗設計來收集資料，模型中參數將能被最有效地估計，用來配合反應曲面的設計稱之為反應曲面設計 (Response Surface Design)。待取得收集之資料，便利用迴歸模型 (Regression Model) 去描述 Y 與 x_1 、 x_2 ... 間之關係，如 5-50、5-51 式所示，而最小平方方法是典型用來估計多元線性迴歸模型裡迴歸係數的方法，如果以矩陣符號來表示，可用 5-52 式作為解釋：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5-52)$$

一般來說 \mathbf{Y} 是一個 $(n \times 1)$ 的觀察值向量、 \mathbf{X} 是一個 $(n \times k)$ 的自變數矩陣、 $\boldsymbol{\beta}$ 是一個 $(k \times 1)$ 的迴歸係數向量、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是一個 $(n \times 1)$ 的隨機誤差向量，目標是希望找一最小平方估計向量 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 來極小化 L ，表示為 5-53 式：

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\beta)'(\mathbf{Y} - \mathbf{X}\beta) = \mathbf{Y}'\mathbf{Y} - 2\beta'\mathbf{X}'\mathbf{Y} + \beta'\mathbf{X}'\mathbf{X}\beta \quad (5-53)$$

其中 $(\beta'\mathbf{X}'\mathbf{Y})' = \mathbf{Y}'\mathbf{X}\beta$ 是相同的 (1×1) 矩陣，則最小平方估計量必須滿足：

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2\mathbf{X}'\mathbf{Y} + 2\mathbf{X}'\mathbf{X}\hat{\beta} = \mathbf{0} \quad (5-54)$$

化簡後可得最小平方估計量 $\hat{\beta}$ 為：

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{Y} \quad (5-55)$$

則配置後的迴歸模型為 5-56 式：

$$\hat{Y} = \mathbf{X}\hat{\beta} \quad (5-56)$$

若以純量的符號來表示配置後的模型則為 5-57 式：

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5-57)$$

真實的觀察值 Y_i 與所對應的配置值 \hat{Y}_i 之間的差異就是殘差 (Residual)

$E_i = Y_i - \hat{Y}_i$ ，而判斷資料是否符合的作法主要建立在殘差上，殘差越大就表示迴

歸線越不好。為了更清楚比較各資料點的殘差相對大小，通常會將殘差標準化，

即 $Z_{E_i} = (E_i - \bar{E}) / S_E$ ，其中 \bar{E} 就是殘差平均數， S_E 殘差的標準差，如將所有的

殘差給以平方加總，即為殘差的平方和 $SS_e = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ 。然而殘差的平方和會

受到樣本數目的影響，所以不同樣本數的殘差平方和無法做比較，為了克服這困

難，就要它們全部放在同一尺度上，作法就是將殘差平方和除以總平方和，總平

方和就是所有的數減去其平均數，然後平方加總表示為 $SS_T = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$ ，經過

一些轉換計算後可以得到迴歸平方和 SS_{reg} ，定義為 5-58 式：

$$SS_{reg} = SS_T - SS_e = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (5-58)$$

迴歸平方和佔總平方和的百分比，就是這迴歸曲線可以符合資料的部分，通稱

R^2 ，又稱決斷係數 (Coefficient of Determination) 表示為 5-59 式：

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_T} = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5-59)$$

R^2 介於 0 至 1 間，如果這條迴歸線完全符合資料，一點殘差都沒有，則 R^2 就等於 1，在實際上 R^2 通常不會等於 1 或 0，而是介於兩者之間，當 R^2 越大表示這條迴歸線越能符合資料，描述的越準確，但如果兩條迴歸線 R^2 差不多，合理性也差不多，那迴歸曲線則是越簡單越好，才能達到化煩為簡的原則。

5-3-2 控制器設計與模擬

控制器的設計是利用上述所求得之線性迴歸方程式加以整理求得，若以一階模型表示如 5-60 式：

$$\hat{Y}_j = a_j + \sum_{i=1}^k b_{ji} (x_i - x_{i0}) + \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^k c_{jil} (x_i - x_{i0})(x_l - x_{l0}) \quad (5-60)$$

x_{i0} 、 x_{l0} 為設定之初始點， a_j 、 b_{ji} 、 c_{jil} 為利用反應曲面法所得之係數，變數 k 為實驗設計中可控因子數目， j 為觀察輸出值之個數。隨之對於 \hat{Y} 與 \mathbf{X} 取一微小變量線性化該迴歸曲線，可得下式：

$$\delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \delta \hat{\mathbf{Y}} \quad (5-61)$$

其中 $\delta \hat{\mathbf{Y}} = [\delta \hat{Y}_1 \ \delta \hat{Y}_2 \ \dots \ \delta \hat{Y}_n]^T$ 代表輸出預測觀察值的微量變化、 $\delta \mathbf{X} = [\delta X_1 \ \delta X_2 \ \dots \ \delta X_n]^T$ 表示控制輸入的微量變化、 \mathbf{A} 為系統矩陣，必須為方陣，描述如下：

$$A_{ji} = b_{ji} + \sum_{l=1, l \neq i}^k c_{jil} (x_l - x_{l0}) \quad (5-62)$$

參考圖 5-3 的控制流程，設定 $\delta \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{T} - \mathbf{Y}_m = \mathbf{e}$ ，為目標值 (\mathbf{T}) 減去該時刻狀態輸出值 (\mathbf{Y}_m) 所產生的誤差，而 $\delta \mathbf{X} = \mathbf{X}_{m+1} - \mathbf{X}_m$ 為因應所產生的迴授誤差而造成的控制改變量，將 5-61 式加以整理可得下列所示：

$$\mathbf{X}_{m+1} = \mathbf{X}_m + \lambda \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{T} - \mathbf{Y}_m) \quad (5-63)$$

如此即可計算下一時刻所需的控制輸入 \mathbf{X}_{m+1} ，其中調整 λ 代表著改變觀察值與目標值誤差的追蹤速度，其值介於 0 至 1 間，當 $\lambda = 0$ 時表示不對控制輸入做改變，

整個系統模擬流程在圖 5-16 中表示。

現在對氯氣設計一適當的控制器，迴歸模型的輸出參數取得是採第三章所模擬之數據來架構，所要繪製的反應曲面區域為電漿吸收功率介於 200~300W 間，操作壓力為 6~12 *mTorr*，在此範圍內取 20 個數據點做線性迴歸，所求得之等高線圖如 5-17 及 5-18 所示，其中圖 5-17 所顯示為因子間無交互作用之一階反應曲面等高線圖，所求迴歸模型為：

$$Y_1 = 0.19565 - 0.14392x_1 + 0.017373x_2 \quad (5-64)$$

圖 5-18 所表示為可控因子間具交互作用的等高線圖，所求得迴歸模型為：

$$Y_2 = -3.3527 + 0.15178x_1 + 0.031567x_2 - 0.0011828x_1x_2 \quad (5-65)$$

x_1 、 x_2 分別代表操作壓力與吸收功率，兩迴歸模型的 R^2 各為 0.9199 與 0.9581 皆能合理的描述系統行為，然而由第三章的實驗分析中可發現，可控因子間的交互作用對於電子密度影響不大，符合加法性質，因此控制器的設計乃以 Y_1 之迴歸曲線來設計，並將迴歸曲線 Y_2 視為實際之系統，以所設計出之控制器對 Y_2 做控制，期較能符合實際狀況。

因為控制目標為將電子密度維持在所設定的目標值上，為一單輸出系統，然而在先前所述控制器設計中，所提之 A 矩陣必須能夠去取其反矩陣，因此控制輸入必須為選定一單輸入參數，在迴歸模型中系統輸項共有操作壓力與吸收功率兩項，控制輸入不選擇操作壓力是因為，在實際系統中操作壓力的變化是利用蝴蝶閥門開口的大小及流量來改變壓力，反應時間較慢，且壓力的變化對蝕刻輪廓有較明顯之影響，故選擇以吸收功率為控制輸入。因此在對 Y_1 控制設計裡將 x_1 視為一固定值，並對迴歸模型取一微量變化整理後可得控制法則如 5-66 式：

$$x_{2(m+1)} = x_{2(m)} + \frac{\lambda}{0.017373}(T - Y_m) \quad (5-66)$$

在模擬圖中則將壓力視為外界干擾源，對電子密度發生影響，而吸收功率則去補償設定值 T 與實際量測值 Y_m 所產生的誤差，進而維持電子密度在所設定的目標值上。模擬中電子密度目標值設定在 $2.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，初始條件設定在操作壓力為

12 mTorr、吸收功率在 250W 上，同時並考慮因操作壓力步階變化的情形所造成電子密度偏移之影響，並對不同的權重 λ 做比較，模擬圖中以 * 符號所表示的為目標值，實線部分為實際密度變化情形，X 軸刻度代表模擬的時間間距，因為模型是利用穩態輸出結果所建構之迴歸模型，因此在實際應用上，須等電漿系統達一穩態狀況後在進行下一步驟控制輸入的計算，然而電漿系統的暫態時間短暫，依文獻所討論當模擬時間大於 0.1 秒即可達到此需求。

圖 5-19、5-20 所表示為當 $\lambda = 1$ 時壓力變化在 $\pm 1 mTorr$ ，致動器如何補償電子密度的偏移現象，可以由圖 5-20 中發現由於初始值設定所對應的電子密度與目標值有所差異，故在第二個時間步驟後控制輸入才將電子密度維持在目標值上，而當模型與實際系統描述越相近時此所產生的誤差越小。隨之在第六個時間步驟上，操作壓力因環境的因素從原本的 12 mTorr 降至 11 mTorr，電子密度由原先的 $2.8 \times 10^{10} cm^{-3}$ 變為 $2.95 \times 10^{10} cm^{-3}$ ，偏離目標值，因此控制輸入在第七個時間步驟中調整輸入大小至約 242W，以將電子密度控制回目標值上，但相同的因控制器設計是利用迴規模模型 Y_1 所設計，與控制對象 Y_2 有所誤差，故需多花費一個步驟時間將電子密度控制到目標值上，同樣的情形亦發生在第十六個時間步驟上。圖 5-21、5-22 所表示為當 $\lambda = 0.8$ 時相同的壓力變化在 $\pm 1 mTorr$ ，觀察系統對不同 λ 所產生的變化，可以發現對於相同的壓力變化干擾，控制輸入花費三個時間步驟將電子密度控制到目標值上。在圖 5-23、5-24 中模擬 $\lambda = 0.5$ 的狀況，控制輸入利用七個時間步驟將系統控制在目標值上，因此不同的 λ 值所付出的代價為系統收斂速度，但對於致動器而言，當 λ 值變小致動器就不會有劇烈的變化，因此如何選擇 λ 值取決於在對系統的要求為何。圖 5-25、5-26、5-27、5-28 模擬中所考慮為不是因壓力變化所帶來的電子密度變異，可能造成的電子密度變化來自於晶圓材質、腔體環境因素、機台熱機不足及頭片效應所造成的原因造成模型誤差，其行為表現在模擬圖中的迴歸模型 $D1$ 、 $D2$ 上，因此未受控制前的電子密度雖隨時間緩慢上升，但在輸入功率 250W，操作壓力 10 mTorr 已無法達到設定的目標，然而對於這些環境變異，控制輸入皆能將電子密度控制在目標值上。

第六章 結論與未來研究方向

6-1 結論

在電漿蝕刻系統中，經由設備參數直接觀察晶圓品質參數而未對製程參數有所分析，則並未對電漿的物理及化學現象有所瞭解，如前述以氯氣的實驗中，對於 blank wafer、pattern wafer 及改變 breakthrough 的操作條件，電子密度值與趨勢有明顯之不同，然而此部分有來自晶圓的材質，部份原因則能由模擬數據（圖 3-15）所發現。此外系統長時間的製程飄移與如何掌握清機時間，亦是節省成本的關鍵，電漿蝕刻機台清洗分為乾式清洗與濕式清洗，在乾式清洗中通入氣體在不加 bias power 下，使粒子與腔壁上的聚合物做反應，再以抽氣系統抽離達到清潔效果；濕式清洗需將製程腔體開啟做一擦拭的動作，由於電漿製程所使用的氣體皆有毒性，故需反覆的抽填氣體以保證有毒氣體已完全抽離真空腔中，因此停機將帶來設備使用率降低及其他耗材的損失，如何掌握清機時間及提供一穩定的製程環境便是一項課題，透過模型的建立、驗證、預測及控制器的設計應用可以達到此項需求。

首先本研究至今已分別完成氫氣、氯氣為工作氣體之變壓耦合式電漿源的模型建立及模擬，在模擬中可發現隨著電漿吸收功率的增加，帶電粒子密度均呈現上升的現象，而氯氣模型中因為高電漿吸收功率解離 Cl_2 所致，所以氯原子密度隨電漿吸收功率上升；但在操作壓力增加時，帶電粒子並非為一簡單的線性函數增加。在氫氣中，高操作壓力下使電子密度增加速度減緩；氯氣中壓力造成空間中主要帶電粒子成分的改變，發現在低操作壓力、高電漿吸收功率下，粒子以 n_e 及 Cl^+ 為主。此外電子溫度上，以氯氣為主的電漿中，電子溫度不再單純為操作壓力的函數，而受電漿吸收功率所影響，與氫氣的電子溫度狀況有所不同。在模擬氯氣電漿的再結合率 R_{rec} 上，觀察出對於較高再結合率的狀況下，以相同工作條件得到較低之電子密度值，並由實驗中解釋此現象。

在模擬結束後由實驗與相關文獻作一驗證，實驗首先透過一次一因子實驗

法，設定製程的基準線，每次只改變一個製程參數觀察不同水準下對電子密度與電子碰撞率的影響，實驗結果與趨勢皆與模擬相符，然而對於實驗值與模擬值誤差可能的原因為，實驗中所用的功率輸入並不等於真實電漿系統吸收功率，以及 SEERS 量測的電流值所換算代表的電子密度與模型假設粒子分佈情形不盡相同所致。在一次一因子實驗法雖然可以繪出單一因子對系統的影響性，但當其他因子水穩改變時，趨勢是否相同、因子間的交互作用是否明顯等，並無法由此看出，因此透過直交表實驗設計發現，電子密度符合加法原理，可控因子間的交互作用並不明顯，且主要影響電子密度的參數為 pressure 與 source power；電子碰撞率則否，bias power、source power、pressure 皆對碰撞率有明顯之影響。

製程隨著環境的不同，對於相同條件下晶圓所面對的情況亦有所不同，因此如何提供一穩定的製程條件，利用控制器來改善便是其中一個方法。使用前述所推導之模型與實驗結果來設計控制器，在本文中控制設計共分為兩項討論：

1、動態模型設計：

對於氫氣為工作氣體的環境下，以區域平均模式模型做為系統動態模型，並將驗證後的模型設計一順滑模態控制器來掌握電子密度的動態行為，並逐步考慮模擬條件以符合實際系統，首先不考慮模型參數的不確定量輸入，對系統加入步驟干擾源觀察不同的順滑層厚度 ε 對系統響應的影響，模擬顯示在較小的順滑層中，雖然電子密度的穩態誤差小，但控制輸入 U 卻有 overshoot 現象產生，相反的加大順滑層厚度使控輸入變為平滑，付出為系統的精確度。接下來考慮模型參數不確定量輸入，分別模擬在 10 mTorr 、 15 mTorr 下皆能將電子密度控制在目標值上，其中以極點位置 $pole = 7$ 、迫近條件 $\eta = 1$ 為最適合之設計條件。然而在欲建構氫氣為工作氣體之控制器時，考慮控制器的複雜性及尚未對 RF Matching Network 建模的狀況下，因此對 RF Matching Network 的動態行為未能掌握，且控制器實現上需花費較多計算時間的成本，故在氫氣操作上，控制器設計採取穩態模型設計。

2、穩態模型設計：

在以氯氣作為工作氣體控制器設計時，利用反應曲面法尋找一適合的穩態模型，此一模型可藉由實驗規劃化或物理模型來建立，本論文中是以實際實驗數據和相關印證文獻中模型的模擬數據來確認穩態模型。在穩態模型設計下，控制器的控制輸入仍為電漿吸收功率，同時考慮因壓力變化所造成電子密度偏移下，控制器是否能將系統控制在所設定的目標值，模擬數據顯示控制器皆能達到所設定的目標，同時觀察到不同的誤差加權值 (λ) 對於收斂速度有所影響，因而影響電漿製程設備的性能。

6-2 未來研究方向

研究至今雖然對製程的設備模型與控制器設計提出解決方案，但仍有繼續加以探討的地方，以下提出幾項觀點作為建議：

- 1、由於電漿系統的能量輸入是透過 RF Matching Network 做為媒介，因此對於設備腔體內部反應機制瞭解後，隨之而來必須對 RF Matching Network 動態模型、穩態模型有所分析，如此才能掌握整個能量傳遞的過程。RF Matching Network 的穩態模型亦可由實驗設計數據中求得，由穩態模型設計出的控制器則可進一步嘗試在機台上確認其性能。
- 2、電漿設備的動態模型建立，由於區域平均模式模型對於控制系統而言過於複雜，因此應用在混合氣體上雖能瞭解製程中粒子間的相對關係，但並不適合作為動態控制模型，故如何尋求一適合的控制模型也是值得研究的課題。對於能夠動態調整設備參數的機台，假設電漿包含 RF Matching Network 的系統為一階系統來近似，利用步階輸入參數的改變量尋找系統的時間常數 (Time Constant)，以建構出系統動態響應，進而設計一適合的控制器，此為可能的方案之一。
- 3、在穩態控制器中本文目前採取 SISO 的方法，致動器為電漿吸收、輸出狀態

電子密度，在後續研究上可增加為 MIMO 的系統，致動器為操作壓力與輸入功率，輸出狀態為電子密度與電子碰撞率。

- 4、本研究中所著重為電漿蝕刻設備的控制研究，故對於晶圓表面化學反應並無太多著墨，如何完整的建構出圖 1-1 模型有賴於後續模型的建立，晶圓表面化學反應將模型建立後，便能清楚的描述出製程始末。



	電容式電漿源	高密度電漿源	高密度電漿源蝕刻特性
操作壓力	$10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	$10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$	Higher etch rate
電漿密度	20mTorr ~ 2Torr	1mTorr ~ 50mTorr	Improve etch anisotropy
游離率	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$10^{-4} \sim 10^{-1}$	Effectively power absorption
電漿電位	~ 100V	~ 10V	Minimize plasma damage
電子溫度	1 ~ 5eV	2 - 10eV	

【表一】電容式電漿源與高密度電漿源特性比較【22】

	Reaction	Rate coefficient ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Ground state argon ionization	$e + Ar \rightarrow Ar^+ + 2e$	$k_{iz} = 1.23 \times 10^{-13} \exp(-18.68/T_e)$
Excitation to argon metastable	$e + Ar \rightarrow Ar^* + e$	$k_{ex} = 3.71 \times 10^{-14} \exp(-15.06/T_e)$
Metastable argon ionization	$e + Ar^* \rightarrow Ar^+ + 2e$	$k_{met} = 2.05 \times 10^{-13} \exp(-4.95/T_e)$
Wall recombination	$Ar^+ + wall \rightarrow Ar$	$k_w = \frac{U_{B,Ar^+} (2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R)}{\pi R^2 L} \quad 1/\text{sec}$
Molecular ionization	$e + Cl_2 \rightarrow Cl_2^+ + 2e$	$k_1 = 9.214 \times 10^{-14} \exp(-12.9/T_e)$
Dissociative ionization	$e + Cl_2 \rightarrow Cl^+ + Cl + 2e$	$k_2 = 3.881 \times 10^{-14} \exp(-15.5/T_e)$
Polar dissociation	$e + Cl_2 \rightarrow Cl^+ + Cl^- + e$	$k_3 = 8.549 \times 10^{-16} \exp(-12.65/T_e)$
Dissociation	$e + Cl_2 \rightarrow 2Cl + e$	$k_4 = 5.52 \times 10^{-14} T_e^{1.66} \exp(-5.49/T_e)$
Dissociative attachment	$e + Cl_2 \rightarrow Cl + Cl^-$	$k_5 = 3.69 \times 10^{-16} \exp(\sum_{i=1}^5 \frac{a_i}{T_e^i})$ $a_1 = -1.68, a_2 = 1.457, a_3 = -0.44$ $a_4 = 0.0572, a_5 = -0.0026$

Atomic ionization	$e + Cl \rightarrow Cl^+ + 2e$	$k_6 = 3 \times 10^{-14} (Te)^{0.559} \exp(-13.21/Te)$
Electron detachment	$e + Cl^- \rightarrow Cl + 2e$	$k_7 = 2.627 \times 10^{-14} \exp(-5.37/Te)$
Ion-ion recombination	$Cl^- + Cl_2^+ \rightarrow Cl + Cl_2$	$k_8 = 5 \times 10^{-14}$
Ion-ion recombination	$Cl^- + Cl^+ \rightarrow 2Cl$	$k_9 = 5 \times 10^{-14}$
Wall recombination	$Cl + wall \rightarrow 1/2Cl_2$	$k_{10} = \gamma_{rec} D_{eff} / \Lambda^2$ 1/sec
Momentum transfer	$e + Cl_2 \rightarrow e + Cl_2$	$k_{11} = 4.47 \times 10^{-13} \exp\left(\frac{-2.17}{Te} + \frac{0.362}{Te^2} - \frac{0.0196}{Te^3}\right)$
Wall recombination	$Cl^+ + wall \rightarrow Cl$	$k_{w1} = \frac{U_{B,Cl^+} (2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R)}{\pi R^2 L}$ 1/sec
Wall recombination	$Cl_2^+ + wall \rightarrow Cl_2$	$k_{w2} = \frac{U_{B,Cl_2^+} (2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R)}{\pi R^2 L}$ 1/sec

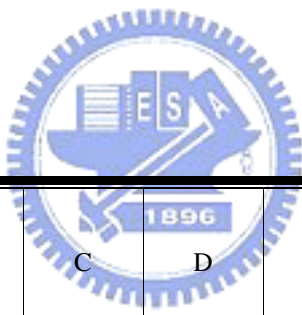
r_{rec} 為 Cl 的在結合係數， $D_{eff} = (1/D_{AA^*} + 1/D_{KN})^{-1}$ ， D_{AA^*} 為擴散係數， D_{KN} 為 Knudsen 自由擴散係數， Λ 為有效擴散長度，在氯氣中 h_L 、 h_R 修正為：

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

【表二】氫氣、氯氣之化學反應及反應速率【10】、【11】

	Reaction	Threshold energy (eV)
Ionization	$e + Ar \rightarrow Ar^+ + 2e$	$\varepsilon_{iz} = 15.76$
Excitation	$e + Ar \rightarrow Ar^* + 2e$	$\varepsilon_{ex} = 11.56$
Molecular ionization	$e + Cl_2 \rightarrow Cl_2^+ + 2e$	$\varepsilon_1 = 11.5$
Dissociative ionization	$e + Cl_2 \rightarrow Cl^+ + Cl + 2e$	$\varepsilon_2 = 15.7$
Polar dissociation	$e + Cl_2 \rightarrow Cl^+ + Cl^- + e$	$\varepsilon_3 = 11.9$
Dissociation	$e + Cl_2 \rightarrow 2Cl + e$	$\varepsilon_4 = 3.4$
Atomic ionization	$e + Cl \rightarrow Cl^+ + 2e$	$\varepsilon_5 = 13.5$
Electron detachment	$e + Cl^- \rightarrow Cl + 2e$	$\varepsilon_6 = 3.61$

【表三】氬氣、氯氣之臨界游離能【10】、【11】

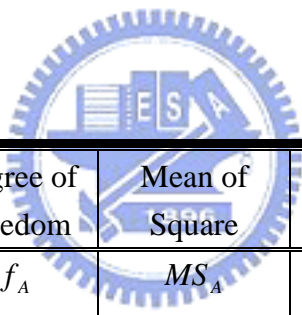


Factor Exp.					Result		η (SN Ratio) (dB)
	A	B	C	D			
	1	1	1	1	y_{11}	y_{12}	η_1
	1	2	2	2	y_{21}	y_{22}	η_2
	1	3	3	3	y_{31}	y_{32}	η_3
	2	1	2	3	y_{41}	y_{42}	η_4
	2	2	3	1	y_{51}	y_{52}	η_5
	2	3	1	2	y_{61}	y_{62}	η_6
	3	1	3	2	y_{71}	y_{72}	η_7
	3	2	1	3	y_{81}	y_{82}	η_8
	3	3	2	1	y_{91}	y_{92}	η_9

【表四】 $L_9(3^4)$ 直交表配置圖【30】

	A	B	C	D
Level 1	m_{A1}	m_{B1}	m_{C1}	m_{D1}
Level 2	m_{A2}	m_{B2}	m_{C2}	m_{D2}
Level 3	m_{A3}	m_{B3}	m_{C3}	m_{D3}
Average	$m = \frac{m_{A1} + m_{A2} + m_{A3}}{3}$	$m = \frac{m_{B1} + m_{B2} + m_{B3}}{3}$	$m = \frac{m_{C1} + m_{C2} + m_{C3}}{3}$	$m = \frac{m_{D1} + m_{D2} + m_{D3}}{3}$

【表五】輔助表【30】



Factor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean of Square	F	$\rho(\%)$
A	SS_A	f_A	MS_A	MS_A / MS_e	$\frac{SS_A - f_A \times MS_e}{SS_{Total}}$
B	SS_B	f_B	MS_B	MS_B / MS_e	$\frac{SS_B - f_B \times MS_e}{SS_{Total}}$
C	SS_C	f_C	MS_C	MS_C / MS_e	$\frac{SS_C - f_C \times MS_e}{SS_{Total}}$
D	SS_D	f_D	MS_D	MS_D / MS_e	$\frac{SS_D - f_D \times MS_e}{SS_{Total}}$
Total error	-	-	MS_e		
Total	SS_{Total}	8			100

【表六】變異數分析表【30】

蝕刻機台	NDL Lam®TCP9400SE		
晶圓規格	六吋晶圓		
	Poly-Si		
	SiO ₂		
Substrat			
蝕刻氣體	氯氣		
基準線	Source power 400 W Bias Power 150 W Pressure 12 mTorr Gas Flow 80 sccm		
控制製程之參數	水準一	水準二	水準三
A : Source Power(W)	200	400	600
B : Bias Power(W)	75	150	225
C : Pressure(mTorr)	6	12	18
D : Gas Flow(sccm)	40	80	120
觀察項目	電子密度，電子碰撞率		

【表七】實驗控制參數規劃表

Factor Exp.	Source Power(W)	Bias Power(W)	Pressure (mTorr)	Gas Flow(sccm)	Electron Density(10 ⁹ cm ⁻³)		η (SN Ratio) (dB)
	200	75	6	40	5.68	5.52	194.9611
	200	150	12	80	3.06	3.15	189.8385
	200	225	18	120	2.27	2.33	187.2323
	400	75	12	120	5.56	5.44	194.8057
	400	150	18	40	1.87	1.92	185.5499
	400	225	6	80	5.82	5.97	195.4076
	600	75	18	80	3.72	3.71	191.3992
	600	150	6	120	7.21	7.21	197.1587
	600	225	12	40	5.90	5.80	195.3422

【表八】電子密度實驗配置和 SN 比表

	Source Power	Bias Power	Pressure	Gas Flow
Level 1	190.677	193.722	195.842	191.951
Level 2	191.921	190.849	193.329	192.215
Level 3	194.633	192.661	188.06	193.066
average	192.41	192.41	192.41	192.41

【表九】電子密度輔助表

Factor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean of Square	<i>F</i>	$\rho(\%)$
Source Power	24.552	2	12.276	12.047	16.33
Bias Power	16.663	2	8.332	8.177	10.61
Pressure	94.637	2	47.319	46.436*	67.16
Gas Flow	(2.0371)	(2)	-		
Total error	2.0371	2	1.019		5.9
Total	137.889	8			100

【表十】電子密度變異數分析表

Factor Exp.	Source Power(W)	Bias Power(W)	Pressure (mTorr)	Gas Flow(sccm)	Collision Rate (10 ⁷ cm ⁻³)		η (SN Ratio) (dB)
	200	75	6	40	0.543	0.61	135.172
	200	150	12	80	7.32	7.93	157.6239
	200	225	18	120	20.4	20.1	166.1278
	400	75	12	120	0.476	0.194	128.0989
	400	150	18	40	18.1	18.7	165.2929
	400	225	6	80	1.29	1.12	141.5549
	600	75	18	80	8.00	8.07	158.0995
	600	150	6	120	9.20	8.79	159.0733
	600	225	12	40	2.51	1.79	146.2871

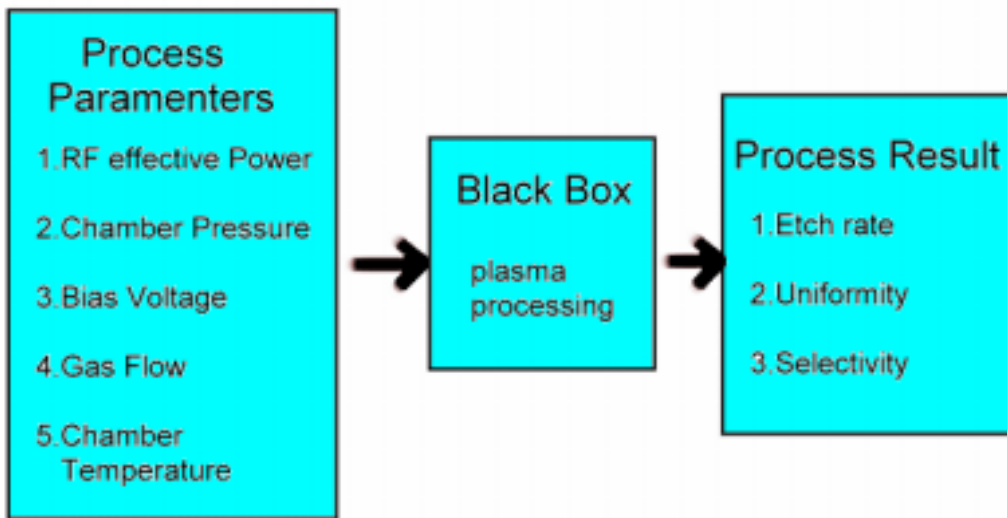
【表十一】電子碰撞率實驗配置和 SN 比表

	Source Power	Bias Power	Pressure	Gas Flow
Level 1	152.975	140.457	145.267	148.917
Level 2	144.982	160.663	144.003	152.426
Level 3	154.487	151.323	163.173	151.1
average	150.81	150.81	150.81	150.81

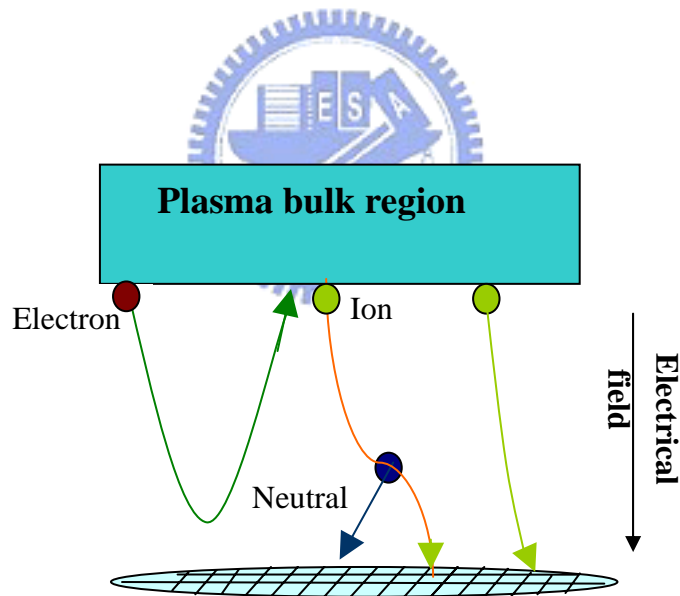
【表十二】電子碰撞率輔助表

Factor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean of Square	<i>F</i>	ρ (%)
Source Power	156.159	2	78.0795	8.29	9.29
Bias Power	613.588	2	306.794	32.572*	40.23
Pressure	689.711	2	344.856	36.613*	45.38
Gas Flow	(18.837)	(2)	-		
Total error	18.837	2	9.419		5.1
Total	1478.29	8			100

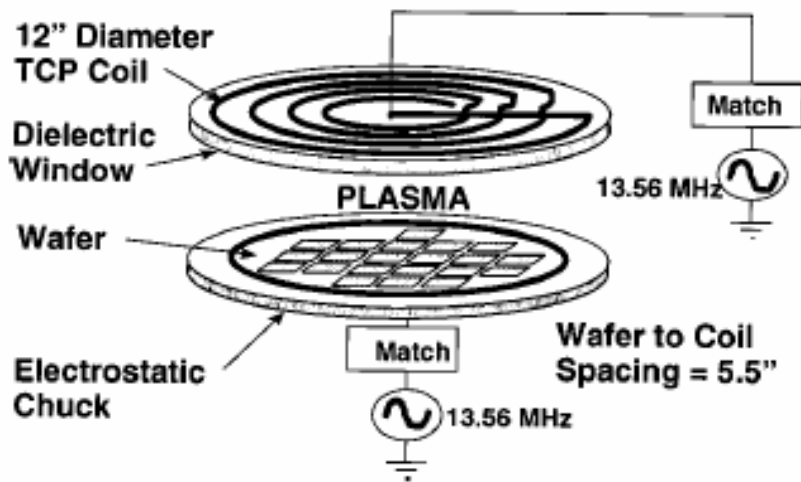
【表十三】電子碰撞率變異數分析表



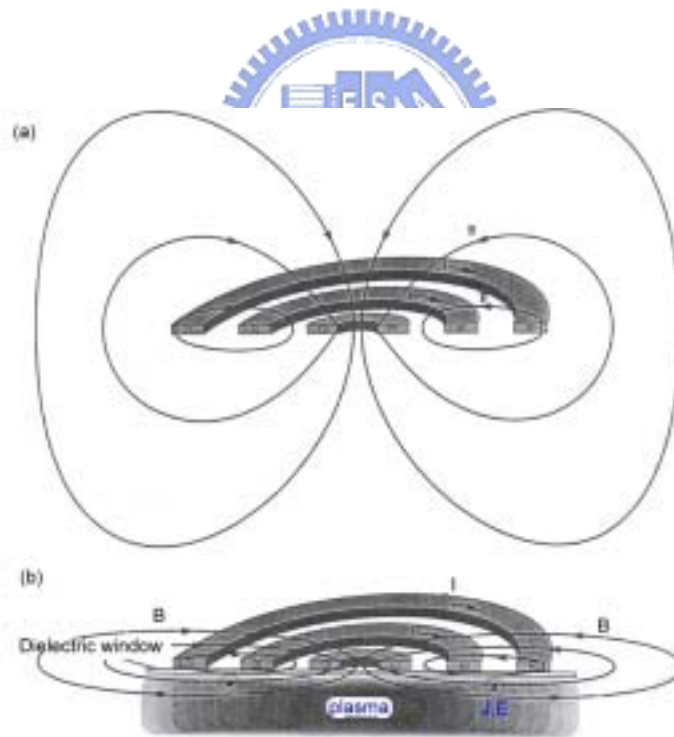
【圖 1-1】電漿蝕刻系統示意圖



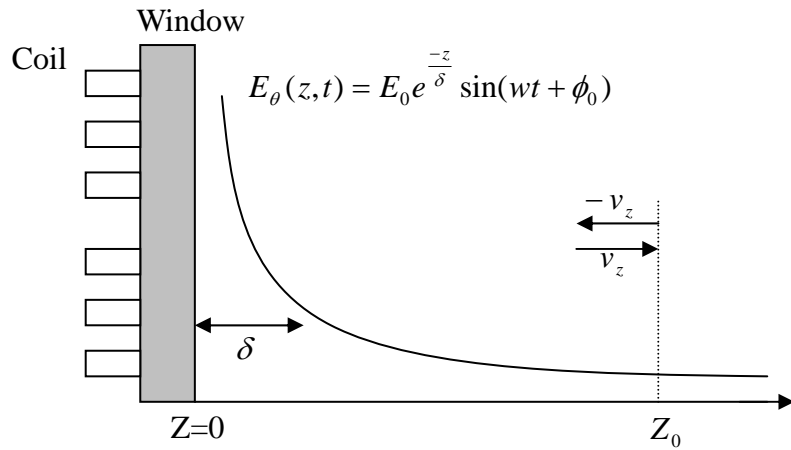
【圖 2-1】鞘層中離子與電子運動行為示意圖



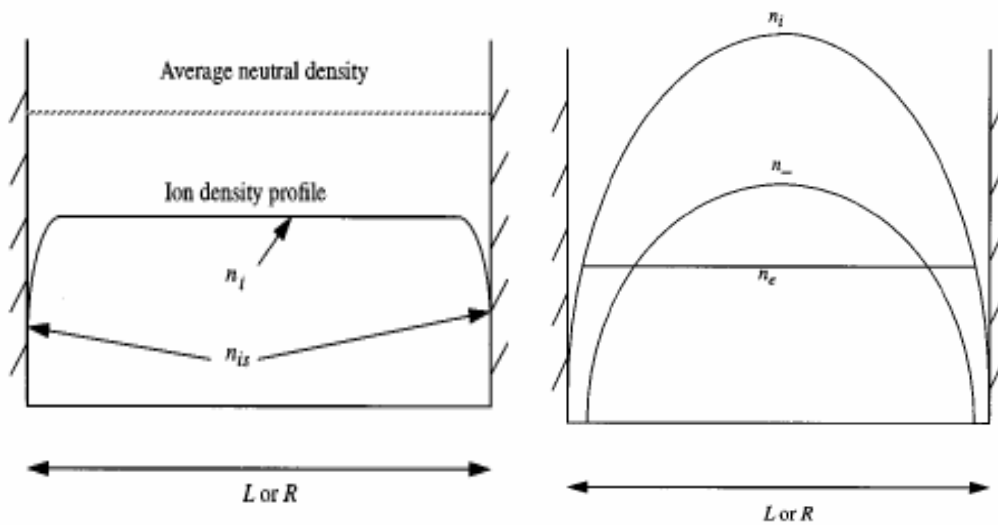
【圖 2-2】變壓耦合式電漿源示意圖【4】



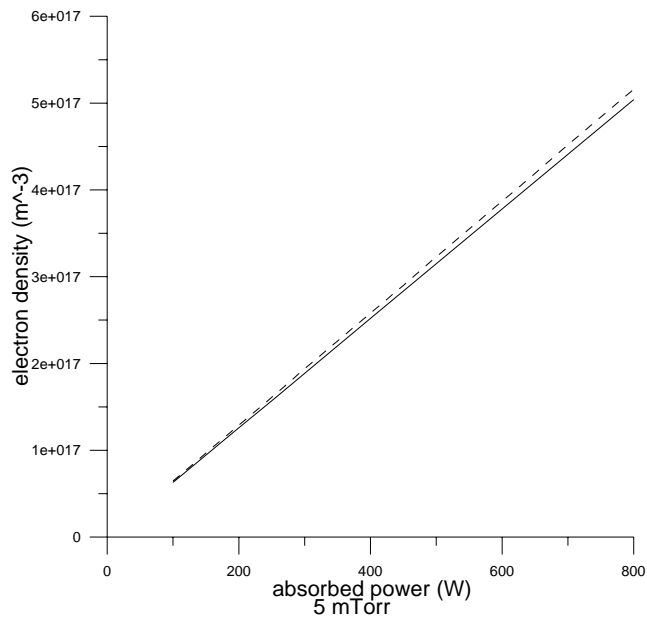
【圖 2-3】感應電場與感應磁場示意圖【22】



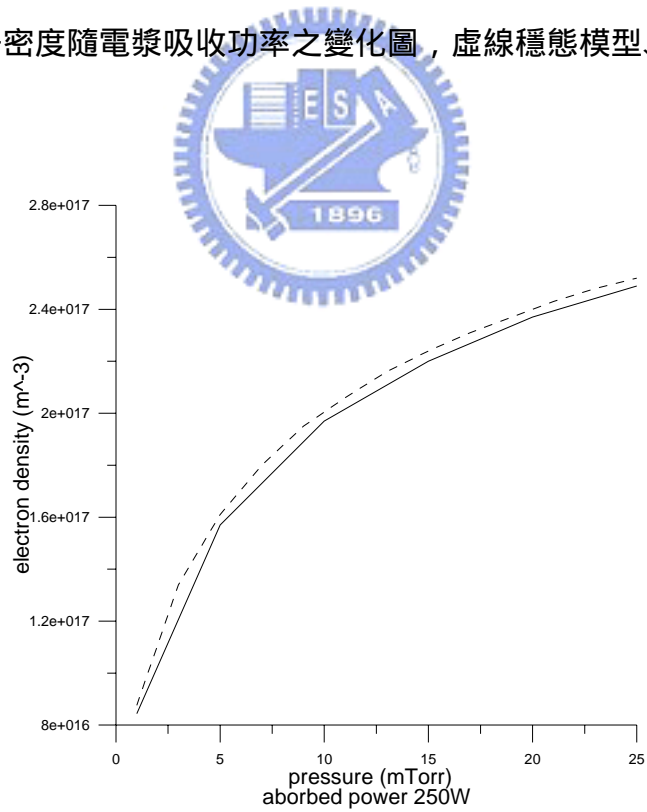
【圖 2-4】一維非碰撞加熱機制圖【23】



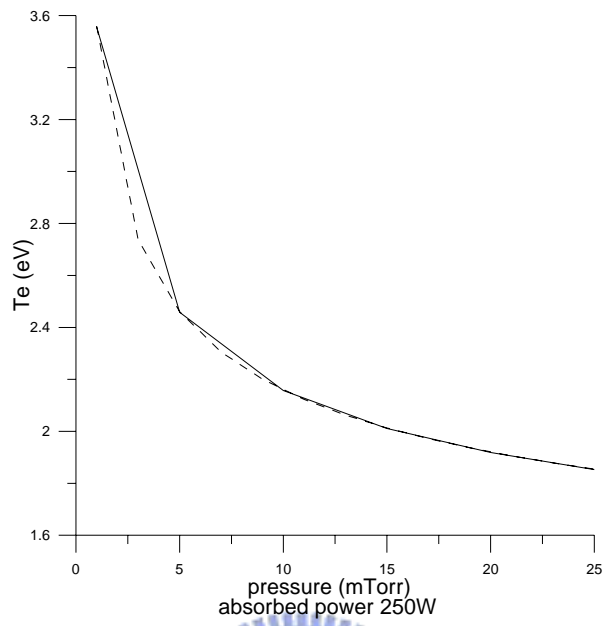
【圖 3-1】(a) 離子在腔體中的密度分佈 (b) 電子、負離子在腔體中的密度分佈【10】



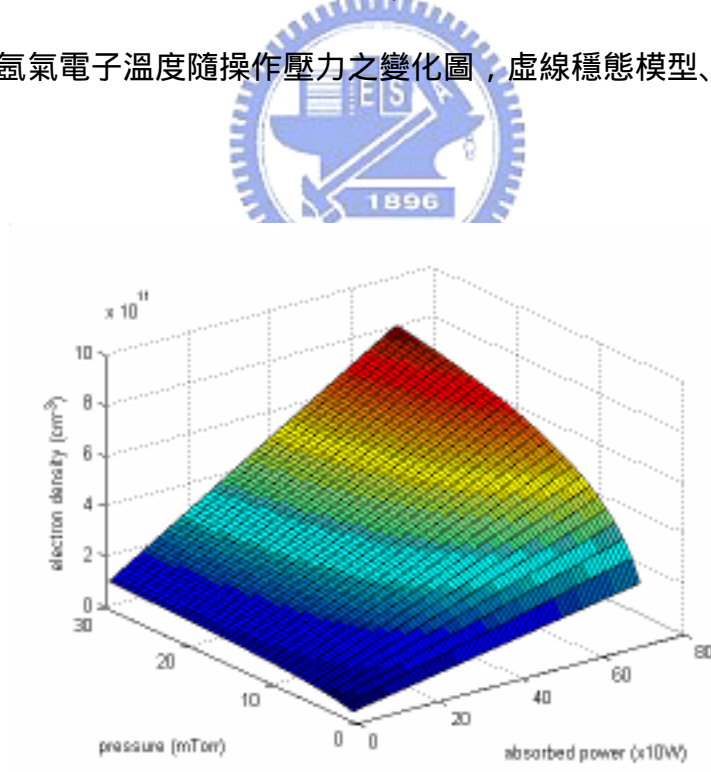
【圖 3-2】電子密度隨電漿吸收功率之變化圖，虛線穩態模型、實線動態模型



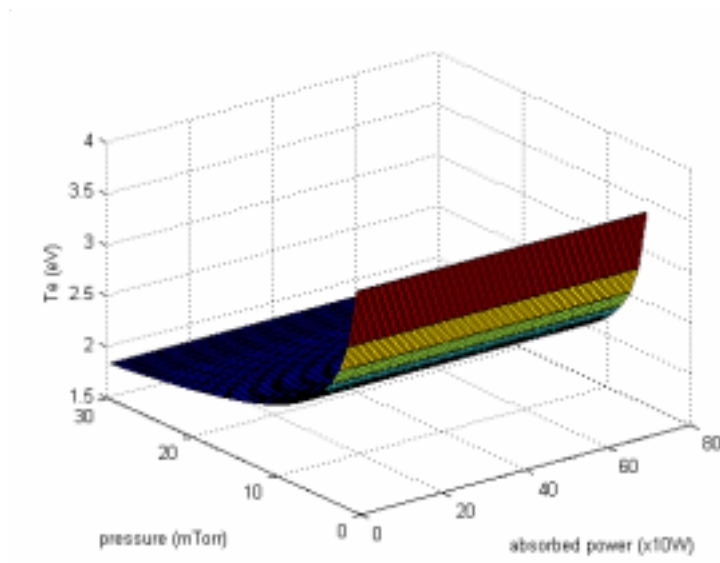
【圖 3-3】氬氣電子密度隨操作壓力之變化圖，虛線穩態模型、實線動態模型



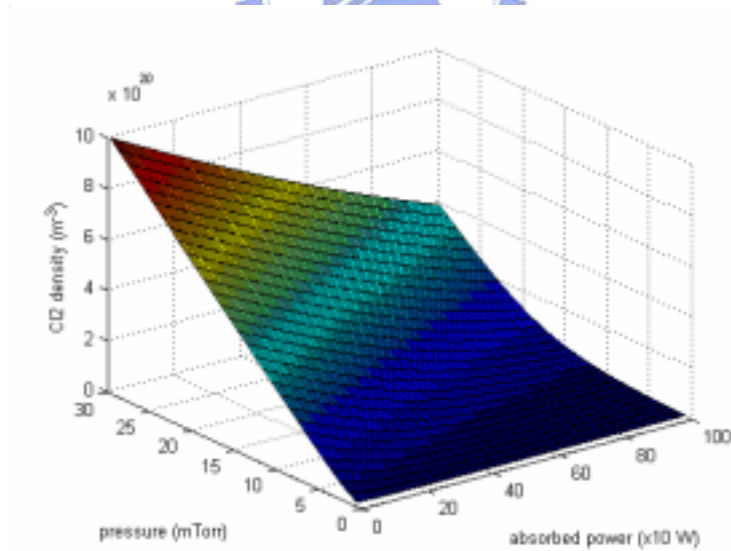
【圖 3-4】氬氣電子溫度隨操作壓力之變化圖，虛線穩態模型、實線動態模型



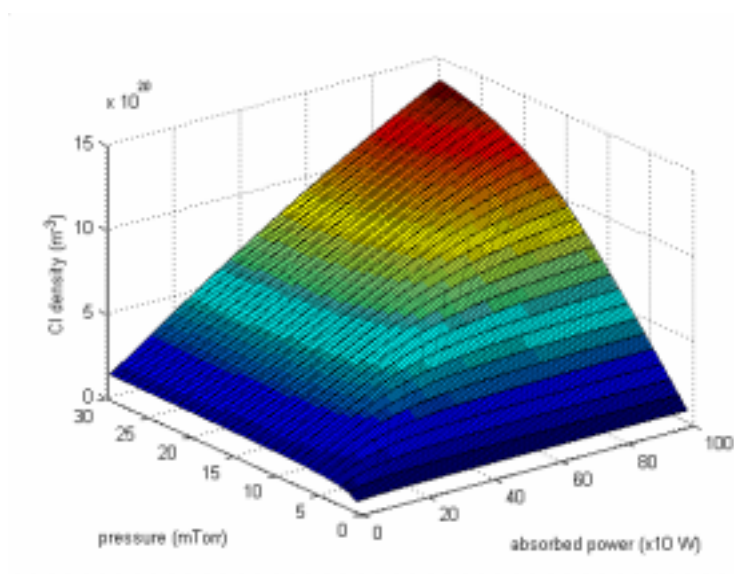
【圖 3-5】氬氣電子密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



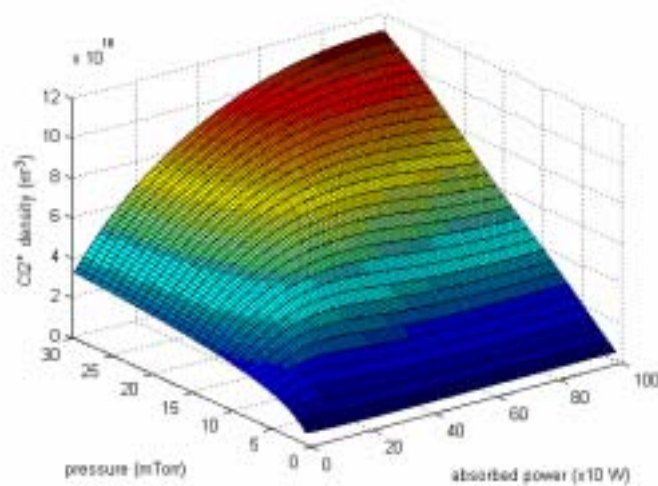
【圖 3-6】氬氣電子溫度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



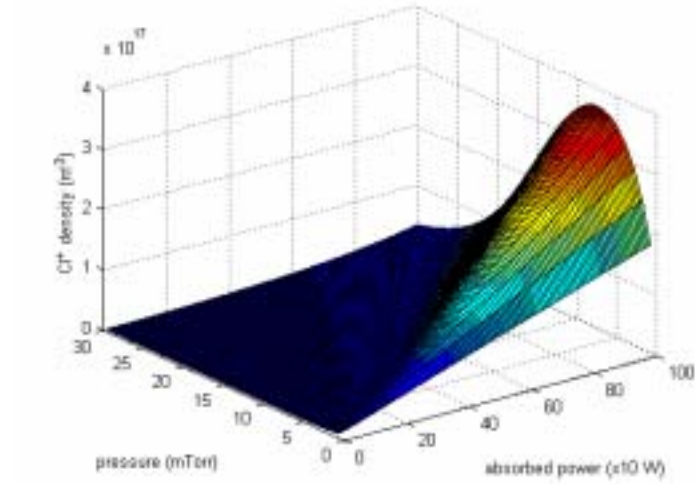
【圖 3-7】 Cl_2 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



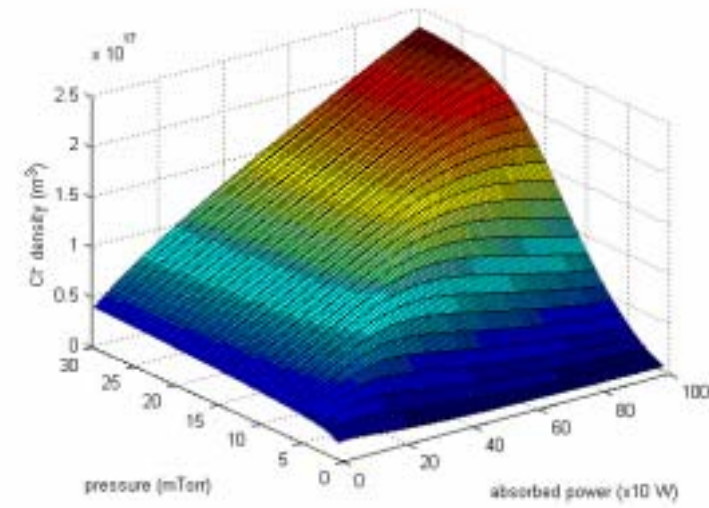
【圖 3-8】Cl 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



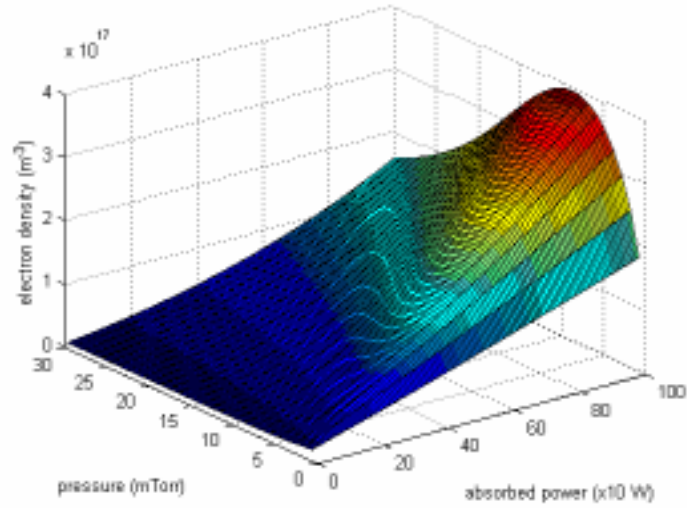
【圖 3-9】 Cl_2^+ 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



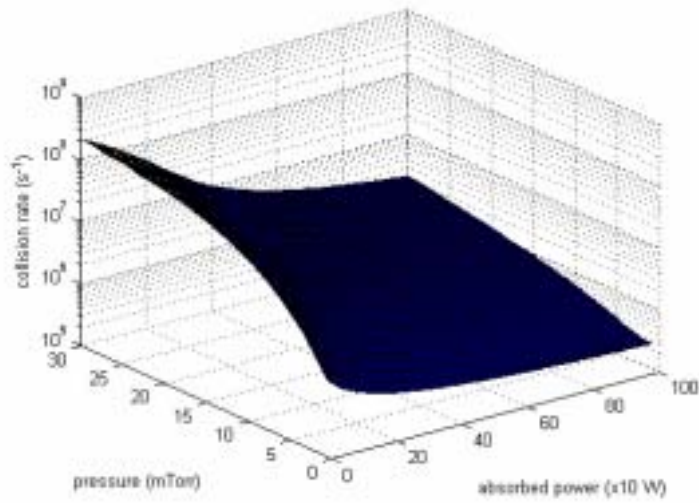
【圖 3-10】Cl⁺ 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



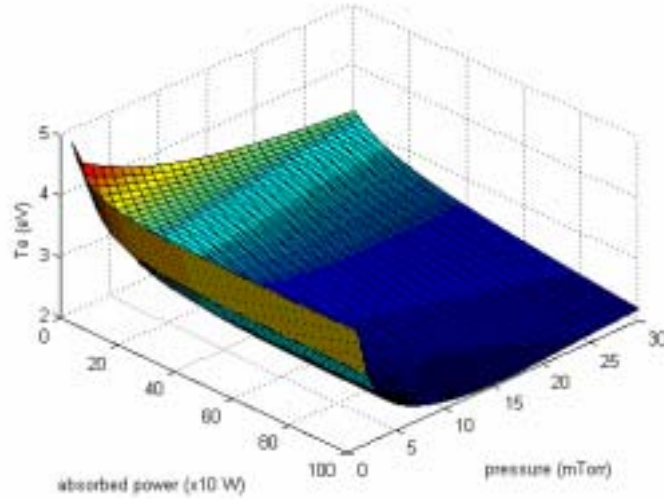
【圖 3-11】Cl⁻ 密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



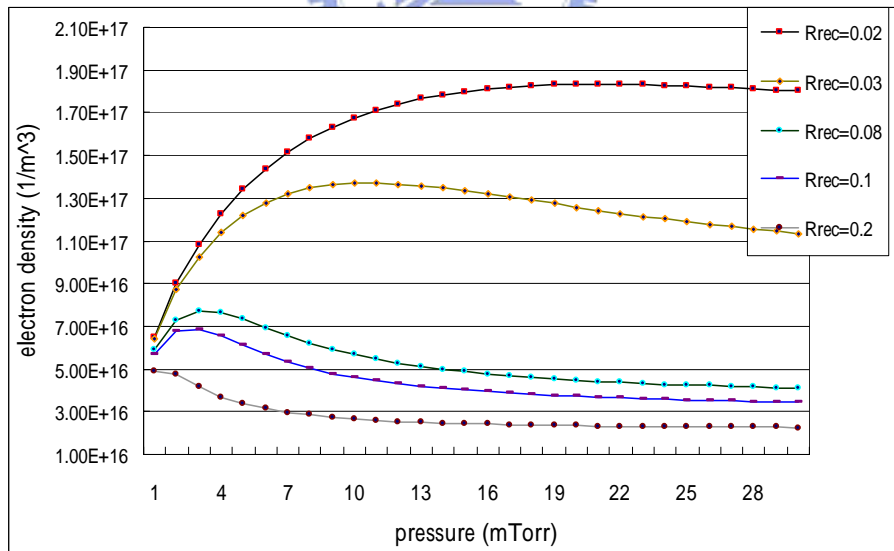
【圖 3-12】電子密度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



【圖 3-13】氯氣電漿電子與粒子間碰撞率隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



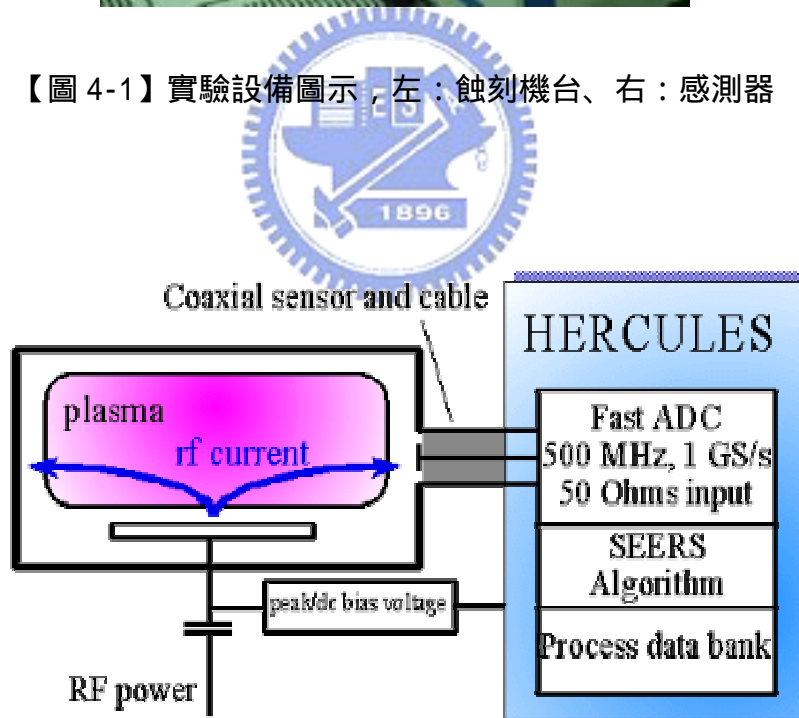
【圖 3-14】氯氣電漿中電子溫度隨電漿吸收功率、操作壓力之關係圖



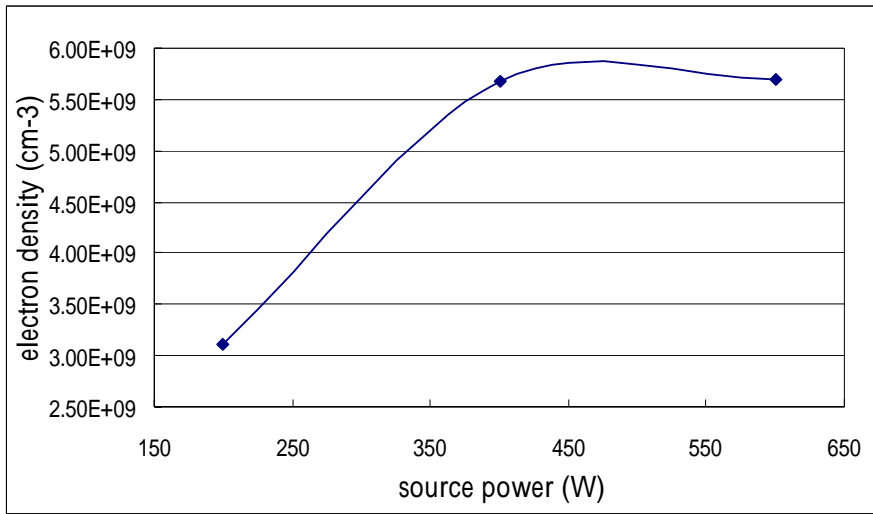
【圖 3-15】模擬在電漿吸收功率 400W、操作壓力 12mTorr 下，不同 R_{rec} 對電子密度之影響



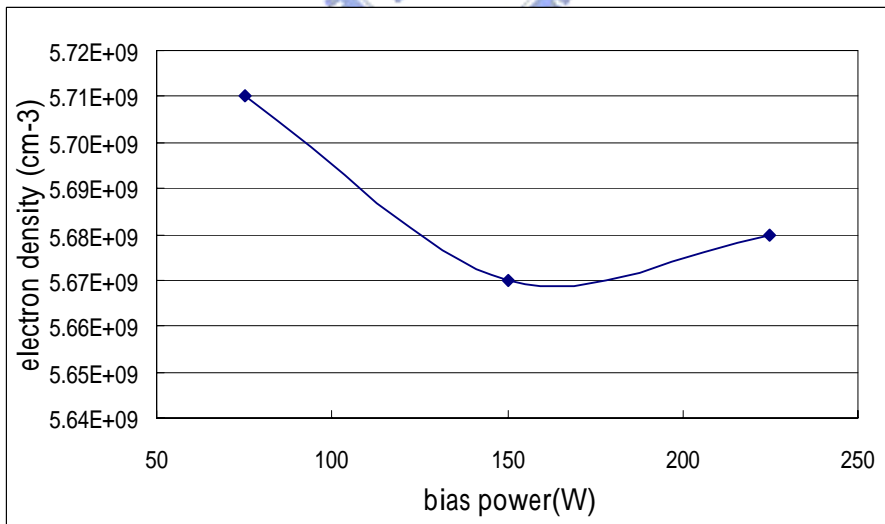
【圖 4-1】實驗設備圖示，左：蝕刻機台、右：感測器



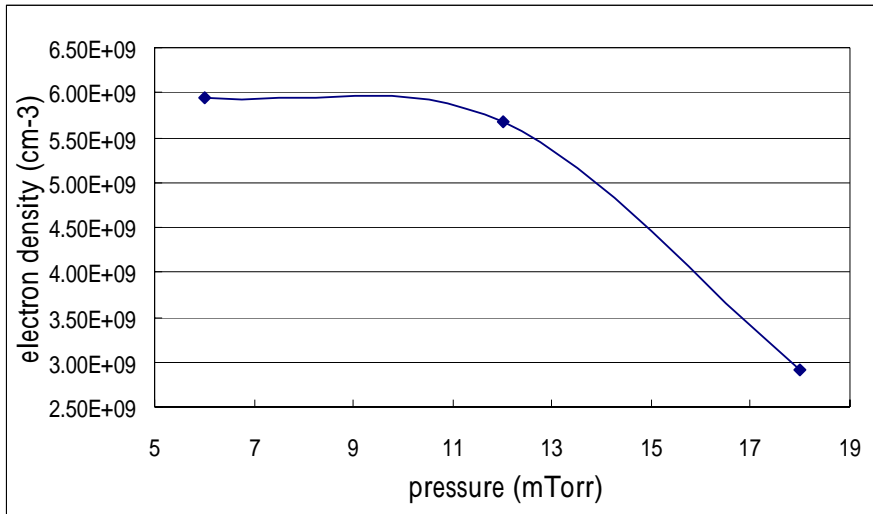
【圖 4-2】自激發電子電漿共振儀（SEERS）【1】



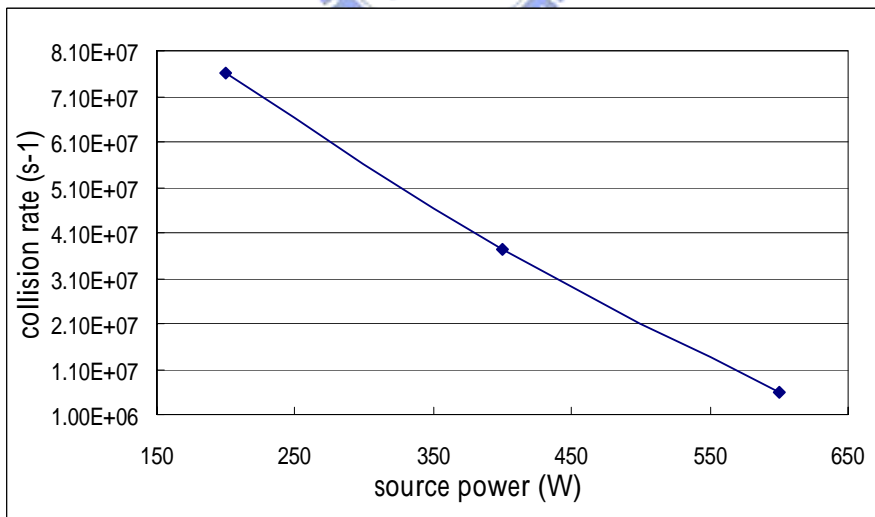
【圖 4-3】電子密度在製程基準線下改變 source power 之變化圖 (pattern wafer)



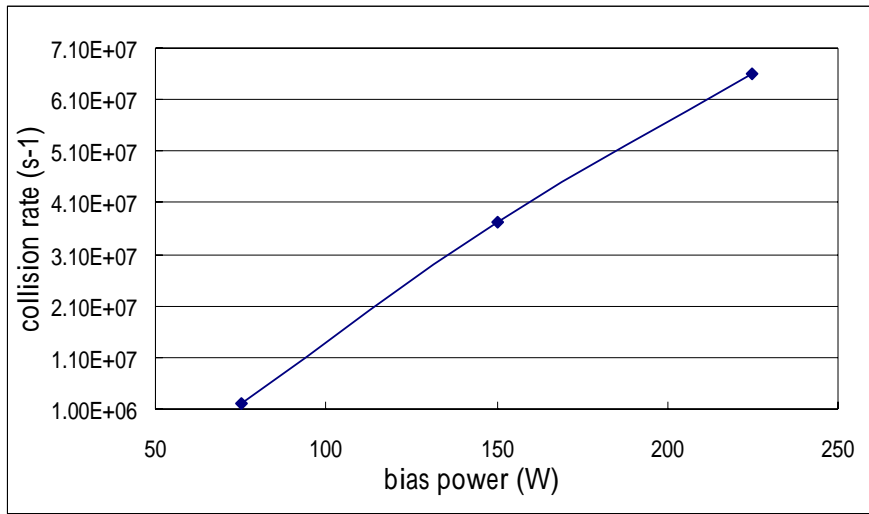
【圖 4-4】電子密度在製程基準線下改變 bias power 之變化圖 (pattern wafer)



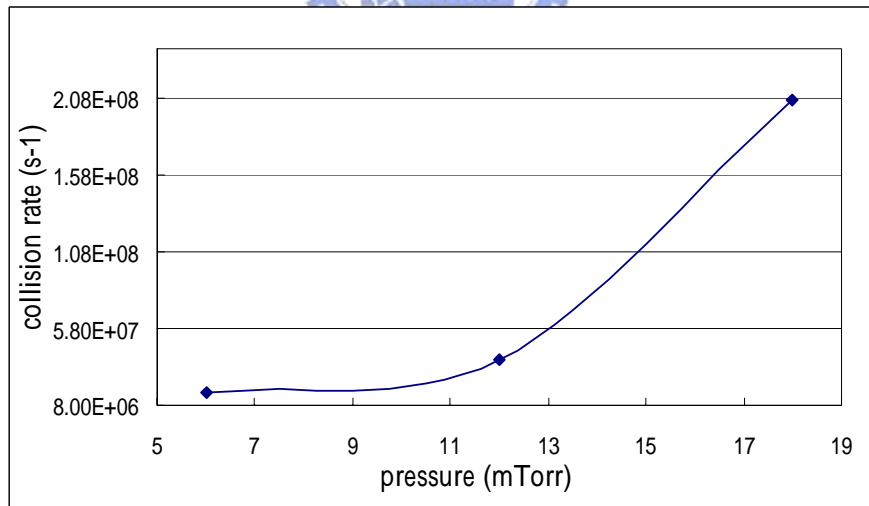
【圖 4-5】電子密度在製程基準線下改變壓力之變化圖 (pattern wafer)



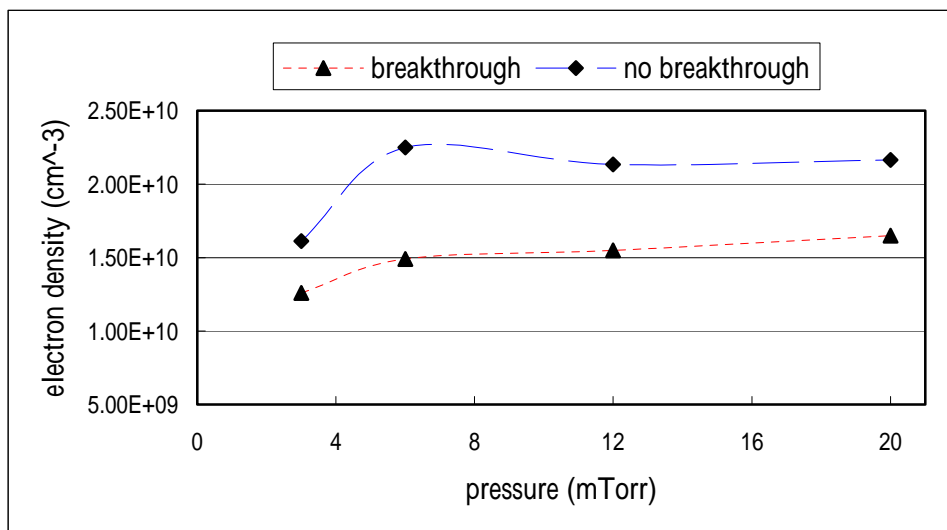
【圖 4-6】電子碰撞率在製程基準線下改變 source power 之變化圖(pattern wafer)



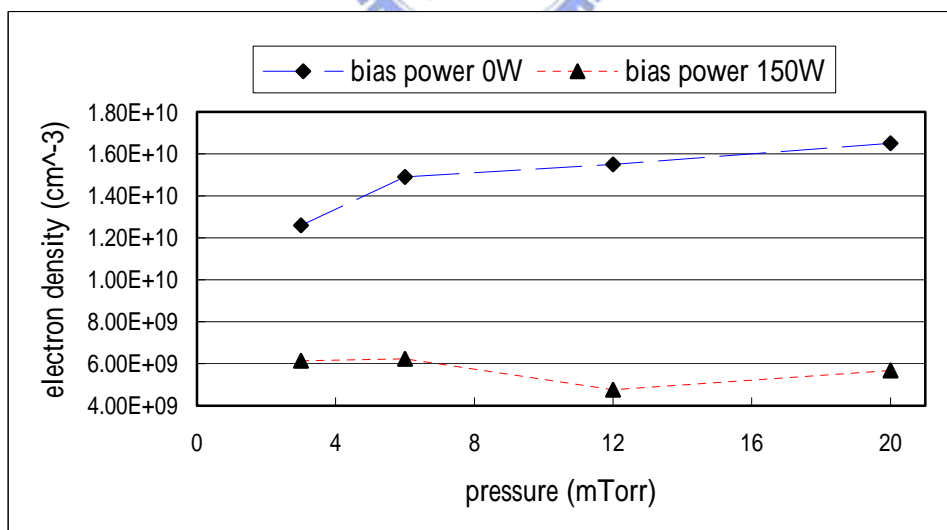
【圖 4-7】電子碰撞率在製程基準線下改變 bias power 之變化圖 (pattern wafer)



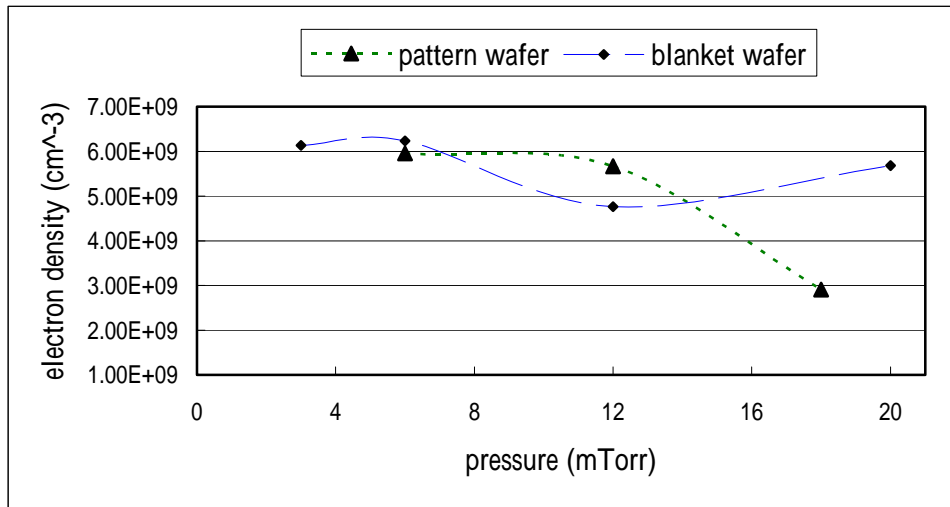
【圖 4-8】電子碰撞率在製程基準線下改變壓力之變化圖 (pattern wafer)



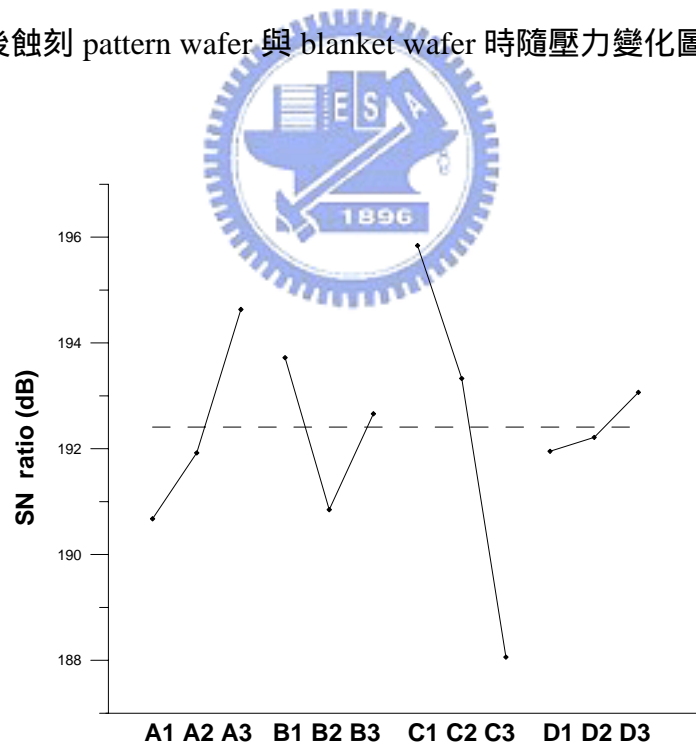
【圖 4-9】電子密度在 source power 400W、無 bias power 下受 breakthrough 隨壓力變化圖 (blanket wafer)



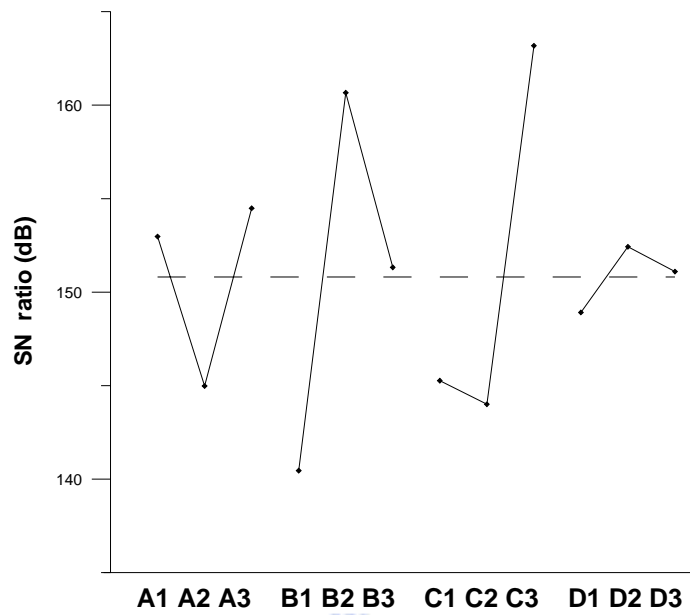
【圖 4-10】電子密度在 source power 400W 在 breakthrough 後受 bias power 之影響隨壓力變化圖 (blanket wafer)



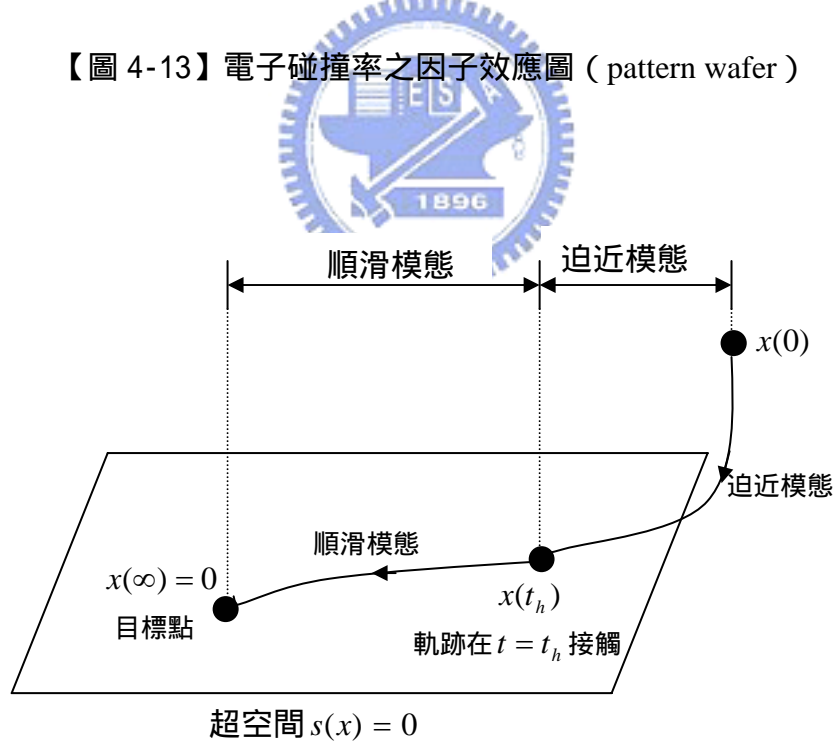
【圖 4-11】電子密度在 source power 400W、bias power 150W，在 breakthrough 後蝕刻 pattern wafer 與 blanket wafer 時隨壓力變化圖



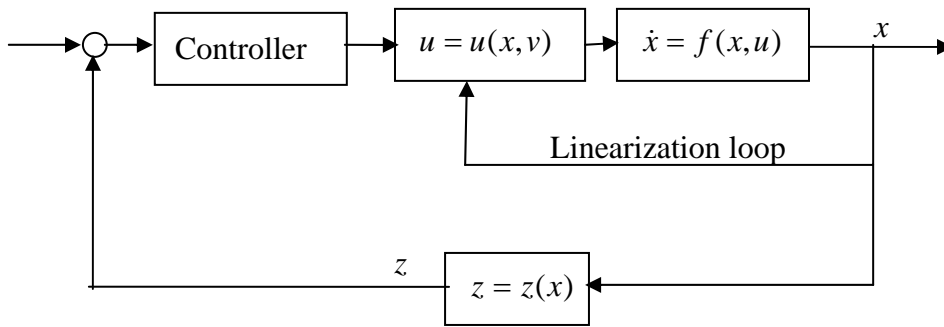
【圖 4-12】電子密度之因子效應圖 (pattern wafer)



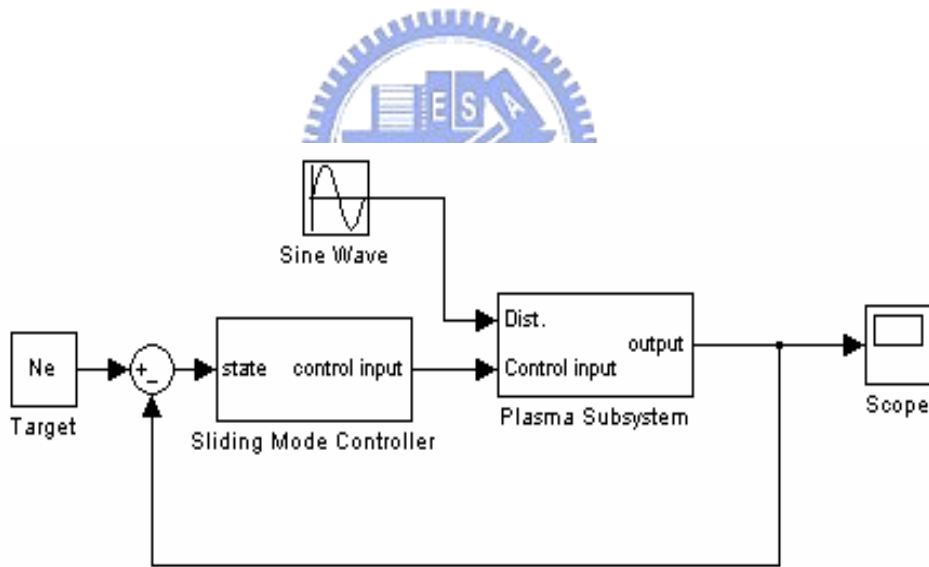
【圖 4-13】電子碰撞率之因子效應圖 (pattern wafer)



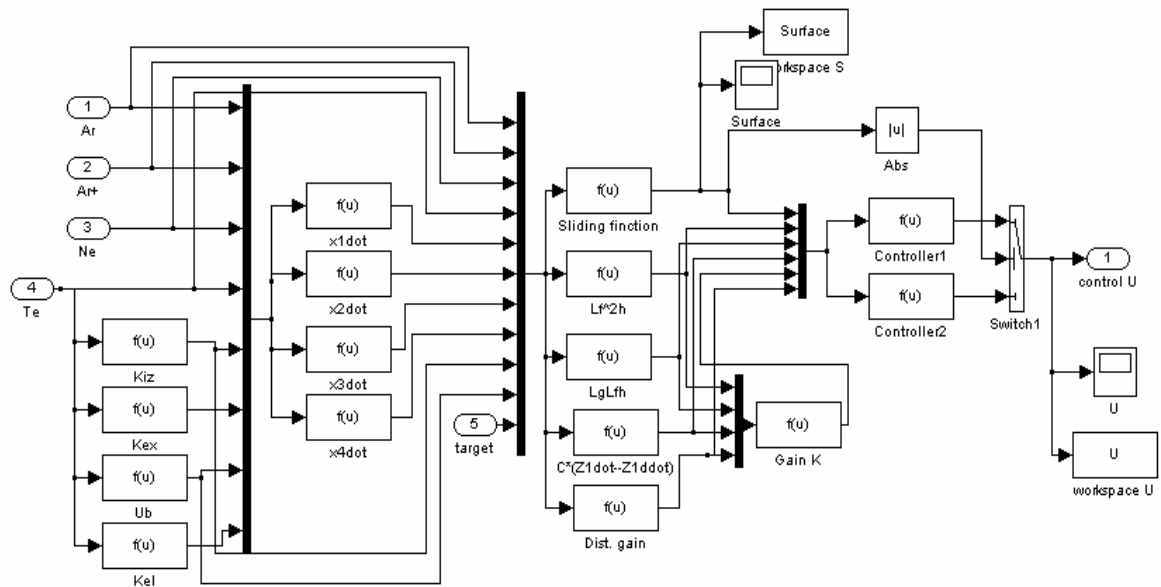
【圖 5-1】順滑模態產生過程【33】



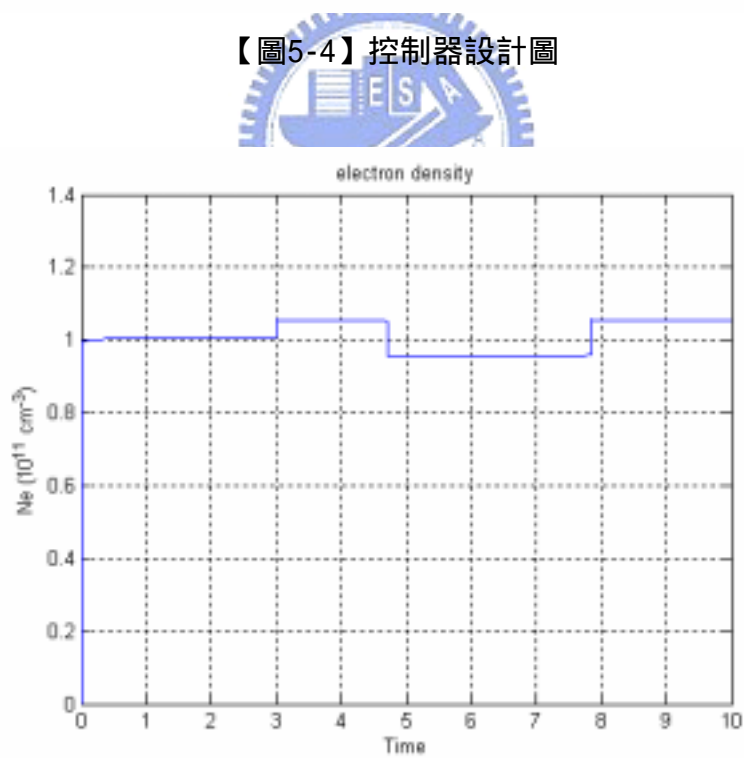
【圖 5-2】 Feedback linearization block diagram 【34】



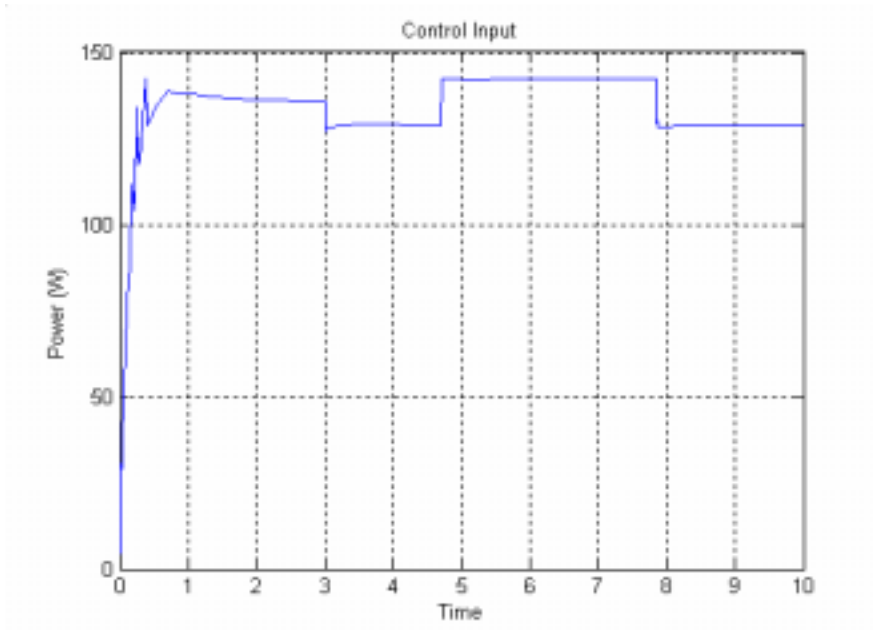
【圖5-3】 順滑模態控制器控制流程圖



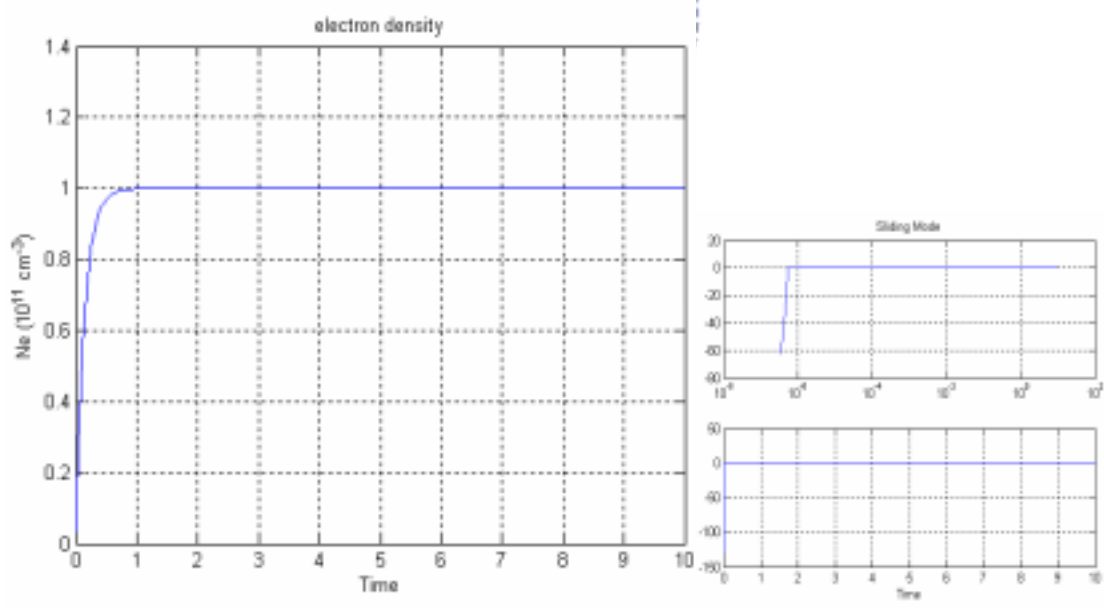
【圖5-4】控制器設計圖



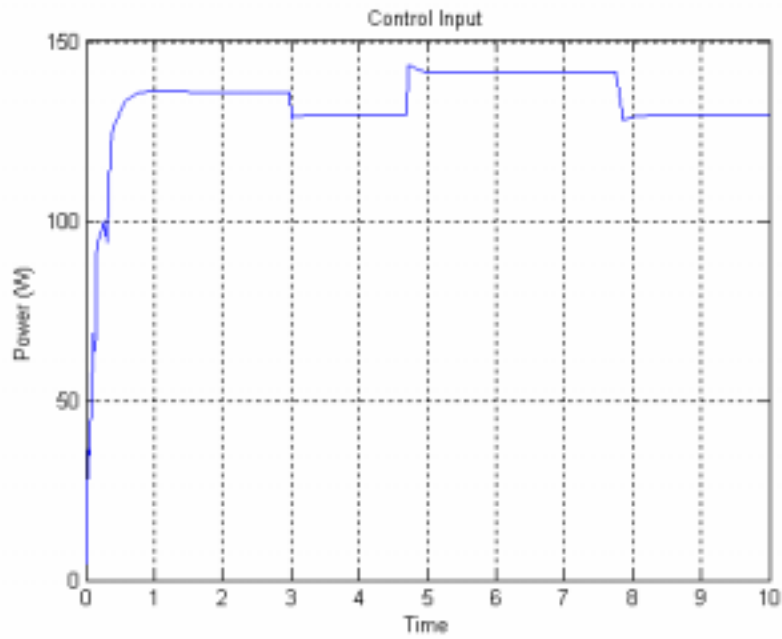
【圖5-5】操作壓力於10mTorr，考慮step disturbance在未受控制下電子密度圖



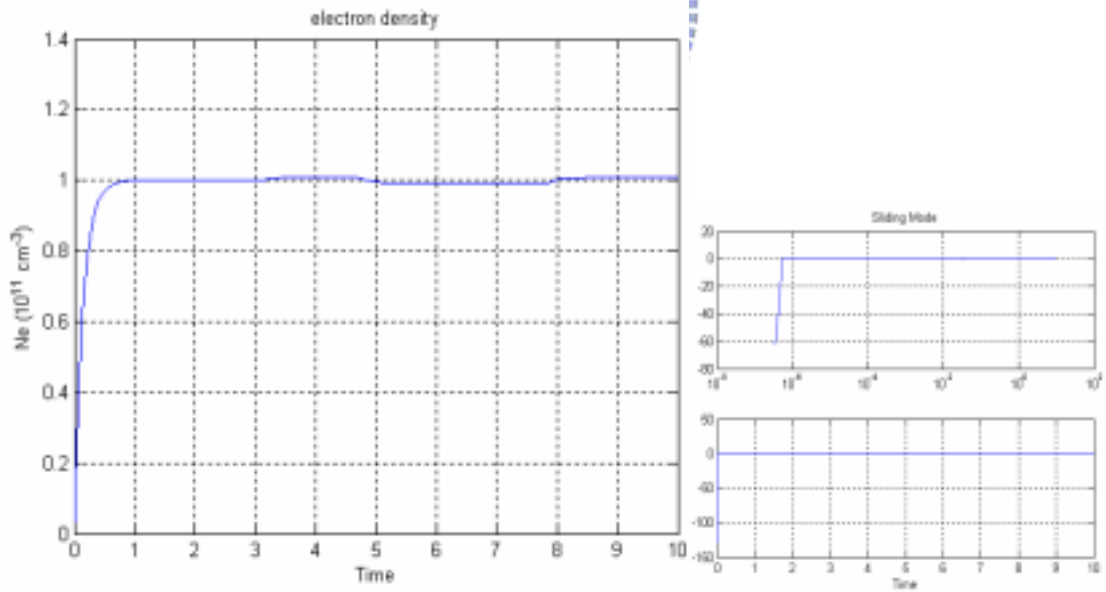
【圖5-6】操作壓力於10mTorr，在sliding layer=0.1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7控制輸入圖



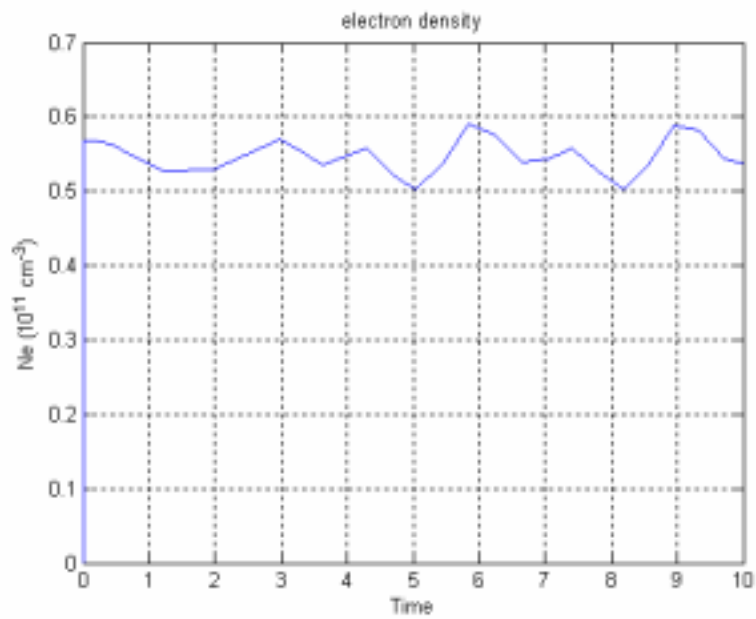
【圖5-7】操作壓力於10mTorr，在sliding layer=0.1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7電子密度與順滑平面圖



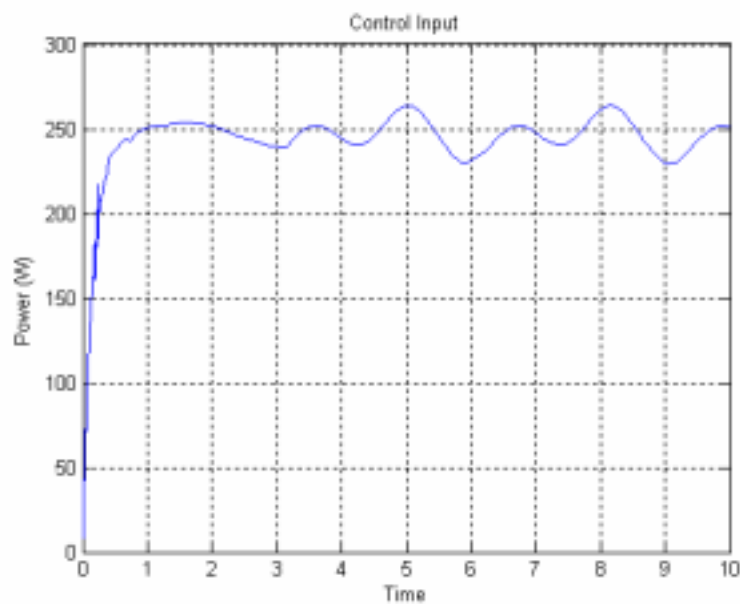
【圖5-8】操作壓力於10mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7控制輸入圖



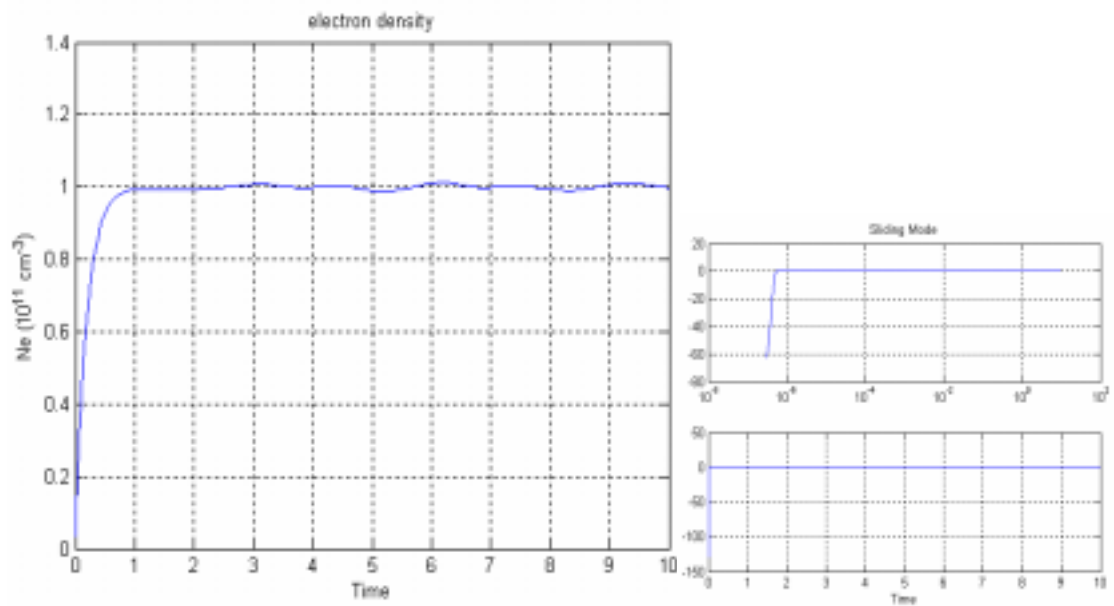
【圖5-9】操作壓力於10mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7電子密度與順滑平面圖



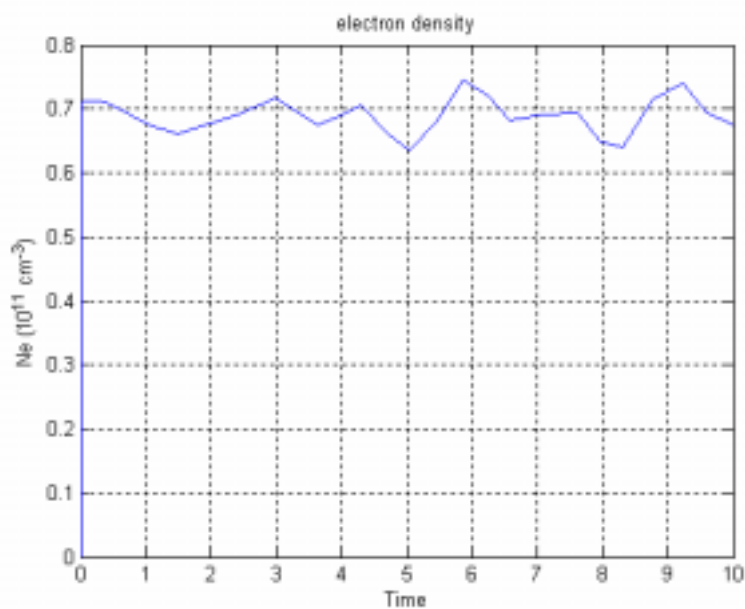
【圖5-10】操作壓力於10mTorr，電漿吸收功率介於53%~58%間未受控制電子密度圖



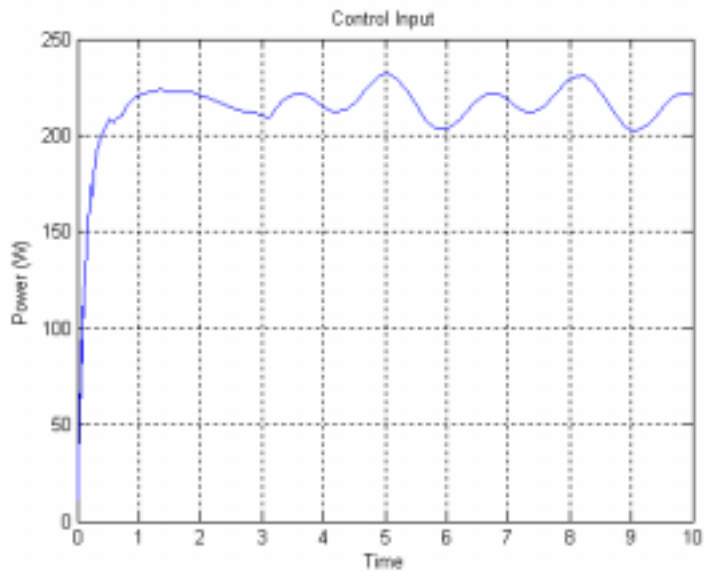
【圖5-11】操作壓力於10mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7，電漿吸收功率介於53%~58%間控制輸入圖



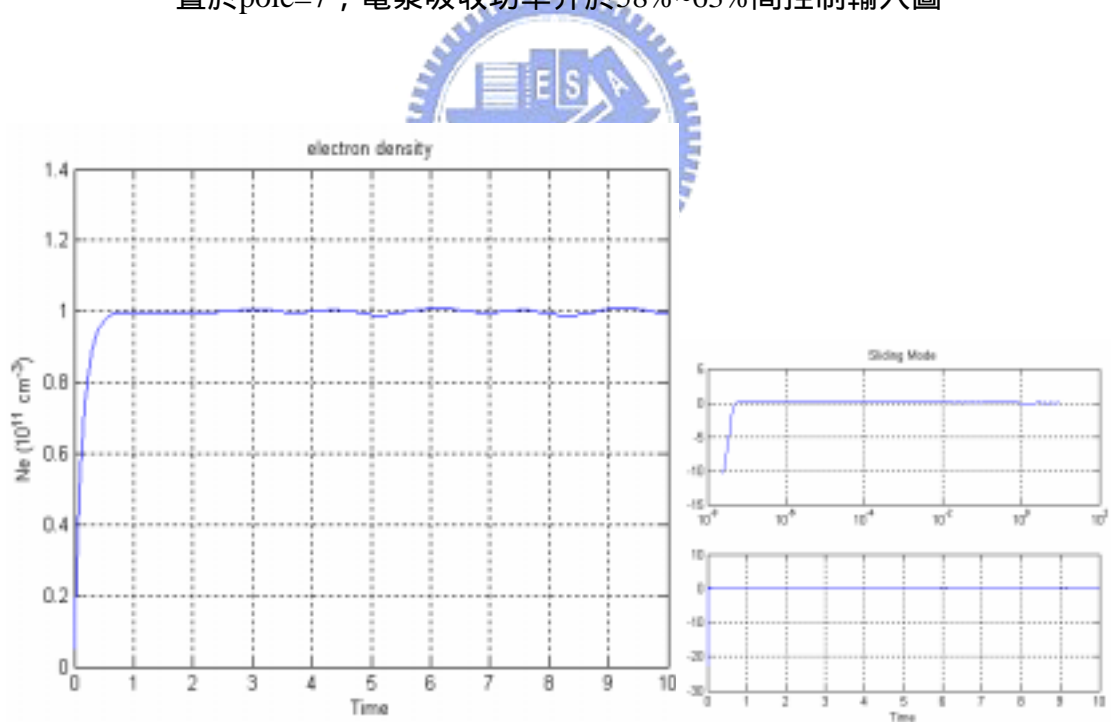
【圖5-12】操作壓力於10mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7，電漿吸收功率介於53%~58%間電子密度與順滑平面圖



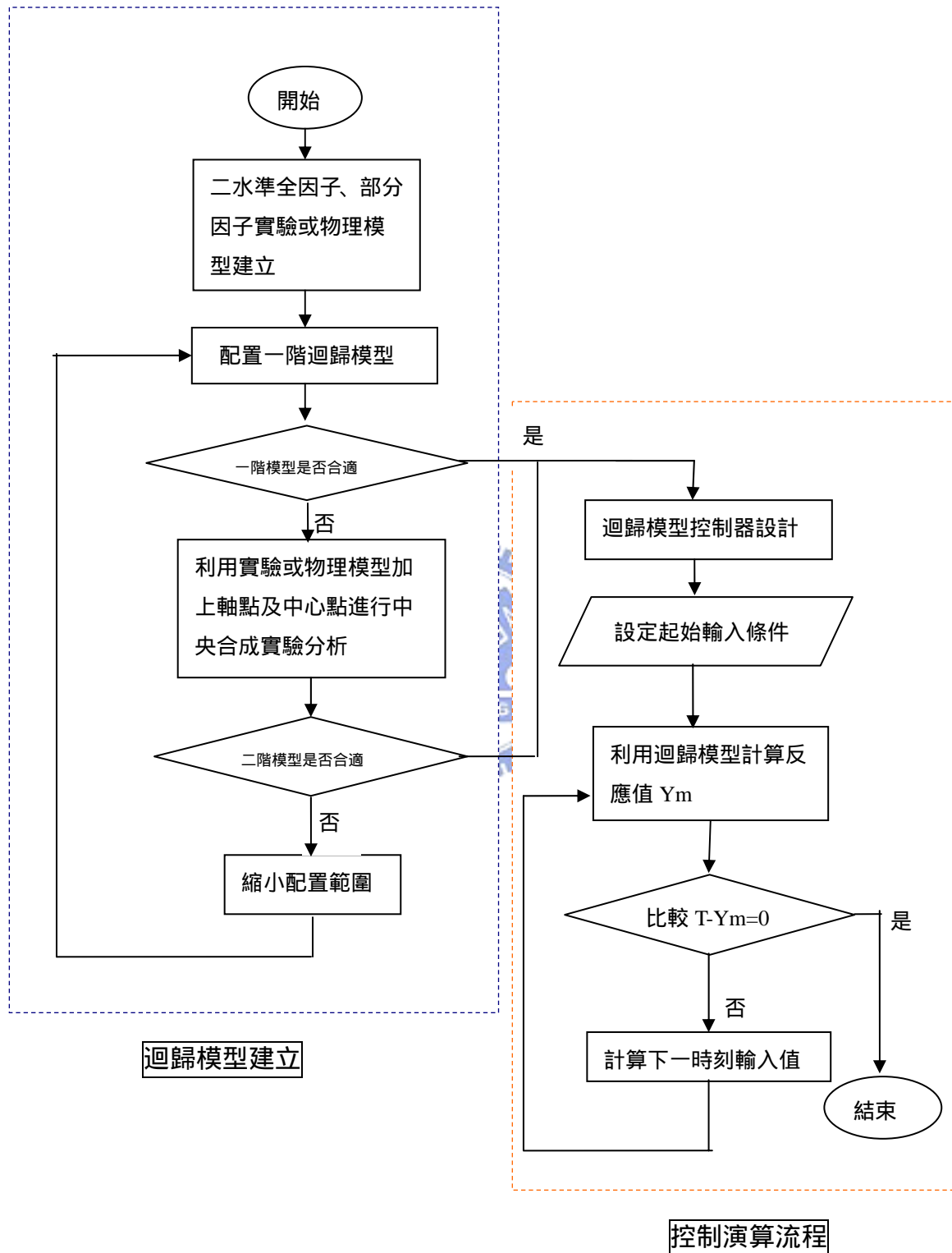
【圖5-13】操作壓力於15mTorr，電漿吸收功率介於58%~63%間未受控制之電子密度圖



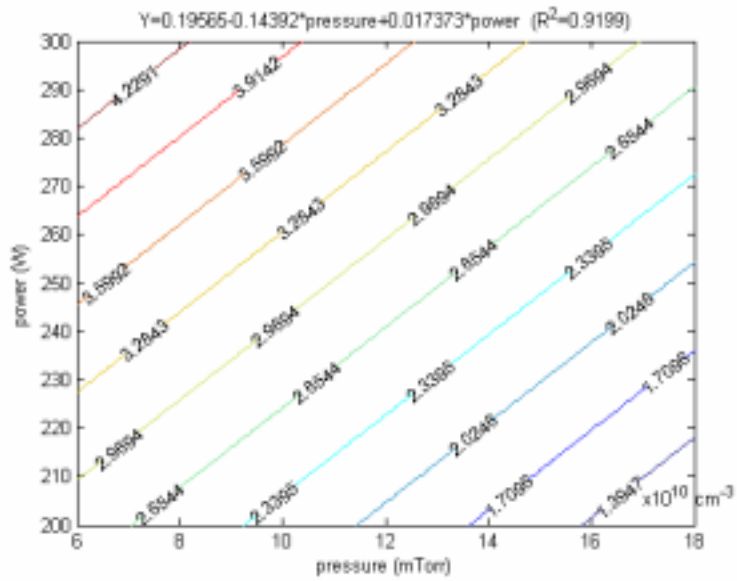
【圖5-14】操作壓力於15mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7，電漿吸收功率介於58%~63%間控制輸入圖



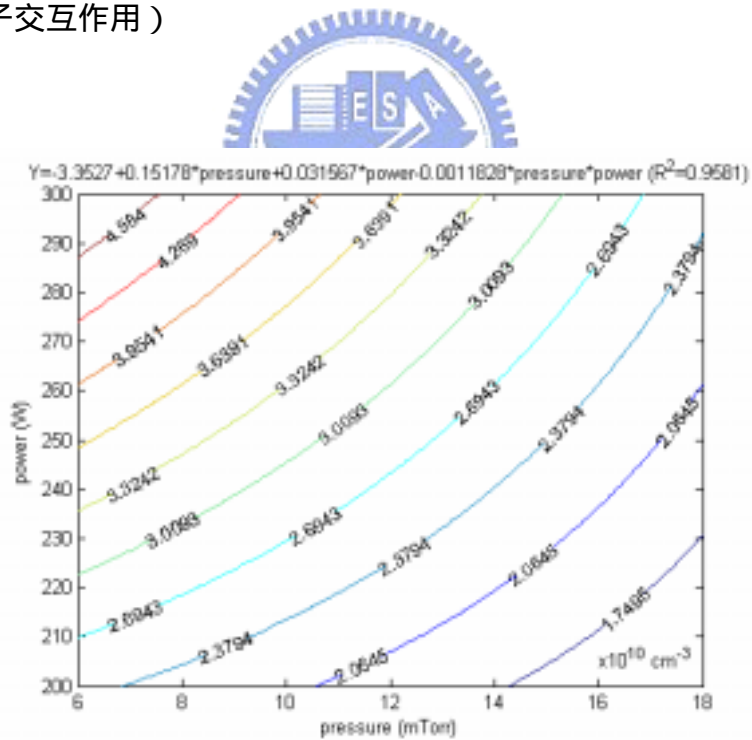
【圖5-15】操作壓力於15mTorr，在sliding layer=1、收斂速度 $\eta=1$ 、極點放置於pole=7，電漿吸收功率介於58%~63%間電子密度與順滑平面圖



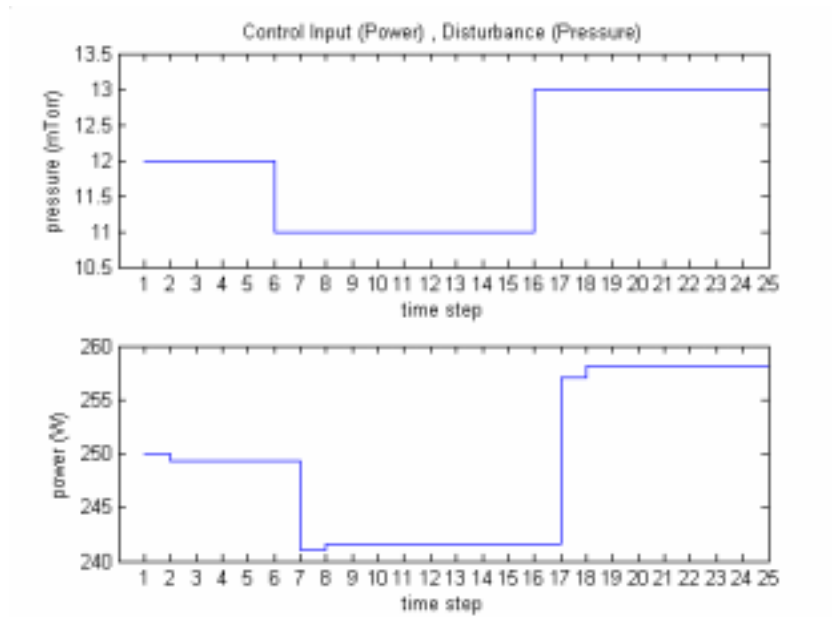
【圖5-16】穩態系統模型建構與控制流程圖



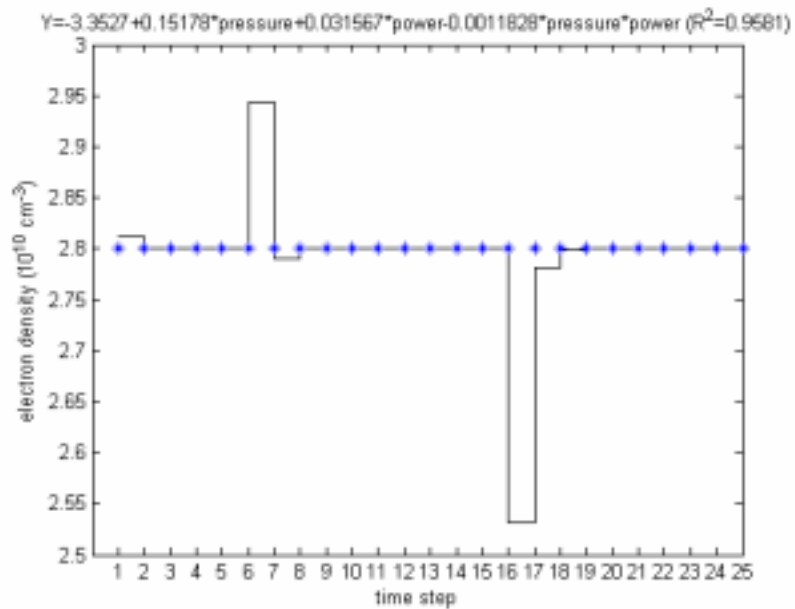
【圖5-17】氯氣電漿源中電子密度對吸收功率與壓力之反應曲面等高線圖（無因子交互作用）



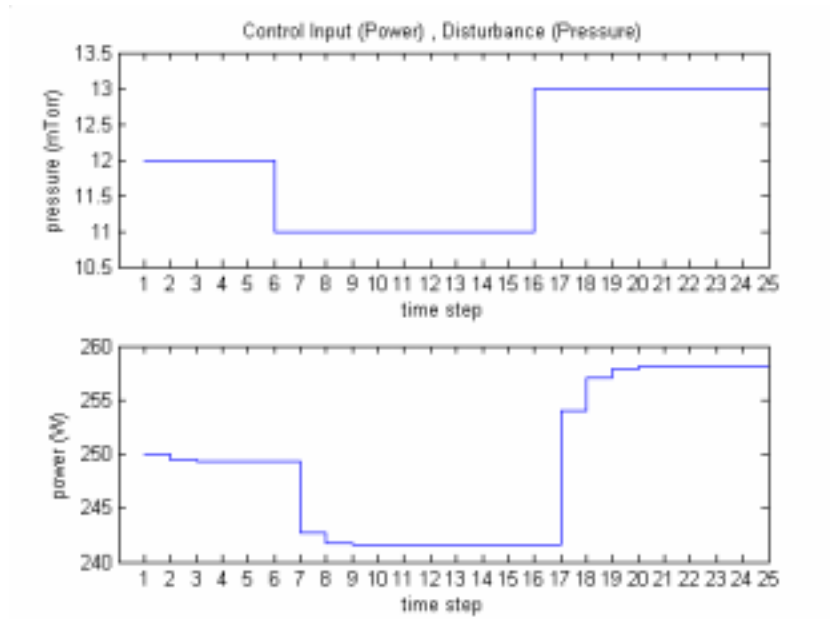
【圖5-18】氯氣電漿源中電子密度對吸收功率與壓力之反應曲面等高線圖（含因子交互作用）



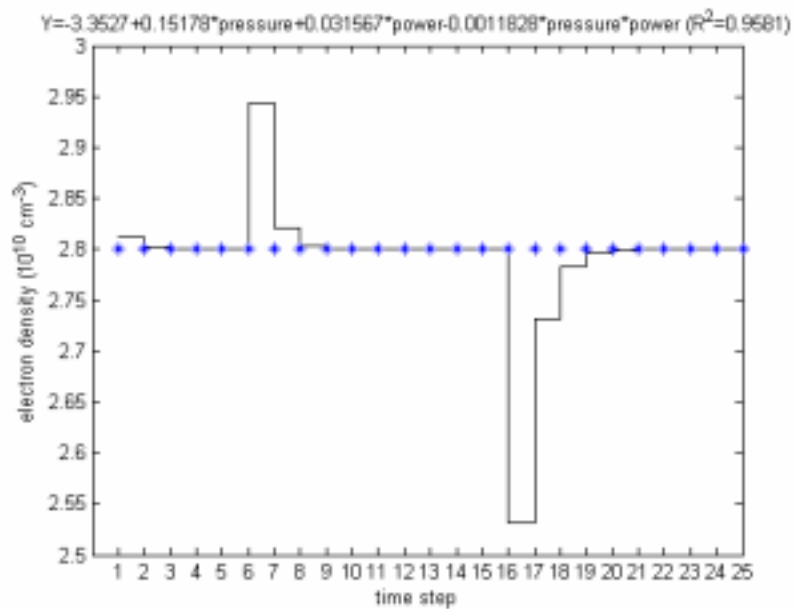
【圖5-19】模擬 $\lambda = 1$ 時致動器變化圖



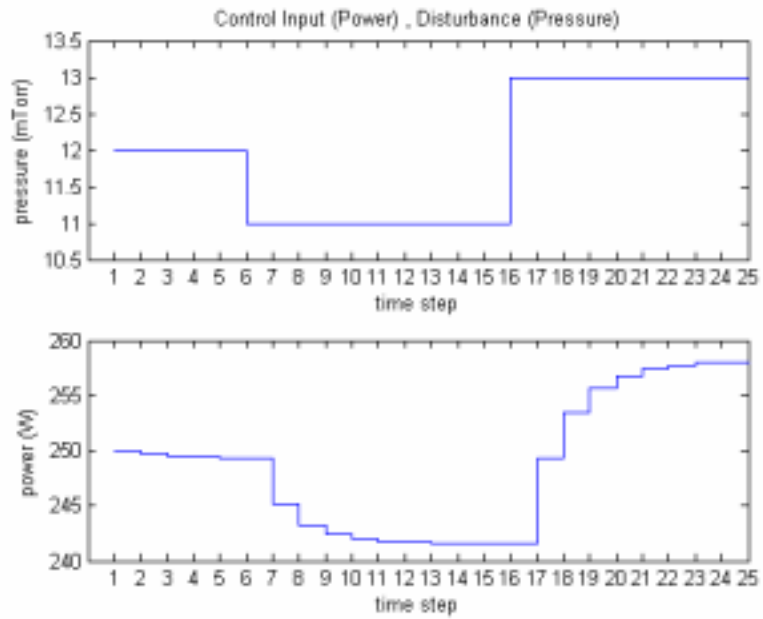
【圖5-20】模擬 $\lambda = 1$ 時電子密度變化圖



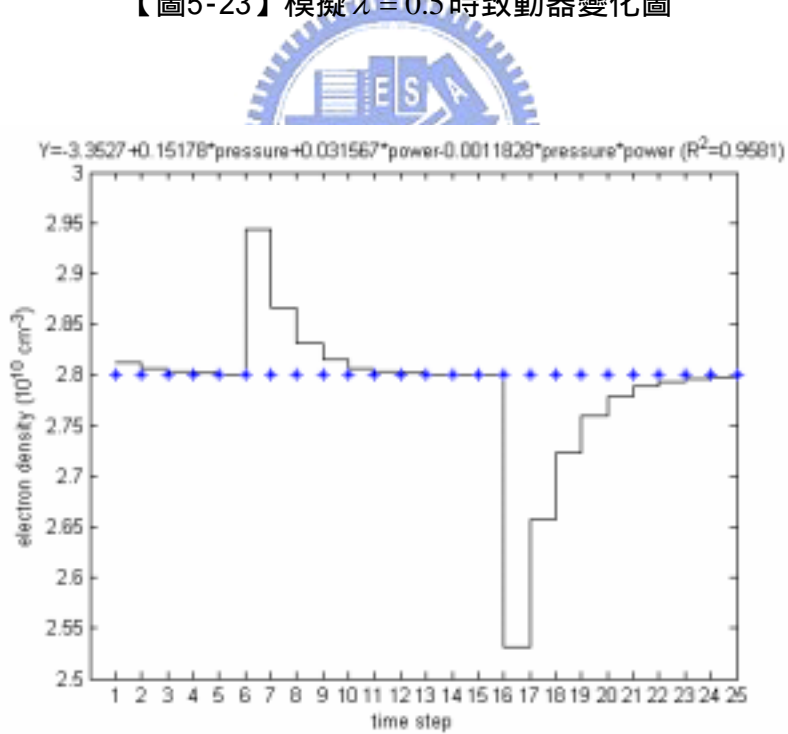
【圖5-21】模擬 $\lambda = 0.8$ 時致動器變化圖



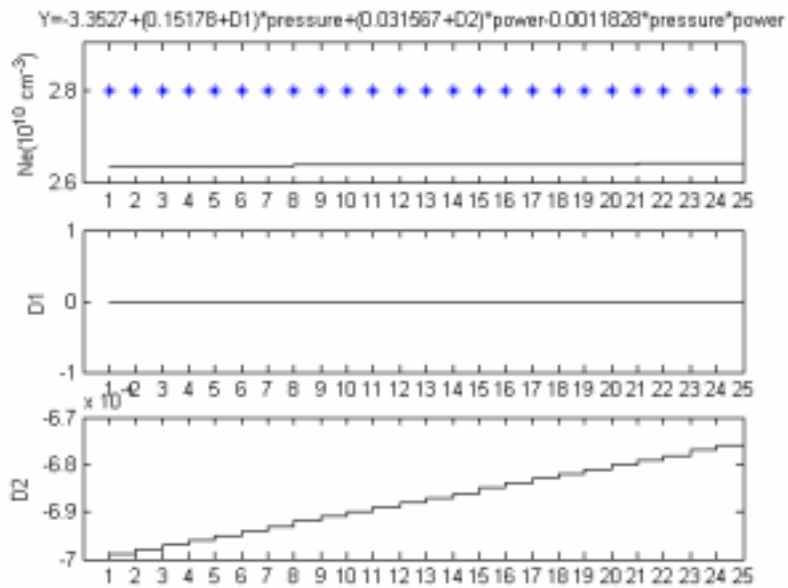
【圖5-22】模擬 $\lambda = 0.8$ 時電子密度變化圖



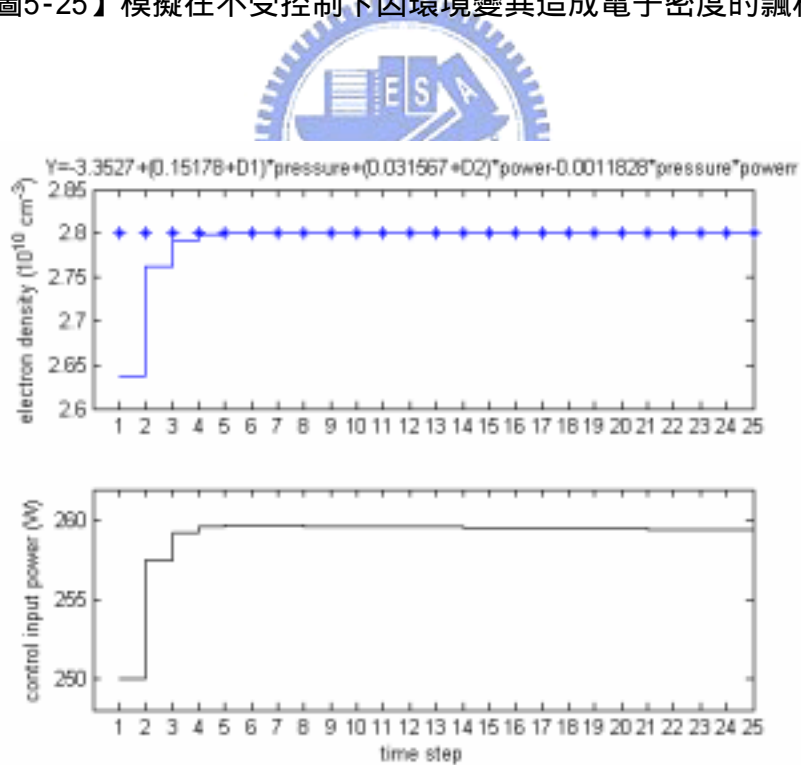
【圖5-23】模擬 $\lambda = 0.5$ 時致動器變化圖



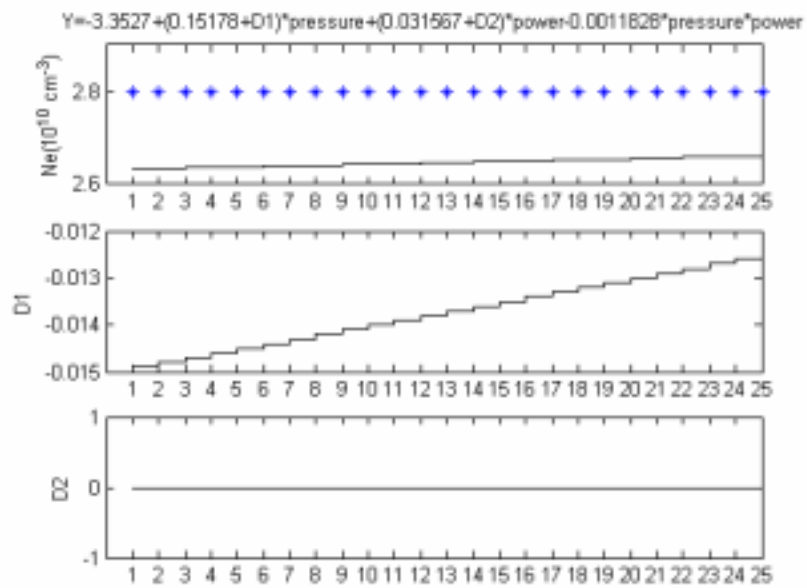
【圖5-24】模擬 $\lambda = 0.5$ 時電子密度變化圖



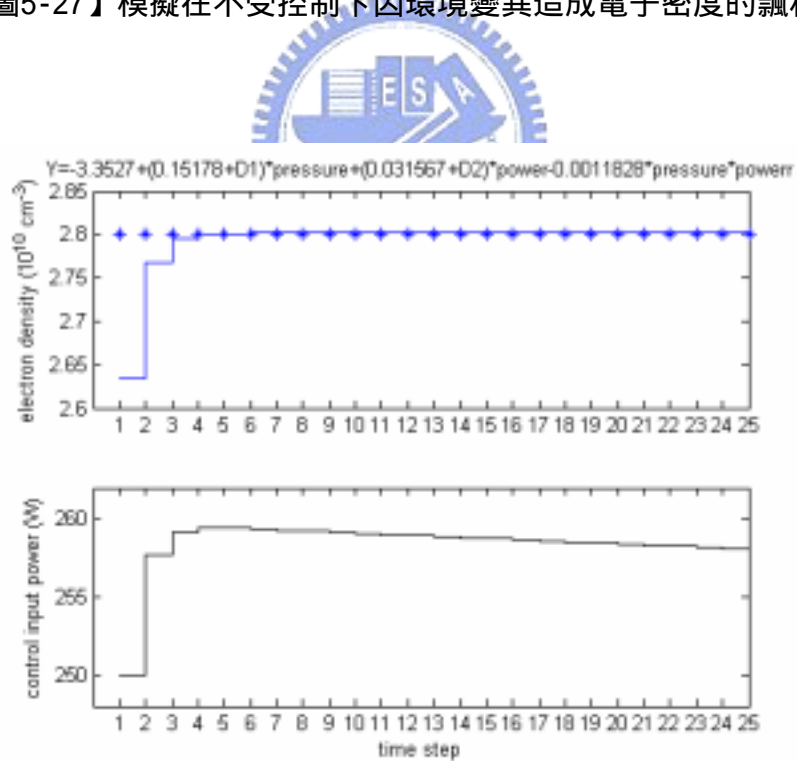
【圖5-25】模擬在不受控制下因環境變異造成電子密度的飄移圖



【圖5-26】模擬 $\lambda = 0.8$ 時因環境因素所造成電子密度偏移控制器輸入對系統的補償



【圖5-27】模擬在不受控制下因環境變異造成電子密度的飄移圖



【圖5-28】模擬 $\lambda = 0.8$ 時因環境因素所造成電子密度偏移控制器輸入對系統的補償

參考文獻

- 【1】 Andreas Steinbach, "Importance of in-situ measurement techniques for Advanced Process Control of plasma processing in high volume production", 3rd European AEC/APC Conference - Dresden, April 10th-12th 2002
- 【2】Teina Pardue, "Long-term Stability and FDC of Plasma Parameters for Trench Si Etching Using Lam TCP 9400 PTX ", 3rd European AEC/APC Conference - Dresden, P306, April 10th-12th 2002
- 【3】 Thomas Dittkrist, "Application of plasma parameters to characterize product interactions between memory and logic products at Gate Contact (GC) Stack etch in LAM TCP", 2rd European AEC/APC Conference - Dresden, P204, April 18th-20th 2001
- 【4】 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
- 【5】 K. H. A. Bogart, F. P. Klemens, M. V. Malyshev, J. I. Colonell, V. M. Donnelly, J. T. C. Lee, J. M. Lane, "Mask charging and profile evolution during chlorine plasma etching of silicon", J. Vac. Sci. Technol. A 18(1), 2000
- 【6】 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
- 【7】 P. L. G. Ventzek, T. J. Sommerer, Robert J. Hoekstra and Mark J. Kushner, "Two dimensional hybrid model of inductively coupled plasma sources for etching", J. Appl. Phys. Lett. 63(5)
- 【8】 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)
- 【9】 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
- 【10】 C. Lee, M. A. Lieberman, "Global model of Ar, O₂, Cl₂ and Ar/O₂ high-density plasma discharges", J. Vac. Sci. Technol. A 13(2) 1995

- 【11】 Y. T. Lee, M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, F. Bose, H. Baltes and R. Patrick, “Global model for high pressure electronegative radio-frequency discharges”, J. Vac. Sci. Technol. A 15(1) 1997
- 【12】 P. L. G. Ventzek, N. Yamada, Y. Sakai, H. Tagashire, “Simulations of real-time control of two-dimensional features in inductively coupled plasma sources for etching applications”, J. Vac. Sci. Technol. A 13(5) 1995
- 【13】 Shahid Rauf, and Mark J. Kushner, “Virtual Plasma Equipment Model: A Tool for Investigating Feedback Control in Plasma Processing Equipment”, IEEE transactions on semiconductor manufacturing, vol.11, no 3, 1998
- 【14】 R. Patrick, S. Baldwin, N. Williams, “Application of direct bias control in high-density inductively coupled plasma etching equipment”, J. Vac. Sci. Technol. A 18(2) 2000
- 【15】 Cheg-Hung Chang, Keh-Chyang Leou, Chaung Lin, “Real-time feedback control of electron density in inductively coupled plasma”, J. Vac. Sci. Technol. A 19(3) 2001
- 【16】 Cheg-Hung Chang, Keh-Chyang Leou, Chaung Lin, “Real-time control of ion energy in chlorine inductively coupled plasma etch processing”, J. Vac. Sci. Technol. A 21(4) 2003
- 【17】 David Stokes, Gary S. May, “Indirect Adaptive Control of RIE Using Neural Networks”, IEEE transactions on robotics and automation, vol.17, no 5, 2001
- 【18】 Byungwhan Kim, Kwang-Ho Kwon, “Modeling etch rate and uniformity of oxide via etching in a CHF_4/CF_4 plasma using neutral networks”, Thin Solid Films 426, 2003
- 【19】 Brian Chapman , “Glow Discharge Processes: sputtering and plasma etching”, P1-P172, Wiley , New York , 1980
- 【20】 莊達人, ”VLSI 製造技術”, P146-P299, 高立圖書, 4th 2000
- 【21】 Oleg A. Popov. , “High density plasma sources: design, physics, and performance”, P76-P148, Noyes Publications, 1995
- 【22】 M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, “Principles of Plasma Discharges and Materials Processing”, Ch3, Ch4, Ch10, Ch12, Wiley, New York, 1994.

- 【23】 V. Vahedi, M. A. Lieberman, G. Dipeso, T. D. Rognlien, D. Hewett, “Analytic model of power deposition in inductively plasma sources”, J. Appl. Phys. 78(3), 1995
- 【24】 J. Hopwood, “Review of inductively coupled plasmas for plasma processing”, Plasma Source Sci. Technol. 1 1992
- 【25】 傅春霖, “電感式電漿源二維流體模式及區域平均模式電腦模擬之比較”, 國立清華大學工程與系統科學系碩士論文, 2000
- 【26】 M. V. Malyshev, V. M. Donnelly, “Diagnostics of chlorine inductively coupled plasma: Measurement of temperature and electron energy distribution functions”, J. Applied Physics V(87) 4
- 【27】 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
- 【28】 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
- 【29】 陳耀茂 譯, “田口實驗規劃法”, 滄海書局, 1997
- 【30】 羅錦興, “田口品質工程指引”, 中國生產力, 1999
- 【31】 葉怡成, “實驗計畫法-製程與產品最佳化”, 五南圖書出版社, 2001
- 【32】 W. Z. Collison, Tom Q. Ni, Michael S. Barnes, “Studies of the low-pressure inductively-coupled plasma etching for a larger area wafer using plasma modeling and Langmuir probe”, J. Vac. Sci. Technol. A16 (1)
- 【33】 陳永平,張浚林, “可變結構控制系統”, 2nd, 全華科技圖書, 2002
- 【34】 J. J. Slotine, W. P. Li “Applied Nonlinear Control”, P207-P310, Prentice Hall
- 【35】 H. K. Khalil, “Nonlinear systems”, P505-P579, 3rd 2002
- 【36】 黎正中、陳源樹 編譯, “實驗設計與分析”, 高立圖書, 5th, 2003
- 【37】 Shahid Rauf, and Mark J. Kushner, “Controller design issues in the feedback control of radio frequency plasma processing reactor”, J. Vac. Sci. Technol. A 17(3) 1999