

國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

變壓耦合式電漿二維流體模型
與批次電漿蝕刻設備控制



Two Dimensional Transformer-Coupled-Plasma
Fluid Model and
Run-to-Run Plasma Etching Equipment Control

研究生：李介民

指導教授：林家瑞 博士

中華民國 九十三年 六月

變壓耦合式電漿二維流體模型與批次電漿蝕刻設備控制

Two Dimensional Transformer-Coupled-Plasma Fluid Model and
Run-to-Run Plasma Etching Equipment Control

研究生：李介民
指導教授：林家瑞

Student: Chieh-Min Lee
Advisor: Chia-Shui Lin



A Thesis
Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of
Master of Science
In Mechanical Engineering
June 2004
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

變壓耦合式電漿二維流體模型與批次電漿蝕刻設備控制

學生：李介民

指導教授：林家瑞

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘要



變壓耦合式電漿為目前半導體廠中最常使用的蝕刻設備，在本研究中，利用電腦中 Microsoft Visual Basic 軟體，建構出一個人機界面的模擬平台，模擬架構出二維 TCP (Transformer-Coupled-Plasma) 電漿蝕刻設備之基礎模型，並在模型的支援之下，改變幾個主要的參數來觀察電漿內部的變化情形，再將所建立出的電漿設備理論模型中加入批次製程設備控制的概念，使電漿蝕刻設備能達到最好的電漿密度分佈，從而改善電漿蝕刻設備的蝕刻率 (etching rate)。在研究中，亦發展出改善均勻度 (uniformity) 的構想，藉以增進電漿蝕刻設備於前段製程上的應用與發展。

Two Dimensional Transformer-Coupled-Plasma Fluid Model and Run-to-Run Plasma Etching Equipment Control

Student: Chieh-Min Lee

Advisor: Dr. Chia-Shui Lin

Institute of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University



The Transformer-Coupled-Plasma is one of the most important and commonly used etching equipment in chip foundry today. In this research, we employ the software “Microsoft Visual Basic” in the computer to construct a basic two dimensional fluid model of TCP (Transformer-Coupled-Plasma) etching equipment, which is made in a User-Interface mode .By the support of this basic TCP model, we can change several major input parameters to observe the variation in the plasma chamber, and go on to add the concept of Run-to Run plasma etching equipment control using this model. After that, we can reduce the source power to get better plasma density distribution in the chamber, even more to improve the wafer etching rate .Form this research, we also recommend a new idea to improve the wafer etching uniformity, for the purpose of enhancing application and development of plasma etching equipment in the front end of wafer processing line.

誌 謝

感謝指導教授林家瑞博士兩年來的指導，讓我在研究所生涯中一步一步的學習，進而瞭解出如何做研究的方法與精神，使我能正確的瞭解研究的方向進而順利完成論文的研究。其次，感謝陳宗麟博士與莊琇惠博士在論文口試時惠予的建議與指導，感謝NDL的工程師許慶龍先生對實驗的幫忙，在此一併誌謝。

在研究所求學的過程中，感謝同師門和我一起打拼兩年的朝雲、永洲、建宇、木坤，在這兩年中與我一同研究討論、一起游泳打球與聊天，讓我的研究生生活增添許多樂趣，也更加充實與豐富。感謝大學同學碩毅、琪鈺在研究方面給我的幫助與指教，感謝我的摯友韋中、金輝、俊毅、皓然、凱智、柏任、合駿、朝琮、文嘉、仁傑、祥恩、耀賢、忠慶、鎮佑、于鈞…等等，讓我的學生生涯充滿歡笑與快樂，再次感謝大家對我的鼓勵與幫助。

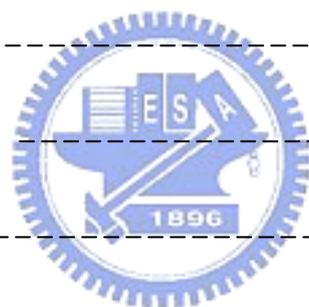
最後，感謝我的家人一直以來對我的支持與鼓勵，讓我可以無顧慮的、專心的在學業上認真學習，也感謝我的女友對我不能常相左右的包容與體諒，是你們給予我最大的力量。在此，僅將此論文獻給我含辛茹苦的父母和親愛的大姊、小妹以及照君。謝謝。



目錄

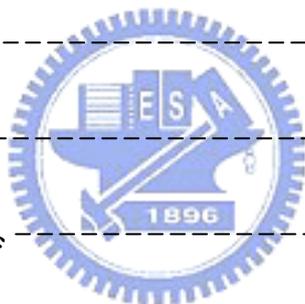
中文摘要	I
英文摘要	II
致謝	III
目錄	IV
圖表目錄	VIII
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	4
第二章 TCP 基本原理	6
2-1 TCP (Transformer-Coupled-Plasma) 簡介	6
2-2 TCP 原理與理論公式	8
第三章 電漿模型的設計與建立	13
3-1 架構模型的目的	13
3-2 模型架構的理論基礎	13
3-2.1 Ar 電漿源的重要參數	15
3-2.2 腔體的定義	17
3-2.3 差分法的概念	17
3-2.4 SOR(Successive Over-Relaxation)法	18

3-3 所求分佈之理論推導	20
3-3.1 感應電場分佈理論推導	21
3-3.2 電子溫度分佈理論推導	22
3-3.3 電子分佈理論推導	23
3-3.4 離子分佈理論推導	24
3-3.5 空間電位分佈理論推導	25
3-4 Use Visual Basic 架構電漿模型	27
第四章 電漿模型人機介面簡介	31
4-1 前言	31
4-2 人機介面簡介	33
4-2.1 設定	34
4-2.2 一般計算	36
4-2.3 複雜計算	36
4-2.4 控制部分	37
4-2.5 程式說明	38
4-2.6 檢視存檔功能	39
第五章 模擬結果與討論	40
5-1 模擬分佈圖與相關論文比較	40
5-1.1 平均單位吸收功率與感應電場之討論	41



5-1.2 電子密度與電位分佈之討論	-----	44
5-1.3 電子溫度分佈之比較與討論	-----	47
5-1.4 電漿電位分佈之比較與討論	-----	49
5-2 模擬與實驗結果比較	-----	51
5-2.1 實驗儀器介紹	-----	51
5-2.2 實驗數據與模型的比較與討論	-----	53
5-2.2(a) 定功率改變壓力之比較與討論	-----	53
5-2.2(b) 定壓力改變功率之比較與討論	-----	55
5-3 結果與討論	-----	56
第六章 批次電漿蝕刻設備控制	-----	59
6-1 前言	-----	59
6-2 EWMA 控制法則	-----	60
6-3 DEWMA 控制法則	-----	63
6-4 Adaptive EWMA 控制法則	-----	66
第七章 電漿蝕刻設備控制之模擬與討論	-----	69
7-1 前言	-----	69
7-2 EWMA 控制的結果與討論	-----	70
7-2.1 控制腔體壓力部分	-----	70
7-2.2 控制輸入功率部分	-----	73

7-3 DEWMA 控制的結果與討論	75
7-3.1 控制腔體壓力部分	75
7-3.2 控制輸入功率部分	77
7-4 Adaptive EWMA 控制的結果與討論	80
7-4.1 控制腔體壓力部分	80
7-4.2 控制輸入功率部分	85
7-5 結果與討論	88
第八章 均勻度	89
8-1 前言	89
8-2 bias 的原理	89
8-3 均勻度的構思	90
8-4 結果與討論	93
第九章 結論與未來工作	96
9-1 結論	96
9-2 未來工作	98
附錄	100
參考文獻	105



圖表目錄

表 3-1 Ar 電漿源中主要反應式	16
表 3-2 經驗公式與定義量列表	16
表 3-3 影響各參數的變數	20
表 4-1 計算名稱與相對存檔	31
表 5-1 Ar 電漿實驗數據 (電子密度 $10^9 / \text{cm}^3$)	52
表 7-1 δ 、 ε_{i-1} 對電漿電子密度步階響應的影響(改變腔體壓力)	81
表 7-2 δ 、 ε_{i-1} 對電漿電子密度步階響應的影響(改變輸入功率)	85
表 7-3 三種控制器的比較	88
圖 1-1 乾式蝕刻與濕式蝕刻蝕刻的差異	2
圖 2-1 TCP 電漿蝕刻機基本架構	7
圖 2-2 線圈與感應位置示意圖	8
圖 3-1 腔體概略結構圖	17
圖 3-2 電腦模擬流程圖	28
圖 3-3 格點取樣示意圖	29
圖 3-4 圓柱等面積格點取法示意圖	30
圖 4-1 程式撰寫畫面	32
圖 4-2 電漿模擬程式操作介面圖像	33

圖 4-3 程式初始時之提示圖	-----	34
圖 4-4 「設定」選項之展開表單	-----	34
圖 4-5 線圈電阻設定	-----	35
圖 4-6 一般計算的下拉選單圖式	-----	36
圖 4-7 複雜計算之下拉表單	-----	37
圖 4-8 控制部分的下拉選單	-----	38
圖 4-9 控制部分各選項的調適表單	-----	38
圖 4-10 本程式版權宣告顯示	-----	38
圖 4-11 檢視存檔示意圖	-----	39
圖 4-2 程式開發畫面	-----	32
圖 5-1 程式座標圖	-----	40
圖 5-2 Peter L. G. 所做之模型(Ar, 10mTorr) 【7】	-----	42
圖 5-3 感應電場分佈圖(輸入電流 50 安培, 10mTorr)	-----	42
圖 5-4 穩態電漿吸收功率(Ar, 400W, 10mTorr)	-----	43
圖 5-5 Ar 離子分佈與電子密度分佈(Ar/CF ₄ /O ₂ , 10mTorr) 【7】	-----	44
圖 5-6 R. A. Stewart 所模擬之電子密度分佈 【3】	-----	44
圖 5-7 程式計算之電子密度分佈 (Ar, 400W, 10mTorr)	-----	45
圖 5-8 程式計算之電子密度分佈 (Ar, 400W, 10mTorr)	-----	46
圖 5-9 R. A. Stewart 模擬之電子溫度分佈 【3】	-----	48

圖 5-10 程式計算之電子溫度分佈 (Ar, 400W, 10mTorr) -----	48
圖 5-11 Ar 氣電漿電位分佈 10mTorr 【7】 -----	49
圖 5-12 R. A. Stewart 模擬之電漿電位分佈 【3】 -----	49
圖 5-13 程式計算之電漿電位分佈 (Ar, 400W, 10mTorr) -----	50
圖 5-14 (a)NDL 之 Lam-TCP9400 機台 (b)ASI Hercules 裝置 -----	52
圖 5-15 SEERS 的工作原理概論 -----	52
圖 5-16 400W 功率下模型與實驗之電子密度比較圖 -----	54
圖 5-17 Peter 模擬之電子密度變化狀態 (1000W, Ar) -----	54
圖 5-18 12mTorr 不同輸入功率下實驗電子密度值 -----	55
圖 5-19 12mTorr 不同輸入功率下模擬電子密度值 -----	55
圖 5-19 SEERS 裝置在腔體側壁圖 -----	58
圖 5-20 IBM 公司所做相同製程 2 lots 的電子密度與碰撞頻率變化【20】 -----	58
圖 6-1 EWMA 運算式控制架構圖 -----	59
圖 6-2 EWMA 控制法流程圖 -----	62
圖 6-3 DEWMA 控制法流程圖 -----	65
圖 6-4 Adaptive EWMA 控制法流程圖 -----	68
圖 7-1 製程模型未受控制之電子密度分佈 -----	70
圖 7-2 改變預測模型斜率項之影響 -----	71

圖 7-3	權重值 0.2 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	72
圖 7-4	權重值 0.5 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	72
圖 7-5	權重值 0.7 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	72
圖 7-6	權重值 0.9 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	73
圖 7-7	權重值 0.5 之 EWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	74
圖 7-8	權重值 0.7 之 EWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	74
圖 7-9	權重值 0.9 之 EWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	74
圖 7-10	$\lambda_1:\lambda_2=0.2:0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	75
圖 7-11	$\lambda_1:\lambda_2=0.3:0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	76
圖 7-12	$\lambda_1:\lambda_2=0.4:0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	76
圖 7-13	$\lambda_1:\lambda_2=0.2:0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	77
圖 7-14	$\lambda_1:\lambda_2=0.2:0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	77
圖 7-15	$\lambda_1:\lambda_2=0.4:0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	79
圖 7-16	$\lambda_1:\lambda_2=0.6:0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	79
圖 7-17	$\lambda_1:\lambda_2=0.9:0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)	-----	79
圖 7-18	μ_0, ξ_0 初始值對 AEWMA 控制影響情形	-----	80
圖 7-19	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.1:0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	-----	82
圖 7-20	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.01:0.01$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----	82
圖 7-21	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.15:0.15$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----	82

圖 7-22	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.3:0.3$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----- 83
圖 7-23	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.5:0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----- 83
圖 7-24	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.9:0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----- 83
圖 7-25	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.01:0.05$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----- 84
圖 7-26	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.1:0.2$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----- 84
圖 7-27	$\delta:\varepsilon_{t-1}=0.15:0.01$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)	----- 84
圖 7-28	當 $\delta:\varepsilon_{t-1}=0.1:0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)	----- 86
圖 7-29	當 $\delta:\varepsilon_{t-1}=0.4:0.4$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)	----- 86
圖 7-30	當 $\delta:\varepsilon_{t-1}=0.5:0.5$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)	----- 86
圖 7-31	當 $\delta:\varepsilon_{t-1}=0.9:0.9$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)	----- 87
圖 7-32	當 $\delta:\varepsilon_{t-1}=0.5:0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)	----- 87
圖 7-33	當 $\delta:\varepsilon_{t-1}=0.1:0.5$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)	----- 87
圖 8-1	Bias 形成的過程圖	----- 90
圖 8-2	Ar, 12mTorr, 400W(Z=0.14m)	----- 91
圖 8-3	探針量測電位大小分佈 【16】	----- 91
圖 8-4	蝕刻與 bias 大小關係圖 【17】	----- 92
圖 8-5	創新 bias 的構造	----- 93
圖 8-6	RF 產生之偏壓分佈	----- 94
圖 8-7	補償後之電壓大小分佈	----- 94

圖 8-8 四層構造所產生的 bias 電位大小分佈----- 94

圖 8-9 四層構造之 bias 補償後之電漿電位分佈----- 95



第一章 緒論

1-1 前言

電漿是物質在固、液、氣三態之外，存在的第四種型態。電漿本體是由一群遊離化的帶電粒子所組成，其中任何一個帶電粒子與其最接近的粒子間的電位差遠小於本身具有的動能。製程用電漿為部分離子化的氣體，由帶電的電子與離子以及不帶電的中性氣體分子所組成，宏觀來說，電漿是以上三部分所構成的準中性氣體。

電漿在半導體領域的運用有電漿蝕刻 (plasma etching) 或是電漿增益化學氣相沈積 (PECVD) 等。隨著積體電路的尺寸越作越小的趨勢，在蝕刻 (etching) 時，能否精準的完成微影時所定義的圖像，便是在半導體製程中極為重要的一個環節。本研究主要便是著重在電漿蝕刻方面，目前工業上主要有兩種蝕刻方式移除 SiO₂，可以用液態化學品進行濕式蝕刻 (wet etching) 也可以用電漿進行乾式蝕刻 (dry etching)，當半導體進入到 ULSI (Ultra Large Scale Integrated Circuit)，元件不斷縮小其尺寸，已經進入了次微米 (submicron) 甚至是深次微米 (deep submicron) 的尺寸，所以深寬比的要求也越來越嚴苛，於是電漿乾式蝕刻便漸漸取代傳統的濕式蝕刻，使用電漿乾式蝕刻 (dry etching) 最重要的原因便是電漿蝕刻的非等向性 (anisotropic) 比較好，概念上如圖 1-1 所示，所以可以達到較佳的深寬比。

一般工業界漸漸使用電漿蝕刻的另一個原因，乃是液態化學品容易污染基材，且在製程的安全性以及廢棄物處理等有較大的問題。

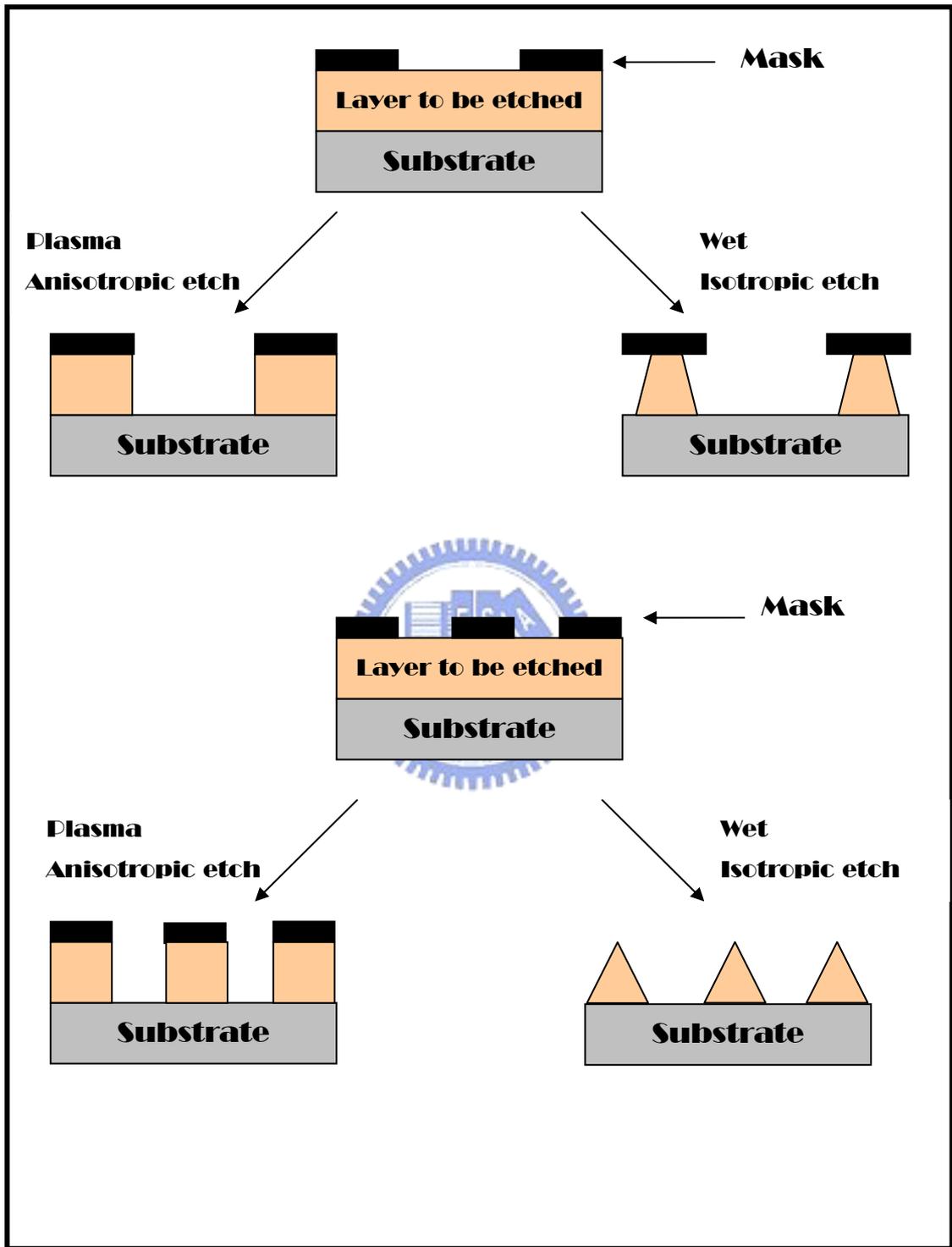
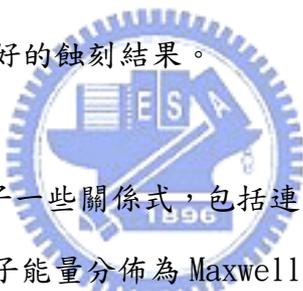


圖 1-1 乾式蝕刻與濕式蝕刻蝕刻的差異

因此如何讓電漿蝕刻設備產生最好的蝕刻率以及非等向性，並藉以降低成本、提高產品精密度便是當前重要的研究課題。

一般來說，TCP(Transformer-Coupled-Plasma)也可以視為 ICP(Inductively Coupled Plasma)，其本身都是利用線圈產生感應電場來產生電漿，因為線圈位置不同而有不同的名稱區別。本研究便是利用程式語言 Visual Basic 作為發展基礎平台，以 Fluid Model 理論架構模擬，建構出人機介面的 TCP 電漿模型，利用此模型，可以改變不同輸入參數，如輸入功率、腔體壓力等等，藉以得知不同輸入參數在電漿腔體中所產生的電場分佈、吸收功率分佈、電子密度及電子溫度分佈情形等等。在模型完成後，再以此模型所得之資料為基礎，導入批次控制(Run-to-Run control)的觀念，期許以最佳的電漿輸入(如輸入功率、氣體壓力等等)得到最好的目標電漿密度，再求出電漿密度與蝕刻率、非等向性蝕刻之間的關係，便可以推導出到最好的蝕刻結果。



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

在本論文中，基本結構的編排如下：第一章為序論、第二章為 TCP 的基本原理、第三章為模型之設計與建立、第四章為電漿模型人機介面簡介、第五章為模擬結果與討論、第六章為批次電漿蝕刻設備控制、第七章為電漿蝕刻設備控制之結果與討論、第八章為均勻度、第九章為結論與未來工作。

1-2 文獻回顧

1980 年代開始，由於積體電路 (integrated circuits) 的製造，帶動了電漿技術的興起。1980 年初期便開始有人發展一維的平行版及電感耦合式電漿源模擬。到了 1980 年晚期一直到 1990 年初期，主要是利用一維模式模擬複雜的物理機制跟化學反應。近年來，由於電腦的高速開發，電腦運算能力大大的增加，利用二維或三維模式進行模擬，不但可以輔助電漿源之設計與開發，也可更加精準的瞭解電漿腔體 (chamber) 內之電漿狀況與特性。

近代二維電漿模擬的發展方面，1994 年 R. A. Stewart, P. Vitello 與 D. B. Graves 發展了一個二維流體模式電感式電漿原模擬程式【3】。此模擬中使用簡化之流體模型，假設離子溫度不隨腔體位置的不同而改變，利用各粒子的連續方程式、動量守恆方程式以及電子能量守恆方程式，模擬出電漿腔體中電子密度、離子密度以及電子溫度的分佈。其公式條列如下：

(1) 連續方程式

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla \cdot (n_j \bar{u}_j) = R_{j,source} - R_{j,sink} \quad (1.1)$$

(2) 動量守恆程式

$$m_j n_j \left[\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + (\bar{u}_j \cdot \nabla) \bar{u}_j \right] = q_j n_j (\bar{E} + \bar{u}_j \times \bar{B}) - \nabla p_j + \sum_{j \neq k} P_{jk} \quad (1.2)$$

(3) 電子能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e K_B T_e \right) = -\nabla \cdot \bar{Q}_e - e \bar{E} \cdot \bar{\Gamma}_e + P_{abs} - P_{coll} \quad (1.3)$$

其中 n_j 為粒子 j 的密度、 \bar{u}_j 為粒子 j 的速度、 $R_{j,source}$ 為單位體積內產生出粒子 j 的速率、 $R_{j,sink}$ 為單位體積內消耗粒子的速率、 m_j 為粒子 j 的質量、 q_j 為粒子 j 所帶的電荷量、 \bar{E} 乃是空間電場、 \bar{B} 是外加的磁場、 P_j 為粒子 j 於空間

中所造成之壓力、 $\sum_{j \neq k} P_{jk}$ 為粒子 j 與其他粒子發生碰撞時所造成的動量轉移總

和、 K_B 為波茲曼常數、 \bar{Q}_e 為電子的熱通量、 $\bar{\Gamma}_e$ 為電子粒子通量、 P_{abs} 為外加的能量吸收量、 P_{coll} 是電子因為碰撞所損失的能量。

在此之後，不論是 1995 年 D. P. Lymberopoulos 與 D. J. Economou 模擬的電感式氬氣電漿源蝕刻多晶矽【4】、1996 年 J. D. Bukowski 與 D. B. Graves 利用二維流體模式分析氬氣與氫氣電漿源【5】，均是利用上述三個方程式來模擬電感式電漿源的腔體狀態。而 1996 年 J. D. Bukowski 與 D. B. Graves 更將模擬與實驗數據作比較，發現雖然模擬值跟實際實驗值有些微誤差存在，但在整體分佈趨勢上仍是符合。

當然，在二維電漿狀態模擬的領域上也有利用不同方式模擬的論文，例如 1994 年 Peter L. G. Ventzek、Robert J. Hoekstra 與 Mark J. Kushner【7】，便是利用蒙地卡羅法 (Monte Carlo simulation) 模擬粒子間的關係，藉以架構出整個電漿模型。另也有一種研究是 PIC-MCC 法，此法是結合 particle-in-cell 及 Monte Carlo collision 方法，利用 PIC 計算電磁場以及各粒子的運動，利用蒙地卡羅處理粒子間的碰撞，雖然具有相當高的準確性，但是一般來說，使用蒙地卡羅法運算時，在計算上極為耗時，需要大量的電腦運算資源。

第二章 TCP 的基本原理

2-1 TCP (Transformer-Coupled-Plasma)簡介

TCP 可視作是 ICP(Inductively Coupled Plasma)的一種，因為均是利用電感的原理來產生和維持腔體內的電漿。在 TCP 電漿蝕刻機中，是利用放置於電漿腔體 (chamber) 頂端之 Antennas，通以一時變 RF 電流 (頻率約在 13.56Mhz)，而這個時變電流便會在電漿腔體內感應出一時變磁場、電場及電流，在能量超過電漿產生的能階後，電漿便會生成，此時，時變電流在電漿腔體內所感應出的電場與電流便是維持電漿的主要能量來源。

如圖 2-1 所示，腔體上方有一個 RF(radio-frequency)電源輸入，其主要功能是供應線圈電流，進而對產生感應磁場，再而產生感應電場，相關的概念圖可由圖 2-1 中位於下方的圖看出。



而位於腔體下方之 RF 電源則主要是產生 Bias (偏壓)，用以產生自偏壓 (self-bias)，形成所謂的 RF BIAS SHEATH FIELD，此偏壓場會加速離子撞擊晶圓，並使離子有較佳的方向性，從而得到較佳的蝕刻輪廓。

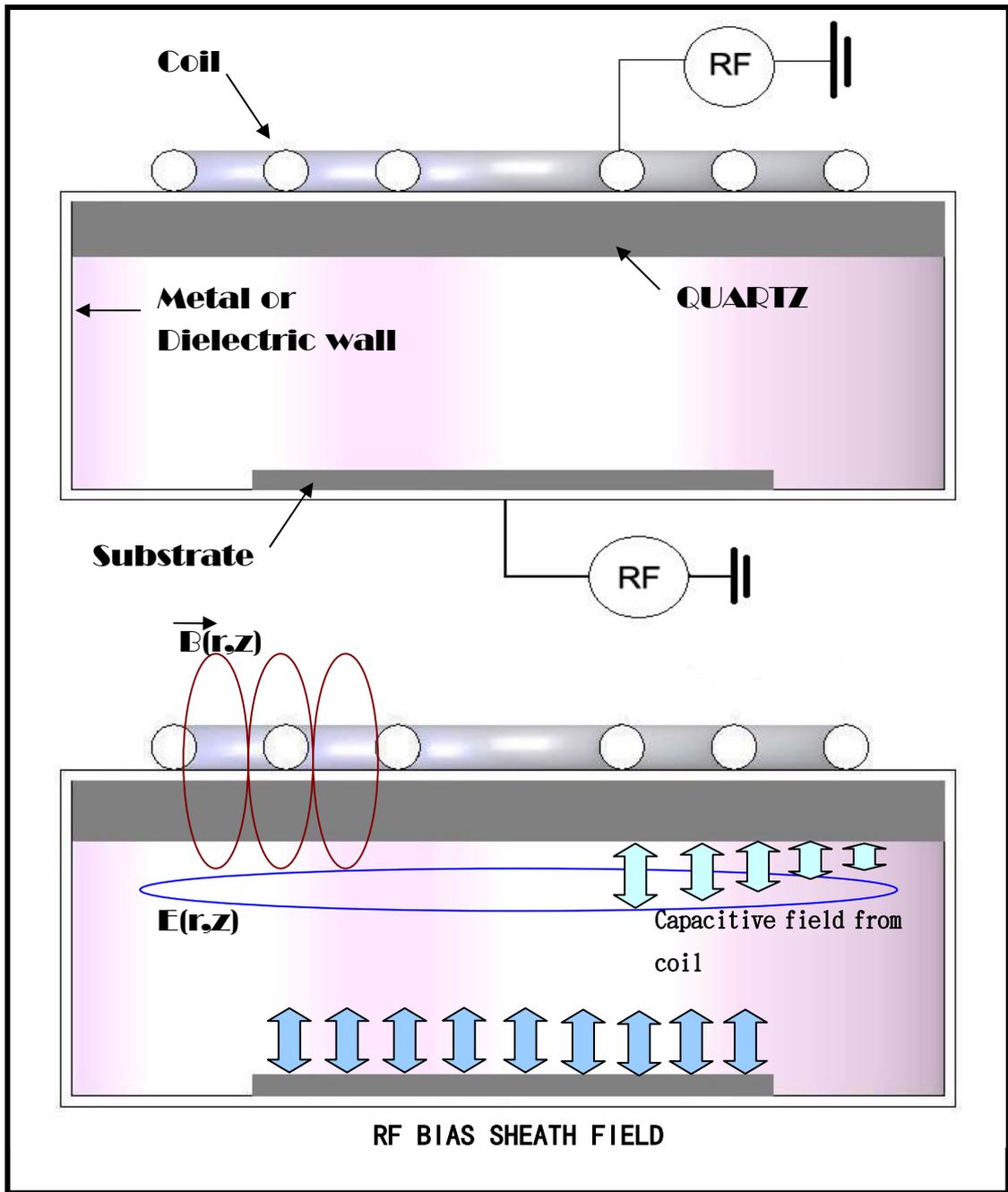


圖 2-1 TCP 電漿蝕刻機基本架構

2-2 TCP 原理與理論公式

如上一節所說，電漿腔體上方架設有一組 Antennas，並通入 RF 電源，一般來說 RF 的頻率約為 13.56MHz，腔體內的電漿就是利用此組 Antennas 所產生，其原理就是利用線圈在腔體內感應出一電場，當 chamber 內達到擊穿電壓時，便發生電子雪崩反應，氣體因而電離，伴隨等量的正離子發生，氣體絕緣性崩潰，電漿形成，最終形成一個平衡態，使整個放電過程平穩持續，這便是 TCP 電漿的基本原理。至於理論公式部分，因為感應電場的產生，可以由線圈所感應出的磁場來推導，由已知的輸入參數，如電流、介電常數等等，便可利用 Biot-Savart law 求出 antennas 在 chamber 中感應出的磁場向量位能強度。Biot-Savart law 的公式如下：

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{i \cdot d\vec{s} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \right) \quad (2.1)$$

μ_0 : permeability of the medium

i : coil current , $d\vec{s}$: coil 上一小段長度

當電流在線圈內流動時，對於空間中距離線圈任何一點所產生的 magnetic vector potential 可利用此基本公式求出[8]，相關參數表示如圖 2-2 所示，公式條列如下：

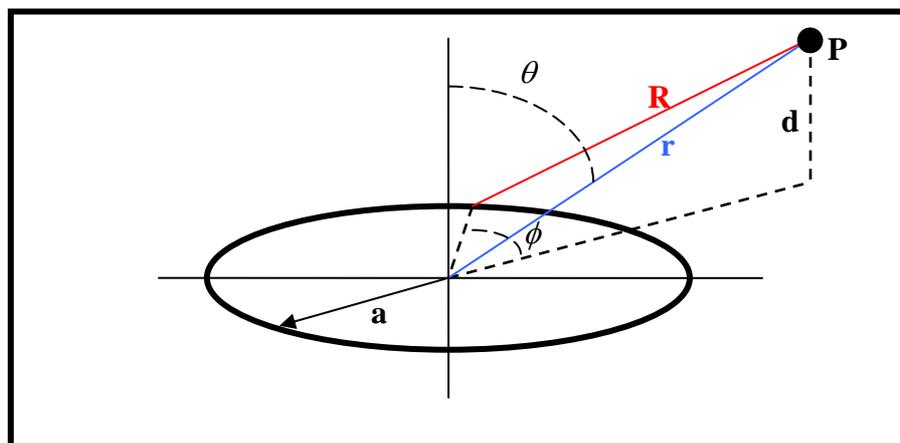


圖 2-2 線圈與感應位置示意圖

$$\tilde{A} = \frac{\mu I a}{4 \pi} \int_0^{2 \pi} \frac{\cos \phi \cdot d \phi}{R} \quad (2.2)$$

$$R^2 = r^2 + a^2 - 2 r a \sin \theta \cos \phi$$

$$\cos \theta = \frac{d}{r}$$

其中 \tilde{A} 是 magnetic vector potential、 I 是 amplitude of the R.F. current、 a 是線圈的半徑。當有 n 組線圈時，所求出的值必須互相累加後才是整個腔體中電磁向量位能的大小值。即：

$$\tilde{A} = \sum \tilde{A}_j \quad (2.3)$$

\tilde{A}_j 為限圈 j 所產生的電磁向量位能大小。

由上列公式，便可對腔體內任何一點得出感應的電磁向量位能大小，之後再將其帶入 Maxwell' s equation 中，藉以求出 chamber 中感應出的電流及電場。至於 Maxwell' s equation 之相關方程式，條列如下：

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad ; \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad ; \quad \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$$

\vec{J} : volume current densities

ρ : the volume charge

ε : permittivity of the dielectric medium

μ : permeability of the dielectric medium

再根據已知之公式：

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

並由向量運算之恆等式：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{F}) = 0 \quad (2.7)$$

當磁場 B 是一連續場(continuous field)，其可定義出一個與磁向量位能 A (magnetic vector potential)之間相關的公式，公式如下所示：

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.8)$$

再看電場與磁場的關係，由 Maxwell' s equation 可推導得：

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \Rightarrow \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial}{\partial t}[\nabla \times \vec{A}] = -\nabla \times \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right] \\ \Rightarrow \nabla \times \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right] &= 0 \\ \text{and} \\ \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} &= \nabla V \\ \Rightarrow \vec{E} &= -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.9)$$

感應磁場與感應電流間的關係則如下所示：

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \Rightarrow \nabla \times (\mu \cdot \vec{H}) &= \mu \cdot \vec{J} + \mu \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{當 } \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}; \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \text{ and } \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \\ \Rightarrow \nabla \times [\nabla \times \vec{A}] &= \mu \cdot \vec{J} + \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

從已知的向量運算式，可以推得：

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.11)$$

將上述(2.11)式帶入(2.10)式，算得下列式子：

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \cdot \vec{J} + \nabla (\nabla \cdot \vec{A} + \mu \epsilon \frac{\partial V}{\partial t}) \quad (2.12)$$

而在此公式中，從電磁學理論中得知：

$$\nabla \cdot \vec{A} + \mu \epsilon \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \text{ 此項為 Lozentsz condition and it yields}$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \text{ for static fields}$$

最後整理得出最終關係式如下所示：

$$\nabla^2 \bar{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} = -\mu \cdot \bar{J} \quad (2.13)$$

由於輸入源是 RF 電源為時變函數，所以可以將參數表示成如下所示：

$$\bar{A} = \tilde{A} \cdot e^{i\omega t}; \bar{J} = \tilde{J} \cdot e^{i\omega t}; \bar{E} = \tilde{E} \cdot e^{i\omega t}$$

將(2.13)式以圓柱座標展開可得：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(r \frac{\partial \tilde{A}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial t^2} + \left[(\mu\epsilon\omega^2 - \frac{1}{r}) \right] \tilde{A} = -\mu \cdot \tilde{J} \quad (2.14)$$

感應電場、感應電流與磁向量位能關係如下：

$$\tilde{E} = -i\omega \tilde{A} \quad (2.15)$$

$$\bar{J} = \bar{J}_{free} + \bar{J}_{meg} + \bar{J}_{pol} = \bar{J}_{plasma} = \sigma_p \cdot \bar{E}$$

其中， \bar{J}_{free} 是自由電流密度、 \bar{J}_{meg} 是磁化電流密度、 \bar{J}_{pol} 是極化電流密度，而 \bar{J}_{plasma}

是電漿區的總電流密度，至於 σ_p 是電漿的電導率。

關於電漿的電導率，其公式如下：

$$\sigma_p = \frac{n_e e^2}{m_e (\nu_e + i\omega)} \quad (2.16)$$

σ_p : conductivity ; ν_e : electron collision frequency

n_e : electron number density ; m_e : electron mass

利用這些公式為基礎，便可以架構出整個 TCP 電漿腔體中電磁場分佈、電場分佈的模型。因為 TCP 中產生電漿的最主要能量來源便是利用線圈在電漿腔體內感應出電場，而上述公式便可視為整個 TCP 電漿產生的基本原理。電子由感應電場獲得能量後與中性氣體分子產生碰撞，使氣體分子發生游離、激發與彈性碰撞等反應，其間會產生許多離子、電子、負離子等，而一部份電子也會經由腔體四周之腔壁損失掉，經由如此不斷的反應後，電漿中電子的產生與損耗達成一個巨觀的平衡狀態時，便是我們所稱的電漿狀態。

當然，整個電漿狀態並不只考慮感應電場即可，感應電場大小主要是影響電漿吸收功率的大小，也就是電子所吸收的能量大小，如果電子在與中性氣體碰撞前

便攜帶大於讓中性氣體產生反應的能量，則中性氣體才有機會產生對應之反應機制。例如：要使 Ar 氣體發生游離，則必須讓 Ar 的能量達到游離的能階之上，基本上若電子能量大於 15.75eV，便可使 Ar 發生游離反應。因此，在模擬電漿狀態時，必須以此為基礎繼續向下推導，進而將整個模型架構出來，至於模型的架構，並不在此贅述，將在下一章節詳細介紹。



第三章 電漿模型的設計與建立

3-1 架構模型的目的

在研究電漿狀態時，單純的實驗數據收集，雖可約略看出電漿狀態的改變，但所需收集的 data 必須非常龐大才能有一定的趨勢可以觀察出來，而這其間所花費的時間、資源與財力都甚鉅。故根據一般研究的準則，在節省資源的浪費與加強狀態的準確性分析上，以已知理論架構出一可信任之模型便極為重要。

有好的模型，吾人便可在模型上作最佳控制的發展，並可依照不同的目標來作控制，再將經過控制之後所得之模擬數據與實驗數據來相互驗證，故在模型的支援之下，並不需要大量的實驗，僅需少數實驗來驗證模型的結果即可。如此，便可以在有限資源與時間的前提下，達到最好的研究效果與效率，至於模型的建立，則仰賴電腦計算的能力。

近代由於電腦科技的蓬勃發展，利用電腦計算模擬的方式，可以取代許多昂貴的原型試驗，因而可以節省相當可觀的研發經費。而電腦所分析出的結果，能指出許多傳統試誤的方法或實驗很難或甚至於無法解釋及預測的原因和情況。故利用電腦來模擬電漿狀態、進而發展最佳控制理論，便是本研究的主要方向。

3-2 模型架構的理論基礎

本研究主要是以 Ar 電漿為主要研究方向，因為 Ar 電漿源反應較為簡單，可視為研究電漿的基本入門，遠程目標是往業界使用最多之氬氣電漿源分析為目的，若 Ar 電漿模型與控制成功，便可繼續往氬氣電漿源發展。但在一切研究之初，

為避免好高騖遠，故由基礎 Ar 電漿源作研究的方向。

至於模型架構方面，正如先前所言，流體模式(Fluid Model)所需的運算資源最少，又可獲得相當多的電漿參數變化，所以本研究選擇利用流體模式來分析電漿源，主要的三大方程式，其數學式條列如下：

(1) 連續方程式

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla \cdot (n_j \bar{u}_j) = R_{j,source} - R_{j,sink} \quad (3.1)$$

(2) 動量守恆程式

$$m_j n_j \left[\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + (\bar{u}_j \cdot \nabla) \bar{u}_j \right] = q_j n_j (\bar{E} + \bar{u}_j \times \bar{B}) - \nabla p_j + \sum_{j \neq k} P_{jk} \quad (3.2)$$

(3) 電子能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e K_B T_e \right) = -\nabla \cdot \bar{Q}_e - e \bar{E} \cdot \bar{\Gamma}_e + P_{abs} - P_{coll} \quad (3.3)$$

相關參數的設定在第一章已經介紹過，所以在此不再贅述。一般的 TCP 電漿源系統中，並不在腔體外壁多加磁鐵，所以不需考慮(3.2)式中的磁場數值。另在(3.2)式中，等號左方的兩項在與等號右邊各項比較時是可以忽略的，且右方 $\sum_{j \neq k} P_{jk}$ 可以改寫成 $-m_j n_j \nu_j \bar{u}_j$ ，其中 ν_j 為粒子 j 與其他粒子發生碰撞的動量轉移頻率，因此可將(3.2)式改寫成如下所示：

$$q_j n_j \bar{E} - \nabla p_j - m_j n_j \nu_j \bar{u}_j = 0 \quad (3.4)$$

再將 $p_j = n_j K_B T_j$ 帶入上式中 (T_j 為粒子 j 的溫度)，整理後可以得到一式：

$$\bar{u}_j = \frac{-1}{m_j n_j \nu_j} \nabla (n_j K_B T_j) + \frac{q_j}{m_j \nu_j} \bar{E} \quad (3.5)$$

利用(3.5)式，可以求出粒子 j 通量($\bar{\Gamma}_j$)相關式如下所示：

$$\bar{\Gamma}_j = n_j \bar{u}_j = \frac{-1}{m_j \nu_j} \nabla (n_j K_B T_j) + \frac{q_j n_j}{m_j \nu_j} \bar{E} \quad (3.6)$$

由推導出的(3.6)式帶入連續方程式中，可以整合出一數學式：

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\Gamma}_j = R_{j,source} - R_{j,sink} \quad (3.7)$$

而在(3.3)式中，可將 \bar{Q}_e 電子熱通量以下列式子帶入運算【17】：

$$\bar{Q}_e = \frac{5}{2} K_B T_e \bar{\Gamma}_e - \frac{5}{2} \frac{n_e K_B T_e}{m_e \nu_e} \nabla (K_B T_e) \quad (3.8)$$

上面所列之式子便是主要電漿參數間相關的聯立式，利用這些式子為基礎，在依照不同所求作不同的分析，而在氬氣 (Ar) 電漿源中，由於中性氣體粒子僅有 Ar，不像氯氣系統中同時存在氯原子 (Cl) 跟氯分子 (Cl₂)，故可以假設氬氣是均勻分佈在電漿腔體中，本研究主要的分析重點條列如下，將在之後的小節中詳盡解說：

1. 離子密度分佈
2. 電子密度分佈
3. 電子溫度分佈
4. 感應電場分佈
5. 空間電位分佈



在開始詳細介紹與推導各個密度分佈理論之前，讓我們先將一些與氬氣電漿相關的重要資料條列如出來，除了可以加強對模型基礎的瞭解之外，在往後推導理論方面，將會更快瞭解一些參數所代表的意義。

3-2.1 Ar 電漿源的重要參數

由於本模擬著重在氬氣電漿源的模擬，所以瞭解在 Ar 電漿中所會發生的主要反應便極為重要，從相關的研究中，我們可以整理出氬氣電漿源主要的反應式及其相關的參數設定，這些資料將在往後分析電漿中各種分佈時，佔有極為重要的地位，相關資料條列如表 3-1 所示。

表 3-1 Ar 電漿源中主要反應式

化學反應	反應速率 (m^3/s)	Energy shield(eV)
解離反應 $Ar + e^- \rightarrow Ar^+ + 2e^-$	$K_{iz} = 1.23 \times 10^{-13} \cdot e^{-\frac{18.68}{T_e}}$	$\varepsilon_{iz} = 15.76$
激發反應 $Ar + e^- \rightarrow Ar^* + e^-$	$K_{ex} = 2.2 \times 10^{-14} \cdot e^{-\frac{12.4}{T_e}}$	$\varepsilon_{ex} = 11.55$
彈性碰撞 $Ar + e^- \rightarrow Ar + e^-$	$K_{el} = 10^{-15} \cdot (0.514 + 5.51 \cdot T_e + 22.9 \cdot T_e^2 - 6.42 \cdot T_e^3 + 6 \cdot T_e^4)$	$\varepsilon_{el} = \frac{3m_e}{m_i} \times T_e$

除反應式之外，在模擬氬氣電漿源時尚有既有的經驗公式與定義可以利用，將其一併整理放置如表 3-2 所示，以便利往後理論推導。

表 3-2 經驗公式與定義量列表

名稱	物理量或公式
波茲曼常數(K_B)	1.38×10^{-23} (焦耳/K)
磁導率(μ_0)	$4 \times \pi \times 10^{-7}$ (H/m)
真空介電常數(ε_0)	8.8542×10^{-12}
電子重量(m_e)	9.1×10^{-31} (Kg)
Ar 離子重量 (m_i)	6.64451×10^{-26} (Kg)
電子伏特(e)	1.602×10^{-19} (焦耳)
RF 頻率(f)	13.56MHz
中性氣體密度(n_g)	$P \times 3.536 \times 10^{22} (\frac{1}{m^3})$ [P 是腔體壓力]
電子平均自由徑 (λ_e)	$\frac{0.01}{330 \times P}$ (m)

3-2.2 腔體的定義

由於腔體是一個圓柱型的結構，如圖 3-1 所示，所以在圓柱座標上作分析時，由於對稱，可視為線圈在每一個切面上所感應出的電場大小均為相同的，在作分析時可將 ϕ 方向的變化視為零，僅需考慮半徑跟高度的大小值即可，也因此程式僅需發展二維平面的分析，就可推出整個腔體的電漿分佈狀況。

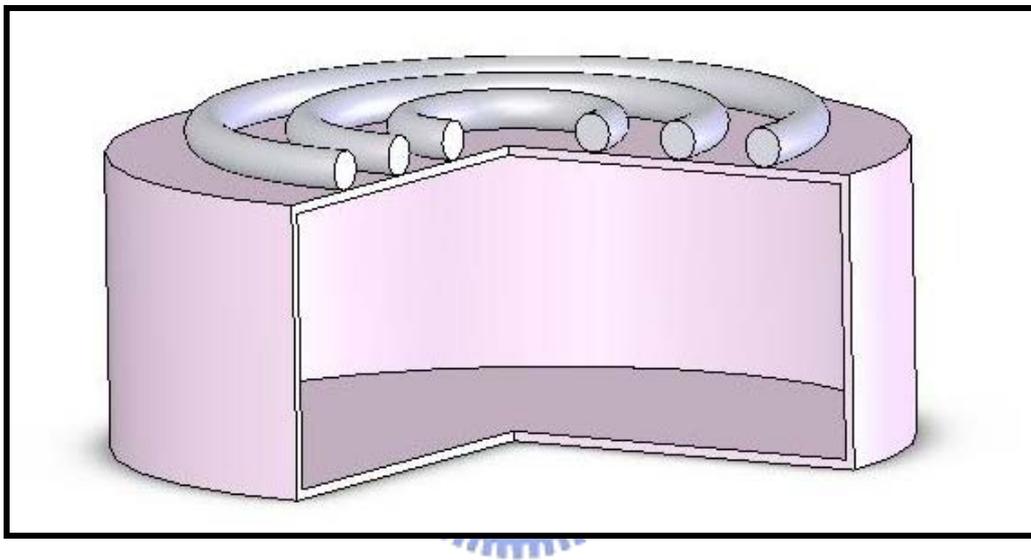


圖 3-1 腔體概略結構圖

3-2.3 差分法的概念

由於解二維流體模式模型時會大量遭遇到二次偏微的問題，故無論在解空間中各點的電子分佈、電子溫度分佈亦或是離子分佈時，均需對公式作差分，以便在程式上運行及計算，故在此便先行介紹本研究中所使用的差分法的基本原理。

差分法乃是利用泰勒展開式之基本觀念，可以將一 x 函數式展開如下所示：

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{f'''(a)}{3!}(x-a)^3 + \dots \quad (3.9)$$

設 $a = x_i$

$$f(x) = f(x_i) + \frac{f'(x_i)}{1!}(x-x_i) + \frac{f''(x_i)}{2!}(x-x_i)^2 + \frac{f'''(x_i)}{3!}(x-x_i)^3 + \dots \quad (3.10)$$

此時若設 $x = x_{i+1}$ 且 $x_{i+1} - x_i = h$ ，叫做向前差分法，其中 h 稱為 mesh size。

若設 $x = x_{i-1}$ 且 $x_i - x_{i-1} = h$ ，叫做向後差分法。

$$\text{向前差分： } f(x_{i+1}) = f(x_i) + hf'(x_i) + \frac{h^2}{2} f''(x_i) + \frac{h^3}{6} f'''(x_i) + \dots \quad (3.11)$$

$$\text{向後差分： } f(x_{i-1}) = f(x_i) - hf'(x_i) + \frac{h^2}{2} f''(x_i) - \frac{h^3}{6} f'''(x_i) + \dots \quad (3.12)$$

利用(3.11)式減(3.12)式，可以得到：

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h} - \frac{1}{6} h^2 f'''(x_i) + \dots \Rightarrow f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h} + O(h^2)$$

$$O(h^2) = -\frac{1}{6} h^2 f'''(x_i) + \dots \Rightarrow \text{High-order-term}$$

(3.13)

此式稱為中央差分法。

由比較後得知，中央差分法較前兩種方法都為準確，故本研究決定使用中央差分法作為分解偏微方程式的方法。



3-2.4 SOR(Successive Over-Relaxation)法

由於在推導二維位置的數值分佈時，一開始僅有腔體周圍的值是已知的 (Boundary condition)，必須由不斷的疊代收斂才能取得真正該位置所欲求出的數值，此時利用 SOR 法可以較快速的求出所欲求出的值，此法也將大量運用在往後的推導上，故在此先行解說。

假設有一系統 $\Phi(x_i, y_j)$ ， $i = 1, 2, 3, \dots, M$ and $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ，系統方程式表示如下：

$$(a_W)_{i,j} \cdot \Phi_{(i-1,j)} + (a_S)_{i,j} \cdot \Phi_{(i,j-1)} + (a_E)_{i,j} \cdot \Phi_{(i+1,j)} + (a_P)_{i,j} \cdot \Phi_{(i,j)} + (a_N)_{i,j} \cdot \Phi_{(i,j+1)} = (a_R)_{i,j} \quad (3.14)$$

為了使計算更為方便，令 $K = (i-1)N + j$ ，則 $K = 1, 2, 3, \dots, MN$ ，亦即將原本二維系統(3.14)轉換成一個一維的陣列，轉換後可將原式表示成：

$$(a_W)_K \cdot \Phi_{K-N} + (a_S)_K \cdot \Phi_{K-1} + (a_E)_K \cdot \Phi_{K+N} + (a_P)_K \cdot \Phi_K + (a_N)_K \cdot \Phi_{K+1} = (a_R)_K \quad (3.15)$$

利用 point-by-point iteration，最常見的方法是 Jacobi iteration，其原理如下，先設定 \sum 的意義（其中 (r-1) 表示舊的已知值，故必須先給一個猜測值當作起始值）：

$$\sum = (a_W)_K \Phi_{K-N}^{(r-1)} + (a_S)_K \Phi_{K-1}^{(r-1)} + (a_N)_K \Phi_{K+1}^{(r-1)} + (a_E)_K \Phi_{K+N}^{(r-1)} - (a_R)_K \quad (3.16)$$

則可將所欲求之點的新值表示成：

$$\Phi_K^r = \frac{-\sum}{(a_P)_K} \quad (3.17)$$

設定一個可接受的誤差值後，讓其不斷的運算，當前後次相差值小於誤差時，便可視為所求的解。Jacobi iteration 乃是一直利用舊的值運算，等新值求出後再用新值從頭算起，故運算上數度較慢。

另一常用的方法是 Gauss-Seidel iteration，與 Jacobi iteration 之差別在他往下運算時，會同時利用到新值與舊值，不同處如下式所示：

$$\sum = (a_W)_K \Phi_{K-N}^r + (a_S)_K \Phi_{K-1}^r + (a_N)_K \Phi_{K+1}^{(r-1)} + (a_E)_K \Phi_{K+N}^{(r-1)} - (a_R)_K \quad (3.18)$$

至於本研究所用的 SOR 法 (Successive Over-Relaxation)，則是利用一個比率因子 (ω)，將舊值乘上一比率後再帶入運算出新值，此方法比前兩者運算上速度會快的多，其關係式如下所示：

$$\Phi_K^r = (1 - \omega)\Phi_K^{(r-1)} + \omega \frac{-\sum}{(a_p)_K} \quad (3.19)$$

可以觀察發現，當 $\omega=1$ 時，(3.19)式將會與(3.17)式相同，一般來說若取 $\omega>1$ ，則稱為 over-relaxation， $\omega<1$ 為 under-relaxation，通常是用來解 nonlinear problems，一般的設定來說，我們會將 ω 限制在 $1<\omega<2$ 中。

3-3 所求分佈之理論推導

由於電漿中各參數間都有相互耦合的關係存在，正所謂牽一髮而動全身，因此在解方程式時必須先將某些參數假設出一固定值，待所求解求出後再帶回去運算，如此不斷循環後，最終得到的穩定值才是趨於正確的值，其間的關係如表 3-3 所示。

表 3-3 影響各參數的變數

名稱	變數名稱
電子密度(n_e)	T_e
電子溫度(T_e)	n_e
離子密度(n_i)	n_e 、 T_e 、 T_i
空間電位分佈(V)	n_i 、 n_e
感應電場分佈(E)	i (輸入電流)

3-3.1 感應電場分佈理論推導

由第二章中對 TCP 產生電漿的理論推導中，可知腔體中任何位置的感應電場大小值，經由電磁向量位能與電場的關係：

$$\vec{E} = -i\omega\vec{A} \quad (3.20)$$

已知由 Biot-Savart law，可將腔體中任何一點的電磁向量位能求出，因此亦可以求出電場的分佈，不過由於輸入的電源是 RF 電源，所以電場與電磁向量位能均可表示成 $\vec{E} = \tilde{E} \cdot e^{i\omega t}$; $\vec{A} = \tilde{A} \cdot e^{i\omega t}$ ，將所知帶入(3.20)中，可以重新將式子表示成：

$$\tilde{E} = -i\omega\tilde{A} \quad (3.21)$$

將(3.21)利用三角形疊合原理，可以將實部跟虛部分別獨立而出：

$$\tilde{E} = \omega\tilde{A}\left(\cos\frac{-\pi}{2} + i\sin\frac{-\pi}{2}\right) = \omega\tilde{A} \cdot e^{-\frac{\pi}{2}i} \quad (3.22)$$

又已知 $\vec{J} = \sigma_p\vec{E}$ ，其中電漿電導率關係式條列如下：

$$\sigma_p = \frac{n_e e^2}{m_e(\nu_e + i\omega)} = \frac{n_e e^2}{m_e(\nu_e^2 + \omega^2)}(\nu_e - i\omega) \quad (3.23)$$

因為得知腔體間電場分佈後，可以得知電漿的吸收功率 P_{abs} 的大小，這個參數在往後的推導中乃是一個重要的起使參數。已知吸收功率的公式：

$$P_{abs}(t) = \vec{J}(t) \cdot \vec{E}(t) \quad (3.24)$$

此時可將 $\vec{J} = \sigma_p\vec{E}$ 帶入(3.24)中，並將(3.23)一併帶入，可以得到電漿吸收功率的關係（單看實部時）：

$$P_{abs}(t) = \text{Re}[\tilde{J}(t)e^{i\omega t}] \cdot \text{Re}[\tilde{E}(t)e^{i\omega t}] = (\omega\tilde{A})^2 \cdot \text{Re}[\sigma_p \cdot e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})}] \cdot \text{Re}[e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})}] \quad (3.25)$$

將複數的指數形式轉換成三角函數形式，當中可以利用由已知的三角函數公式 $\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$ 以及 $2\cos^2\theta = 1 + \cos 2\theta$ 加以整理，將(3.25)展開整理後可得：

$$P_{abs}(t) = \frac{1}{2} (w\tilde{A})^2 [\sigma_{p,R} + \sigma_{p,R} \cdot \cos 2(wt - \frac{\pi}{2}) - \sigma_{p,I} \cdot \sin 2(wt - \frac{\pi}{2})] \quad (3.26)$$

從(3.26)式中，可以看出電漿吸收頻率的變化週期為射頻頻率的兩倍，所以電漿平均一個 RF 週期中所吸收的能量可以表示成：

$$\bar{P}_{abs} = \int_0^T P_{abs}(t) dt \quad (3.27)$$

若將(3.26)帶入(3.27)式中，經過積分運算後，可以求出一平均電漿吸收功率密度為：

$$\bar{P}_{abs} = \frac{1}{2} \sigma_{p,R} (w\tilde{A})^2 \quad (3.28)$$

在動態的電漿系統模擬上，採用的是(3.26)式，而若是要計算穩態的流體分析模式，所採用的便是(3.28)式。

3-3.2 電子溫度分佈理論推導



電子受到感應電場加速後獲得能量，而感應電場隨著距離遠離感應線圈而減小，所以電子溫度在空間中會是一個梯度的分佈狀態。除了感應電場，空間靜電場也會影響電子之速度，但是由於靜電場對電子的影響非常小，所以在此不加以考慮。電子溫度分佈主要由電子能量守恆式(3.3)式與電子熱通量(3.8)式推導之，將此二式條列如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\frac{3}{2} n_e K_B T_e) = -\nabla \cdot \bar{Q}_e - e\bar{E} \cdot \bar{\Gamma}_e + P_{abs} - P_{coll} \quad (3.29. a)$$

$$\bar{Q}_e = \frac{5}{2} K_B T_e \bar{\Gamma}_e - \frac{5}{2} \frac{n_e K_B T_e}{m_e \nu_e} \nabla (K_B T_e) \quad (3.29. b)$$

由 3-3.1 節中可以得知 P_{abs} 的大小值，而 P_{coll} 是指電子經過碰撞所損失的能量，可以表示成：

$$P_{coll} = \sum_j K_j n_e n_j \varepsilon_j \quad (3.30)$$

因為電子受到感應電場加速而獲得能量，所以對於電子溫度的分佈不能如離子假設為空間均勻分佈，故計算電子通量時必須考慮溫度梯度、密度梯度以及靜電場所造成之效應，如下所示：

$$\bar{\Gamma}_e = \frac{-K_B T_e}{m_e \nu_e} \nabla n_e - \frac{K_B n_e}{m_e \nu_e} \nabla T_e - \frac{e n_e}{m_e \nu_e} \bar{E} \quad (3.31)$$

其中因為電子受靜電場影響極小，所以可以忽略，(3.31)式帶入(3.8)式中，忽略電子受靜電場影響的部分，可推出：

$$\bar{Q}_e = -\frac{5 K_B^2 T_e^2}{2 m_e \nu_e} \nabla n_e - 5 \frac{n_e K_B^2 T_e}{m_e \nu_e} \nabla T_e \quad (3.32)$$

將(3.32)式帶入(3.3)式中，並以圓柱座標展開可以得到：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e K_B T_e \right) = \frac{5 K_B^2 T_e^2}{2 m_e \nu_e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial n_e}{\partial r} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial z^2} \right) + 5 \frac{K_B^2 T_e n_e}{m_e \nu_e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) + P_{abs} - P_{coll} \quad (3.33. a)$$

利用中央差分法將其解開，差分的形式如下所示：

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e(i, j)}{\partial r} &= \frac{n_e(i+1, j) - n_e(i-1, j)}{2\Delta r}, \quad \frac{\partial^2 n_e(i, j)}{\partial r^2} = \frac{n_e(i+1, j) - 2n_e(i, j) + n_e(i-1, j)}{(\Delta r)^2} \\ \frac{\partial n_e(i, j)}{\partial z} &= \frac{n_e(i, j+1) - n_e(i, j-1)}{2\Delta z}, \quad \frac{\partial^2 n_e(i, j)}{\partial z^2} = \frac{n_e(i, j+1) - 2n_e(i, j) + n_e(i, j-1)}{(\Delta z)^2} \end{aligned} \quad (3.34)$$

程式中給定起使參數與邊界條件後，使用SOR法反覆運算，便可求出電子溫度的分佈，但是需要注意的事在運算電子溫度時必須先假設知道電子密度的分佈，通常先給定一個定值，在往後算出電子密度時再帶回來運算求解。另外在計算腔體中心線的值時，由於是奇異點(Singular point)，所以必須用羅必達法則(Lo-hospital Rule)將(3.33. a)簡化成(3.33. b)，先算出中心點的電子溫度分佈，所運算出的值變成腔體的一個邊界條件，再加上另外邊界條件(腔壁上的溫度)，便可求出所有位置的電子溫度分佈。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e K_B T_e \right) = \frac{5 K_B^2 T_e^2}{2 m_e \nu_e} \left(2 \frac{\partial^2 n_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial z^2} \right) + 5 \frac{K_B^2 T_e n_e}{m_e \nu_e} \left(2 \frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) + P_{abs} - P_{coll} \quad (3.33. b)$$

3-3.3 電子分佈理論推導

電子受到感應電場的加速而得到能量，所以距離射頻線圈越遠，電子接受到的能量越少。在分析電子密度時，先由電子之連續方程式推導之：

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\Gamma}_e = R_{e,source} - R_{e,sink} \quad (3.35)$$

其中電子通量由上一節(3.31)中可知，帶入(3.35)式中後，將其以圓柱座標展開，可得到方程式：

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \frac{K_B T_e}{m_e v_e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial n_e}{\partial r} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial z^2} \right) + \frac{K_B n_e}{m_e v_e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) + R_{e,source} - R_{e,sink} \quad (3.36)$$

差分展開後利用 SOR 法運算求出解達，必須注意的是中心為奇異點(Singular point)，所以必須利用羅必達法(L'Hospital Rule)將(3.36)式簡化，可得：

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \frac{K_B T_e}{m_e v_e} \left(2 \frac{\partial^2 n_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial z^2} \right) + \frac{K_B n_e}{m_e v_e} \left(2 \frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) + R_{e,source} - R_{e,sink} \quad (3.37)$$

先算出中心點的電子密度分佈後，加上邊界條件（在腔壁上電子密度為零），便可進而推導出所有位置的密度分佈。

3-3.4 離子分佈理論推導

在氬氣電漿源中只有 Ar^+ 離子，故只考慮游離效應所產生的離子。假設離子溫度在 0.04eV，將離子連續方程式表示成：

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\Gamma}_i = R_{i,source} - R_{i,sink} \quad (3.38)$$

而其中 $\bar{\Gamma}_i$ 為離子通量，可以表示成：

$$\bar{\Gamma}_i = \frac{-1}{m_i v_i} \nabla (n_i K_B T_i) + \frac{q_i n_i}{m_i v_i} \bar{E} \quad (3.39)$$

對氫離子而言， $q_i = e$ 為離子所帶正電荷，將上式導入離子遷離率 $\mu_i = \frac{|q_i|}{m_i \nu_i}$ 以及

擴散係數 $D_i = \frac{\mu_i K_B T}{q_i}$ 【2】，整理後可以得到：

$$\bar{\Gamma}_i = -D_i \nabla n_i + \mu_i n_i \bar{E} \quad (3.40)$$

而粒子之生成速率 $R_{i,source}$ 可表示成：

$$R_{i,source} = K_{iz} n_e n_g \quad (3.41)$$

至於消耗速率只有在腔體邊緣會產生，約略會以 Bohm velocity [1949, by Bohm] 流失，至於 Bohm velocity (m/s) 公式表示如下：

$$u_B = \sqrt{\frac{K_B T_e}{m_i}} \quad (3.42)$$

知道這些細部的公式後，便可以開始將(3.38)式對圓柱座標展開，由之前的設定可知不需考慮 θ 方向的變化，故展開後如下：

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = D_i \left(\frac{1}{r} \frac{\partial n_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} \right) - \mu_i n_i \left(\frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) + R_{i,source} - R_{i,sink} \quad (3.43)$$

腔體中間部分依舊是奇異點(Singular point)，必須用羅必達法則(L'Hospital Rule)將其先行簡化算出後，以邊界條件的方式帶入(3.43)式中，利用 SOR 法求出離子密度分佈圖，腔體中間部分的數學式如下所示：

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = D_i \left(2 \frac{\partial^2 n_i}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} \right) - \mu_i n_i \left(\frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) + R_{i,source} - R_{i,sink} \quad (3.44)$$

值得注意的是，離子的質量比電子大上約 1000 倍左右，所以並不會對射頻震盪做出及時的反應，因此必須特別對離子所受的靜電場作些微的修正。以離子的力平衡方程式來看：

$$\frac{d\bar{V}_i}{dt} = -\frac{e\bar{E}}{m_i} + \frac{e\bar{V}_i}{\mu_i m_i} \quad (3.45)$$

定義有效電場為：

$$\bar{E}_{eff} = \frac{\bar{V}_i}{\mu_i} \quad (3.46)$$

將(3.46)式帶入(3.45)式中可知：

$$\frac{d\bar{E}_{eff}}{dt} = \frac{e}{m_i \mu_i} (-\bar{E} + \bar{E}_{eff}) \quad (3.47)$$

將(3.47)是以差分法展開，便可得知有效電場的時間變化。

3-3.5 空間電位分佈理論推導

在電漿中同時存在著帶正電的陽離子以及帶負電的電子或負離子，在氫氣電漿源中並無負離子存在，故帶負電的粒子僅有電子。由於電漿為電中性，所以帶正電的粒子與帶負電的粒子之總電荷數幾乎一樣，但是由於離子速度慢、電子速度快的關係，所以電子在腔體周遭所損失的速率會比離子來的快，也因此造成空間中有一電位存在，稱之為「電漿電位」，也因為有電位的存在，所以造成一空間的電場。利用帕松方程式(Poisson's equation):

$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.48)$$

其中 ρ 表示為總電荷密度，表示成：

$$\rho = \sum_j n_j q_j \quad (3.49)$$

在氫氣電漿源中，僅存在電子跟氫離子，故可表示成：

$$\rho = n_i e - n_e e \quad (3.50)$$

而靜電場 \bar{E} 與空間電位的關係滿足下列的關係：

$$\bar{E} = -\nabla \phi \quad (3.51)$$

故將(3.51)式帶回(3.48)式中，可以求得：

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.52)$$

由於先前已經算出電子密度分佈與離子密度分佈，故在此僅需將(3.52)式展開成圓柱座標：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.53)$$

再利用差分法加以整理，運用 SOR 法加以計算，便可得出電漿腔體中的電位分佈情形。

3-4 Use Visual Basic 架構電漿模型

Microsoft Visual Basic (簡稱 VB)，是一套專門設計在視窗執行的程式寫作軟體，語法上乃是以 C 語言為基礎，但更為簡潔、便利，在 VB 的平台上，可以更簡單的架構出一使用者的 UI 介面 (人機介面)。之所以使用 VB 建立模型，是為研究作永續經營的基礎，在模型架構之初，許多變數的輸入便已設計成可以隨使用者輸入而改變，模型完成後，往後使用者僅需改變所需的參數輸入，探討控制結果的好壞，對於往後對電漿發展有興趣的研究者，可以快速的進入控制的領域，而若需研究更為複雜的氬氣電漿源系統，也可直接進入程式的原始程式碼中追加程式，對於往後研究可說助益良多。

在模擬電漿時，所有相關的數學公式已經在先前的 3-3 節中詳盡的介紹過了，本模型便是以理論數學式為基礎，利用程式語言 VB 將所求一步一步求出，參考先前表 3-3 中所提及的各種參數分佈間的關係後，依順序求出各種分佈。因為各參數間有著耦合的關係存在，因此在建立模型時便有一定的程序必須遵循，唯有遵循整理出的程序，才能解出正確的腔體狀態。而在本研究中，利用 VB 建立模型時，遵守的流程圖如圖 3-2 所示。

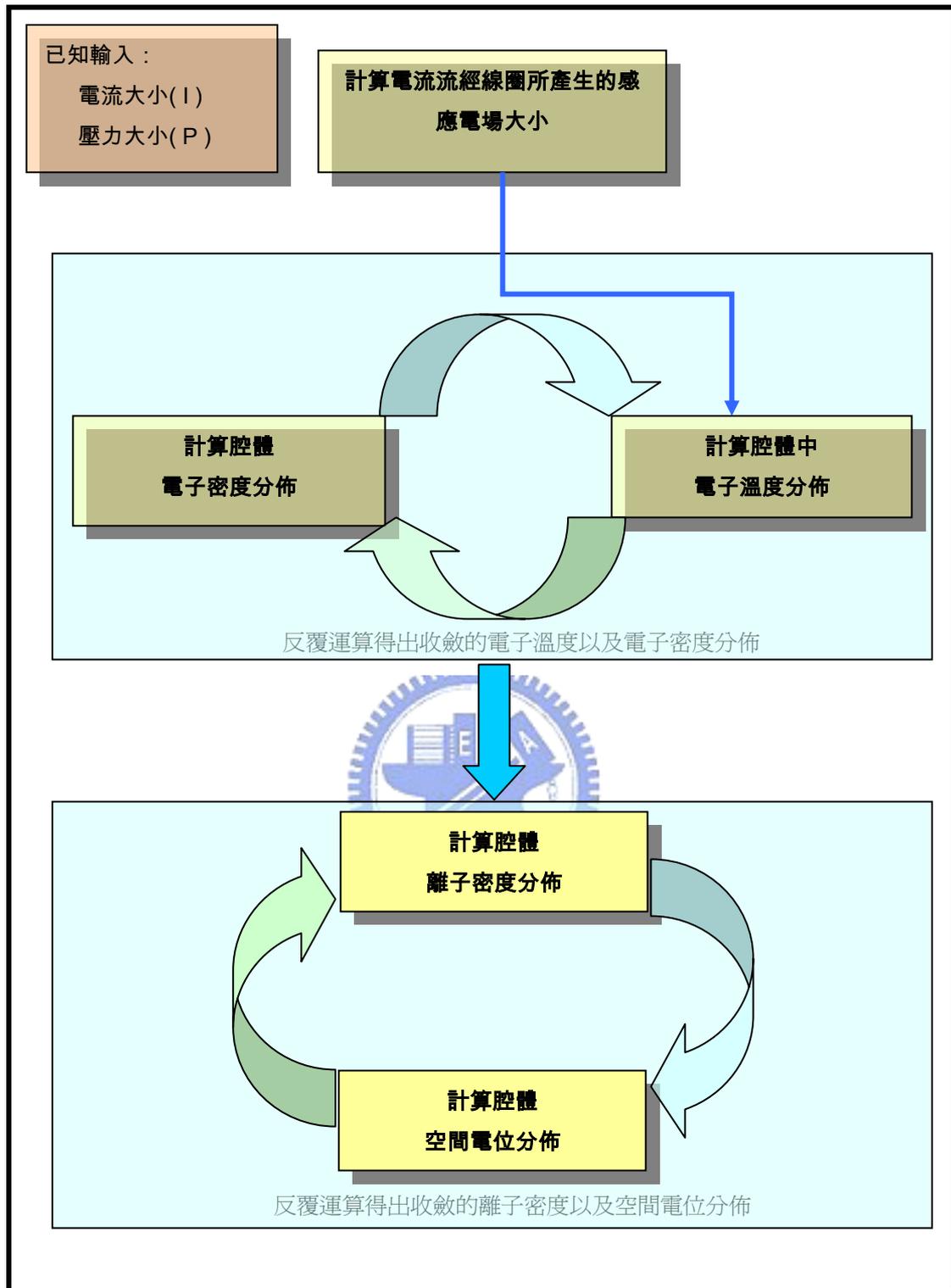


圖 3-2 電腦模擬流程圖

另外，在程式模擬定義取樣格點時，由於電漿腔體是圓柱腔體，若取等格點則會造成體積不同之困擾，如圖 3-3 所示。在二維平面上取 $r_1=r_2=r_3$ 時，取的 θ 雖然都是一樣大小，但是在體積上可以明顯看出三個區塊體積並不等大，如此在做分析時便會造成所求出的密度相同，但是實際上卻不相同的問題，此問題在 Prof. Kenichi Nanbu 的論文上也有所提及【13】。

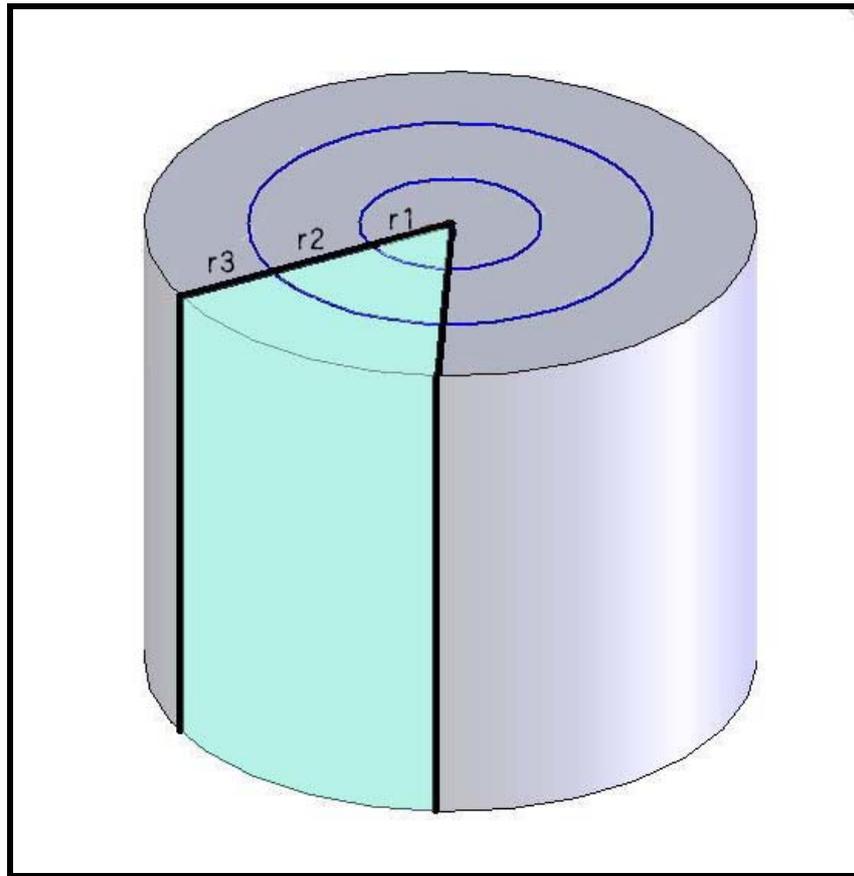


圖 3-3 格點取樣示意圖

因此，格點間的關係必須遵守一定的關係式，如下所示：

$$r_i = r_1 \sqrt{i} \quad \text{for } i=1.2.3.....n \quad (3.54)$$

其中 n 表示取多少格點，而 r_1 與腔體半徑 r_c 的關係如下所示：

$$r_1 = \frac{r_c}{\sqrt{n}} \quad (3.55)$$

由(3.54)中可以得知，每個格點間的距離是不斷縮小的，因為這種設定，每個格點所形成圓環面積會是一樣的，如圖 3-4 所清楚解釋，每個格點的面積都會是： $\pi \times r_1^2$ ，加上高度格點均為一致，所以可以保證每個單位格點的體積都是一樣的，因此運算出每個格點的正确密度值。

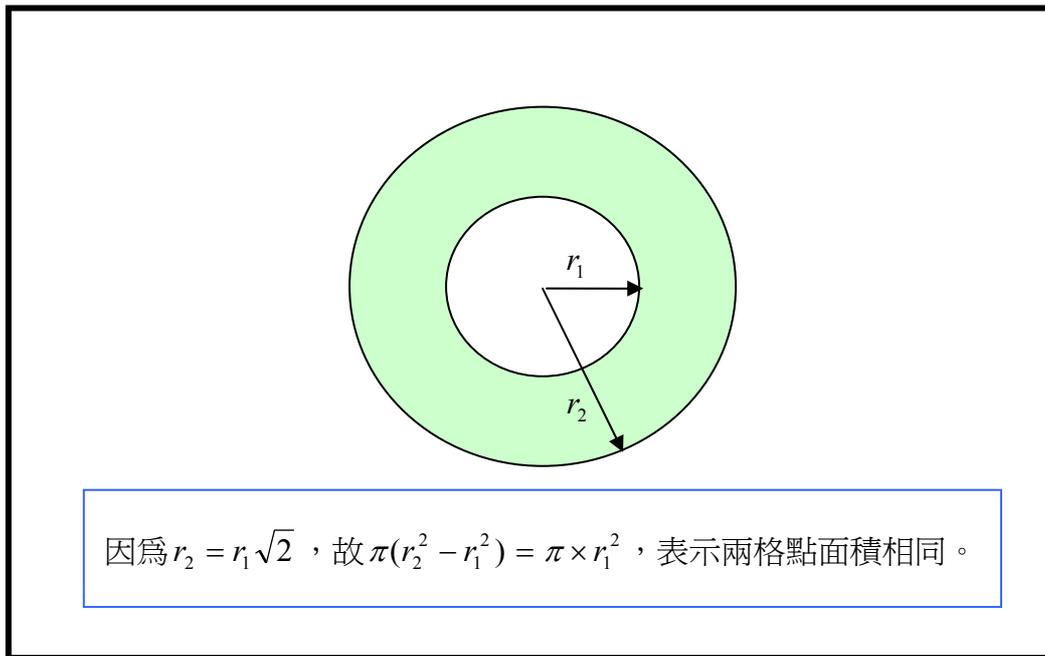


圖 3-4 圓柱等面積格點取法示意圖

第四章 電漿模型人機介面簡介

4-1 前言

如先前所提及，利用 VB 所架構的本模型擁有一個簡單的人機介面，而藉由此簡單明瞭的人機介面，可以讓使用者輕鬆瞭解程式的功能以及便於改變輸入的變數值，依照不同使用者的需求來得到所需的各種數值分佈，進而對電漿的狀態進行研究與深入探討。

本程式在撰寫之初便已經設定將所有運算出的數值依照不同的計算目的，以不同的檔名存入電腦磁碟中，為了避免產生混淆與不必要的資源浪費，各個不同目的的數值運算，其存檔檔名與存入位置全部統一固定寫入在程式之中。相關的運算與檔名條如表 4-1 所示。



表 4-1 計算名稱與相對存檔

程式中運算名稱	於 D 槽存檔名稱 (txt)
感應磁場	magnetic.txt
感應電場	electrofield.txt
感應磁位能	magnetic-potential.txt
一個 RF 週期電漿吸收功率	AveragePabs.txt
電漿分佈	All.txt
EWMA	EWMA.txt
DEWMA	DEWMA.txt
Adaptive-EWMA	A-EWMA.txt

所求出的數值，都會以純文字檔 (txt) 的模式存檔，其中關於電漿分佈這個選項所運算的，是包含電子密度、離子密度、電子溫度及電位分佈計算，因為此四個數值互相有關連，運算時不能單獨運算，所以便將四者至於同一選項，當使用者執行此選項時，所存出的數值便包含此四個部分。

載運算出所需的分佈後，為了方便瞭解分佈狀況，吾人必須再利用繪圖軟體 tecplot 或 surfer，將這些數值繪製成二維圖像，雖說 VB 也可以撰寫相關的繪圖功能，但本程式並無加入此部分，這方面考量的原因在於坊間繪圖軟體開發已盡完全，雖然在整體處理資料的程序上會略顯繁雜，但繪圖軟體的方便性與準確性卻是不容置疑的，因此吾人便不在本程式中加入繪圖的功能，改以利用現成繪圖軟體來繪圖。

至於程式內碼的畫面如圖 4-1 所示，由圖中可以看出，每個重要參數、步驟或迴圈後方均有加上中文註解，此一動作的目的在於避免當程式越趨複雜時，造成變數混淆或重複運算，在另一方面，加上註解可讓使用者得以更快速的瞭解程式碼的內容與目的，便利往後的研究者對本程式進行修改與更深一步開發。

```

Public n As Double
Public r As Double
Public a As Double
Public z As Double
Public landa As Double
Public c As Double
Public P As Double
Public Ar As Double
Public ng As Double
Public ne As Double
Public Te As Double
Public Ti As Double
Public SOR As Double
Public err As Double
Public zcell As Double
Public dr As Double
Public dz As Double
Public rl As Double
Public k As Double
Const esolz = 15.76
Const esox = 11.55
Const tol = 10 ^ -5
Const KE = 1.38 * 10 ^ (-23)
Const eso = 8.8542 * 10 ^ (-12)
Const mu = 4 * 3.141592654 * 10 ^ -7
Const pi = 3.141592654
Const EM = 9.1 * 10 ^ -31
Const AM = (40 * 10 ^ -3) / (6.02 * 10 ^ 23)
Const E = 1.602 * 10 ^ -19
Const Ve = 6.27 * 10 ^ 6
Const W = 2 * pi * 13.56 * 10 ^ 6
Public Function f(landa, r, z, a)
c = Val(Form1.Text1.Text)
Dim y As Double
y = ((mu * c * a) / (4 * pi)) * (Cos(landa) / Sqr(r ^ 2 + z ^ 2 + a ^ 2 - 2 * a * r * Cos
f = y
End Function
Public Function All(r, z)
Dim AVP As Double
Dim VP As Double
AVP = 0
If r < 0 Then

```

```

:cell type
:點的位置 (公尺)
:線圈半徑 (公尺)
:腔體高度 (公尺)
:輸入電流值
:輸入壓力(mTorr)
:Ar分子密度(1/m^3)
:Ar分子密度(1/m^3)
:電子密度(1/m^3)
:初始電子溫度
:初始離子溫度
:比率因子 (2>SOR>1)
:磁率
:半徑取樣格點數
:高度取樣格點數
:半徑取樣格點長度(m)
:高度取樣格點長度(m)
:初始取樣半徑(m)
:二維轉一維座標
:ionization shield(eV)
:excitation shield(eV)
:容許誤差值
:波茲曼常數(無耳/K)
:磁導率
:permittivity of the medium
:pi
:電子重量(Electron Mass)Kg
:一個Ar原子的重量(Ar Mass)Kg
:一個電子的電荷
:argon at 20mtorr collision frequency
:RF頻率 (13.56MHz)
:積分前的感應磁位能
:感應磁位能公式
:疊加的電磁位能
:磁位能

```

圖 4-1 程式撰寫畫面

4-2 人機介面簡介

雖然本程式主要部分已經大至完成，但由於 VB 強大的功能，本程式尚可再往下不斷擴充與開發，對於往後的研究提供了一個很好的起始平台，程式的壽命與功能將可以不斷的延長與補強，目前的程式主畫面如圖 4-2 所示，工具列功能將在下一小節中逐一介紹。本程式主要的輸入數值為輸入功率、工作壓力以及取樣的格點，至於 SOR 比率因子於之前章節中已有介紹，便不再贅訴。

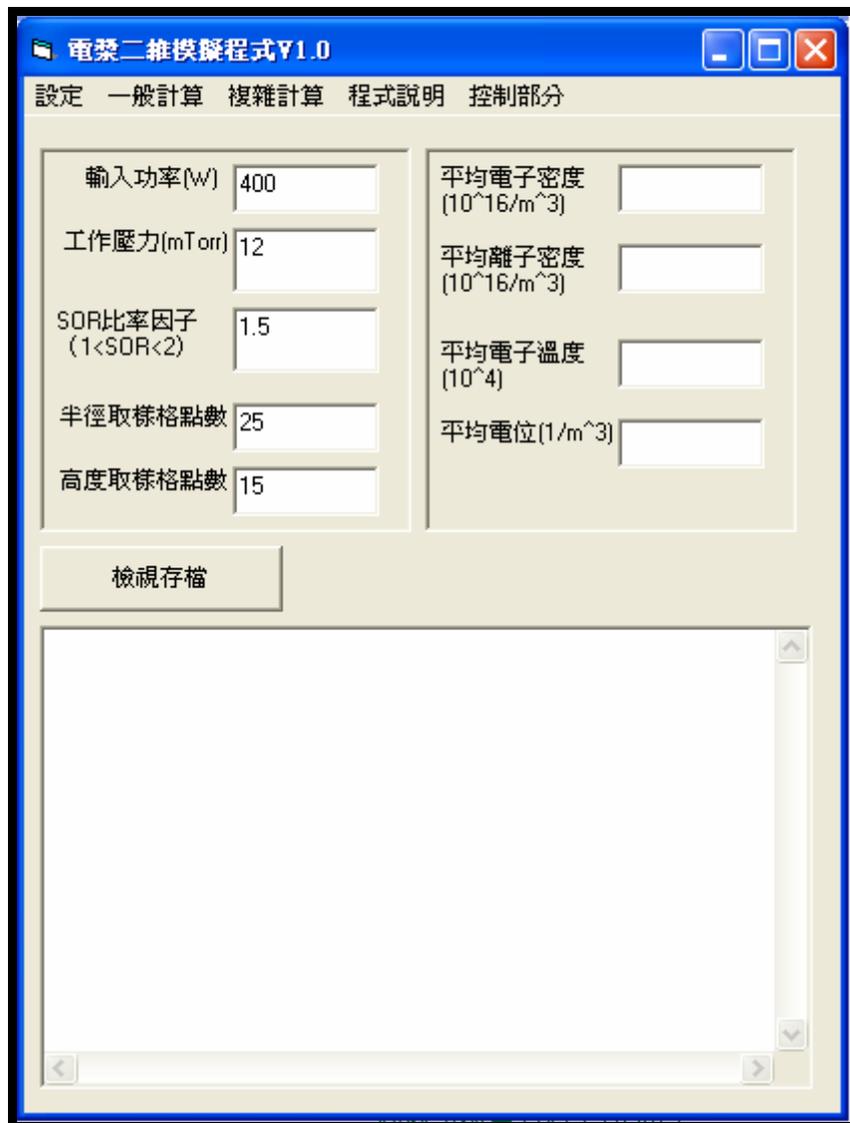


圖 4-2 電漿模擬程式操作介面圖像

本章節主要是將本電漿模擬程式使用介面做一個簡單的介紹，讓讀者瞭解本程式的大略介面，也使往後的使用者能快速的上手。上一節中有提及程式計算結果將會儲存在既定的檔案裡，在此，為避免未熟讀文章的使用者在使用時發生疑問，故在程式啟動之初，加入了一簡單的使用前須知，其圖形如圖 4-3 所示，在使用者按下「確定」鍵後，程式始能啟動。以下，便將程式中每個選項做一簡單的介紹。



圖 4-3 程式初始時之提示圖

4-2.1 設定



本部分主要在設定電漿感應線圈的數值，TCP 是利用線圈在腔體內感應出的磁場與電場來激發出電漿，此部分是影響電漿輸入功率的主因，選項所呈現的展開表單如圖 4-4 所示。



圖 4-4 「設定」選項之展開表單

當按下「線圈電阻設定」按鈕後，將會出現設定視窗，其圖形如圖 4-5 所示，其中設定初始的鋁電阻率為在 $20^{\circ}C$ 常溫下鋁的電阻率，根據電阻值的運算法如 (4.1) 式所示。

$$R = \rho \times \frac{\text{長度}}{\text{面積}} \quad (4.1)$$

其中 R 代表電阻值， ρ 代表電阻率，長度與面積代表線圈總長與線圈截面積大小。透過(4.1)式，便可由下方(4.2)式求出輸入功率與線圈電流的關係，進而影響線圈在腔體中產生的感應磁場大小。

$$P = i^2 \times R \quad (4.2)$$

P 是吸收功率， i 是電流值。



圖 4-5 線圈電阻設定

4-2.2 一般計算

一般計算的選項下拉表單中包含數個計算的選項，依序條列為感應磁場、感應磁位能、感應電場以及一個 RF 週期之平均吸收功率，在不同的輸入壓力與輸入功率下，可以計算出不同的大小分佈值，其畫面如圖 4-6 所示，點擊欲計算之數值後程式便開始運作。

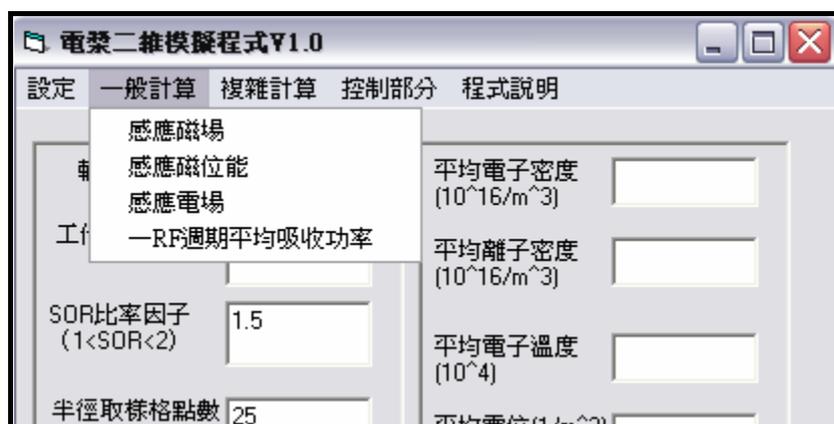


圖 4-6 一般計算的下拉選單圖式

4-2.3 複雜計算

先前章節中有提及，因為電子密度、離子密度、電子溫度之間有互相影響的關係存在，所以將其定位為複雜計算，在程式中，其下拉選單僅有「電漿分佈」一個選項，如圖 4-7 所示。目前本程式將上訴之電漿狀態統一合在「電漿分佈」這一選項中計算，在點擊此一選項後程式便開始計算，計算出的數值檔案中就包含電漿中之電子密度、電子溫度、離子密度以及電位分佈此四種數值，不同於其他計算，此部分在計算完畢後，會在程式介面的右半面出現計算後的平均電子密度、平均離子密度、平均電子溫度、平均電位值。

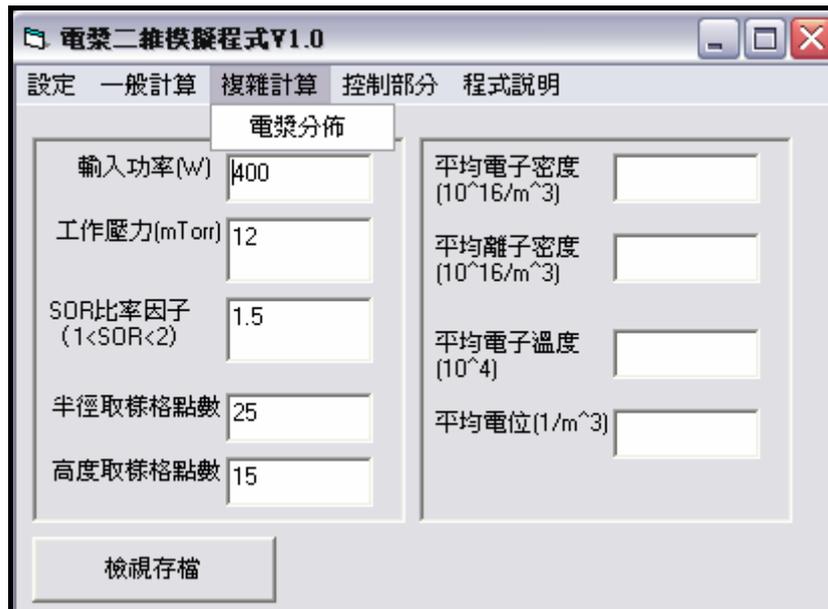


圖 4-7 複雜計算之下拉表單

4-2.4 控制部分

此部分是利用本模型計算出的數值所建立的系統來當作欲控制之系統，利用不同的 EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) 控制法則、不同的權重來探討其效果，基本上這是屬於 Run-to-Run 的控制法，關於這部分的詳盡原理與作用將在之後的章節裡有更深入的探討與介紹，本章節僅作模擬電漿程式介面的介紹部分。基本上，此一選項的下拉選單如圖 4-8 所示，一共包含三個不同的控制法則，每個控制法則有不同的參數可以調矯，在此，為了簡化版面，便將這部分的表單採合併的方式濃縮在圖 4-9 中，在程式真正使用時，此三個表單是個自獨立的輸入介面，點擊「開始計算」鍵後，程式便開始運作。獨立於電漿的模擬，僅在於控制理論的探討。

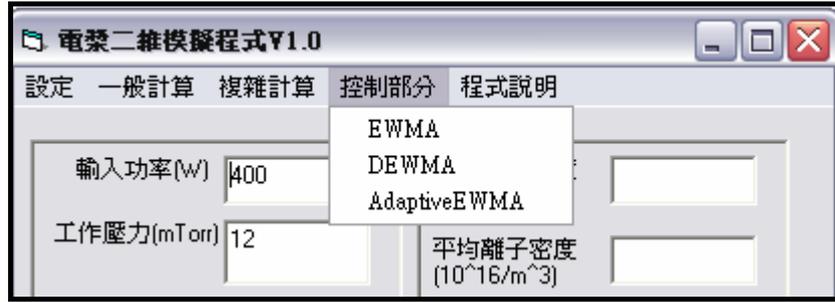


圖 4-8 控制部分的下拉選單

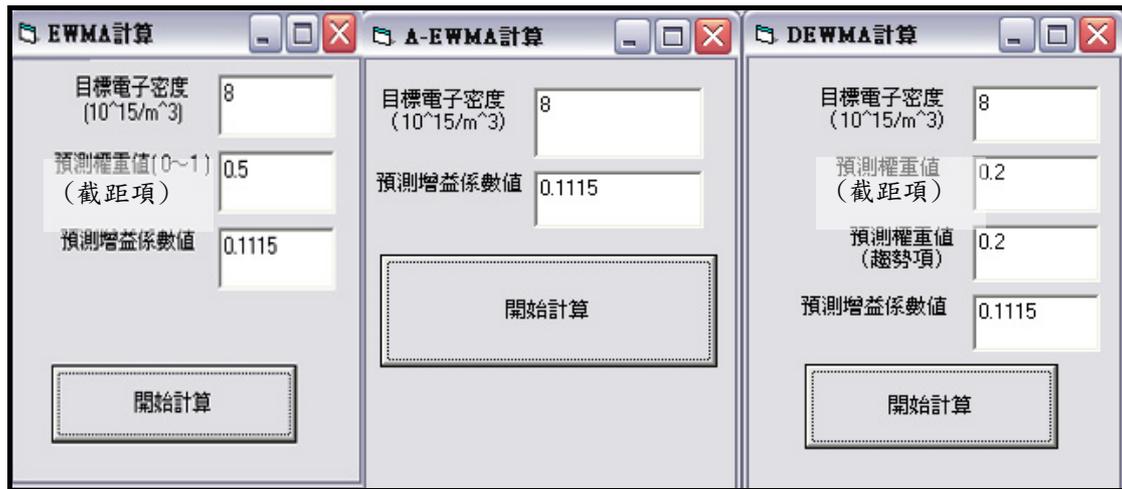


圖 4-9 控制部分各選項的調適表單

4-2.5 程式說明

此部分僅有版權以及使用者權限、程式設計者名稱等宣告，屬於本程式的版權宣告功能，點擊後其表單如圖 4-10 所示。

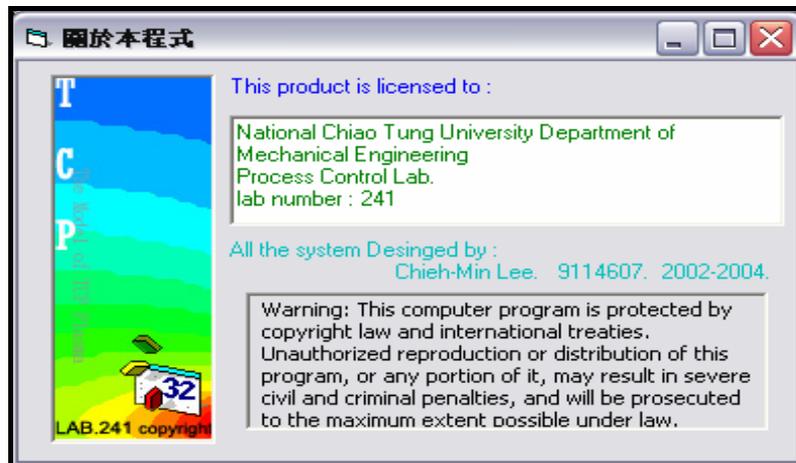


圖 4-10 本程式版權宣告顯示

4-2.6 檢視存檔功能

為了方便使用者觀察所運算出的數值之大小是否合理，以方便在不關閉模擬程式視窗之下改變參數再行運算，因此特別在程式中加入檢視存檔的功能，只需要按下檢視存檔的按鈕，選擇所要檢視的文字檔，按下開啟後，便會顯示在程式介面下方的可縮放的檢視匡中，如圖 4-11 所示。

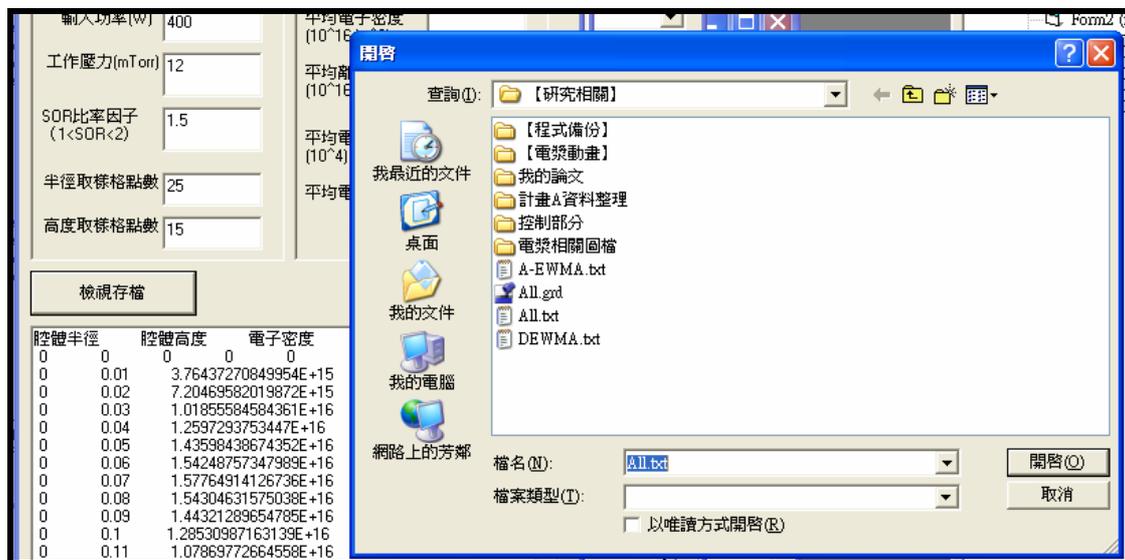


圖 4-11 檢視存檔示意圖

第五章 模擬結果與討論

5-1 模擬分佈圖與相關論文比較

由於目前氫氣電漿源可供實驗收集的數值均為平均值，故僅能從相關的論文中將圖形與本模型所求出之結果加以比對，藉此確定本模型的正確性，至於實驗與模型的驗證部分也會在本章的最後章節部分將以介紹與比較。

以下便列出本模型所計算出的數值，利用 tecplot、surfer 等繪圖軟體繪製成圖形後，再將之與 Peter L.G. 等人的論文【7】中之圖形作比較，因為本程式座標系統在開始撰寫之初，為了方便運算的邏輯思考，於是將線圈置於下方來建置，如圖 5-1 所示。在趨勢上跟 Peter L.G. 論文中的圖形有鏡像的關係，不過很容易可以看出兩者之間相同的趨勢關係。特別值得注意的是 Peter L.G. 用的模擬法乃是蒙地卡羅法的分析方式，從比較圖中可以發現，雖然模擬的方式不同，但卻與本程式的流體模式分析出的結果極為相符，因此可以藉此驗證本模型的正確性。

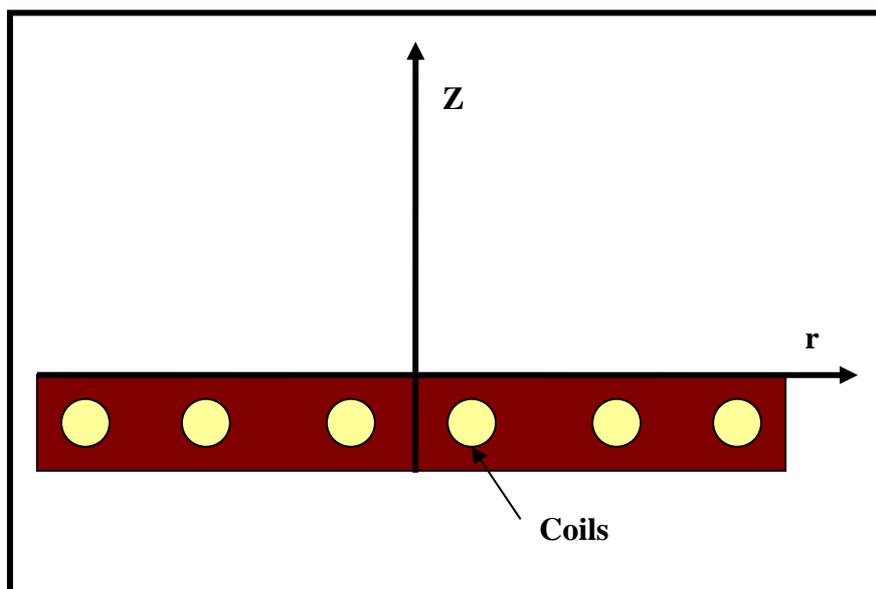


圖 5-1 程式座標圖

5-1.1 平均單位吸收功率與感應電場之討論

首先，吾人由 Peter L. G. 的論文之中所做的模型來做一個相關驗證，其模型所計算出的圖形如圖 5-2 所示，在此圖中可以清楚的看出，當 Ar 氣體在壓力 10mTorr 之下，其產生的單位能量吸收率分佈(POWER DEPOSITION)與線圈感應電場(ELECTRIC FIELD)的大小分佈狀況，在此有一重要的單位配置問題必須提出讓讀者瞭解，在本程式中所使用的單位為公尺制，而從圖 5-2 中可以發現，在系統單位方面，Peter L. G. 所採取的乃是公分制，與本程式所採取的公尺制不同，所以本程式的大小值會相對大於 Peter 的數值，此乃是單位不同所導致。

本程式中所運算出的電場分佈與吸收功率分佈數值，再利用繪圖軟體後，其圖形個別如圖 5-3 與圖 5-4 所示，此兩圖的設定同樣都在 10mTorr 的壓力之下。圖 5-3 乃是感應電場的分佈大小，由於在 Peter 論文中並無對圖 5-2 所輸入的功率有所提及，因此無法從數值的大小來做比較，僅從趨勢方面加以相比。圖 5-3 中並無設定邊界條件，而輸入是由線圈電流 50 安培時來計算的，大小值單位為 V/m 。另在圖 5-4 部分，單位平均吸收功率的分佈是在輸入 400W，壓力 10mTorr 時的大小值，其單位為 W/m^3 。

由程式與論文的比較，可以觀察到在趨勢上，不論是 Peter 的模擬還是本程式的模擬，兩者幾乎是一致的，所以由此可以證明出本程式在模擬此一部份方面的可信度。在圖 5-4 部分，在靠近腔壁的部分大小值降低的速度很快，這乃是由於腔壁乃是一個接地的狀態，故接近腔壁的地方感應電場會明顯下降，也因此單位吸收功率下降的很快，與圖 5-2 不同之處在於圖 5-2 感應線圈的位置離側腔壁較遠，故其所展現出來的趨勢是比較平緩的。

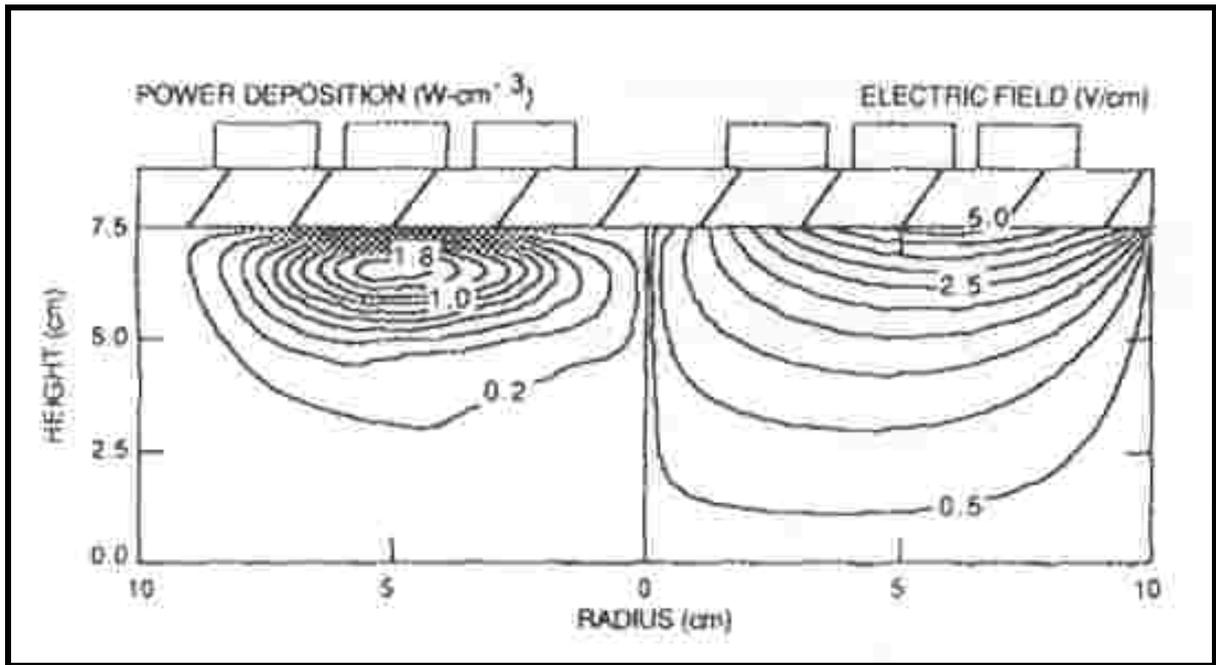


圖 5-2 Peter L. G. 所做之模型(Ar, 10mTorr) 【7】

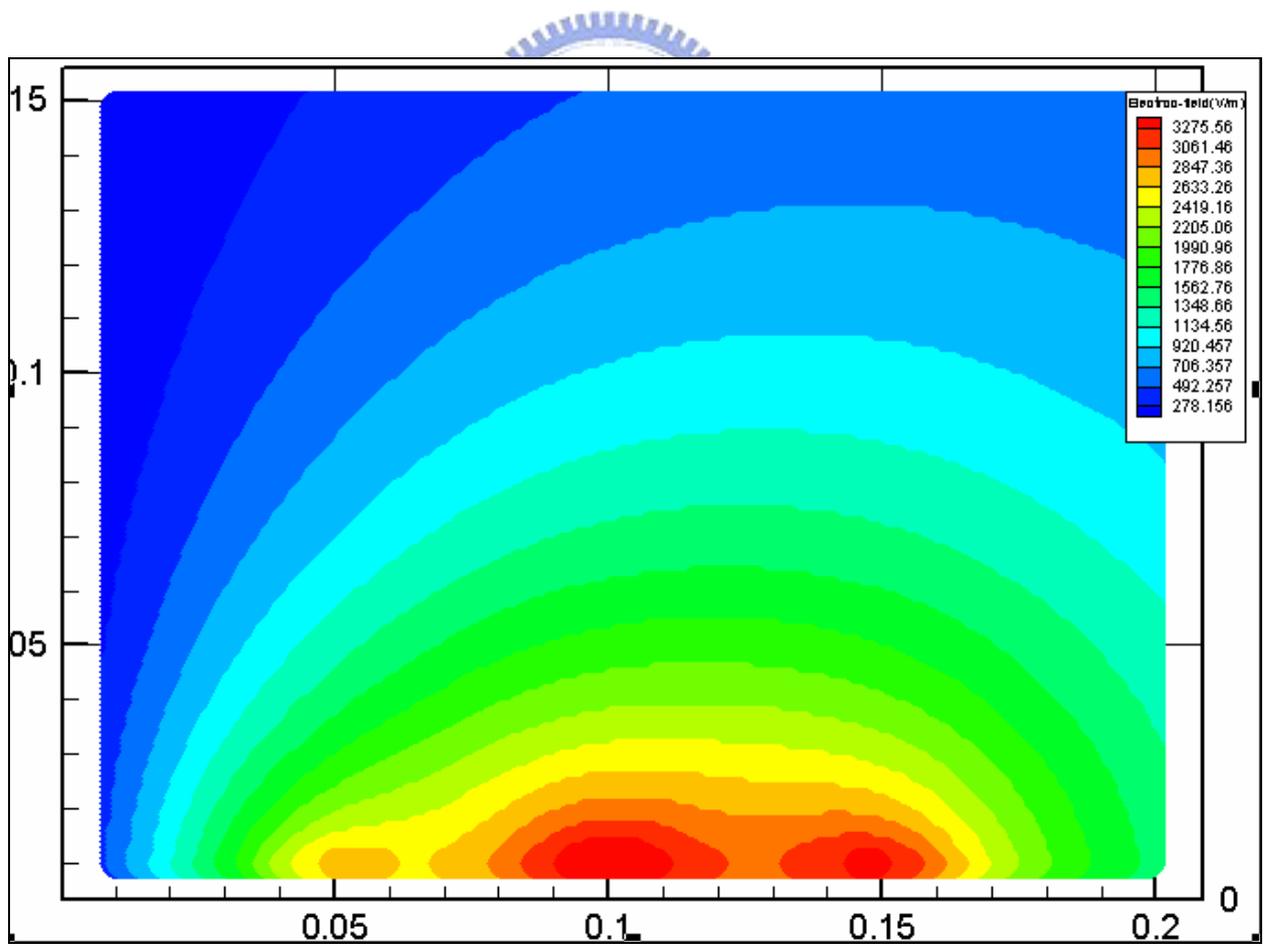


圖 5-3 感應電場分佈圖(輸入電流 50 安培, 10mTorr)

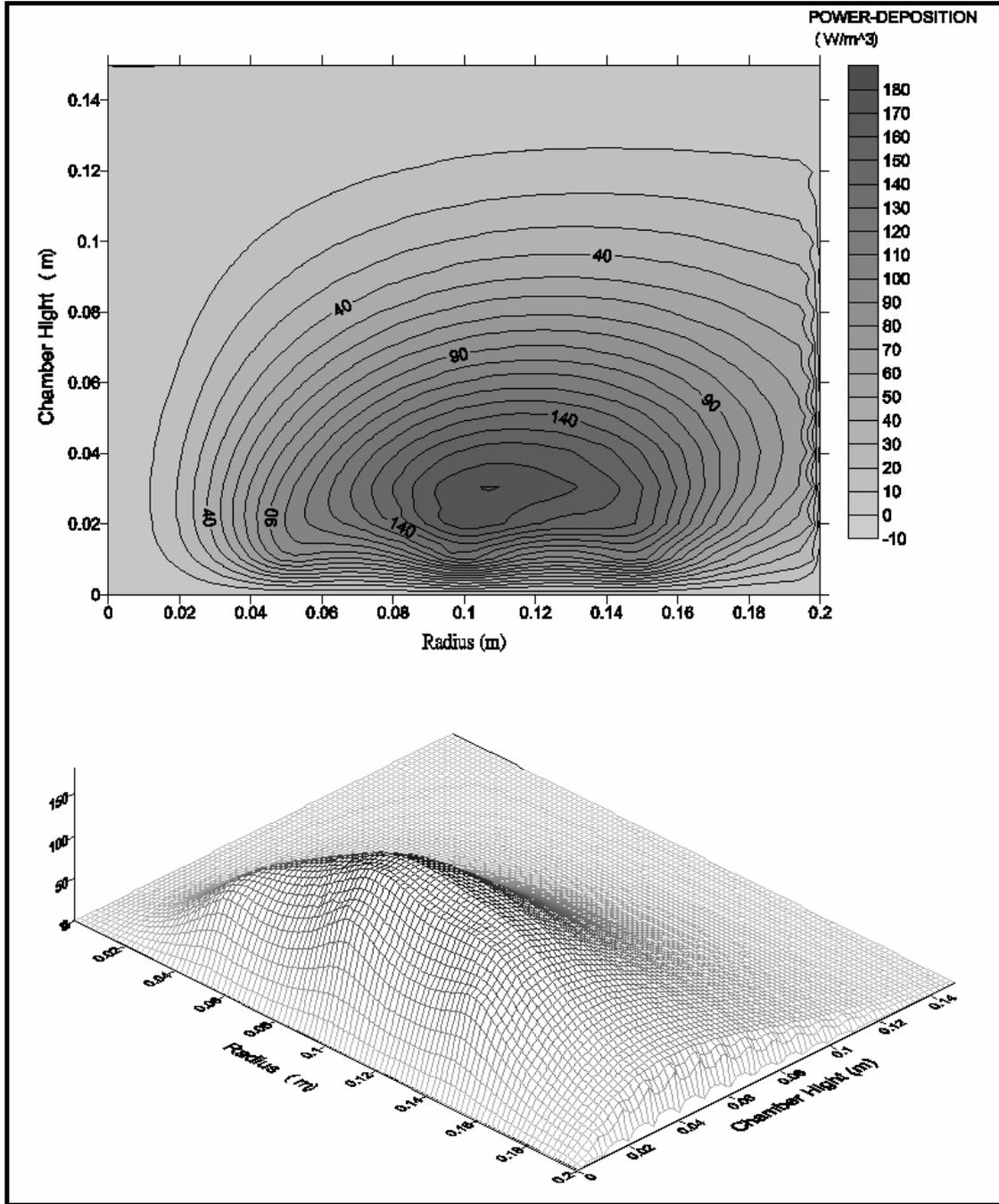


圖 5-4 穩態電漿吸收功率(Ar, 400W, 10mTorr)

5-1.2 電子密度與電位分佈之討論

由於 Peter 的論文中，並無氬氣電漿源的電子密度與 Ar 離子密度一起比較的分佈圖，圖 5-5 中為 $Ar/CF_4/O_2$ 電漿中電子密度與起體離子密度的分佈狀況，從中可以看出一個大略的趨勢狀況，由圖中可看出在腔體中間接近線圈的部分會存在比較高的電子密度與離子密度，相對於四周的腔壁以一梯度的方式下降，至腔壁後為最小值。為求準確，由 R. A. Stewart 【3】 等人在早期的模擬圖形中來看，如圖 5-6 所示，也呈現如圖 5-5 般的狀態。

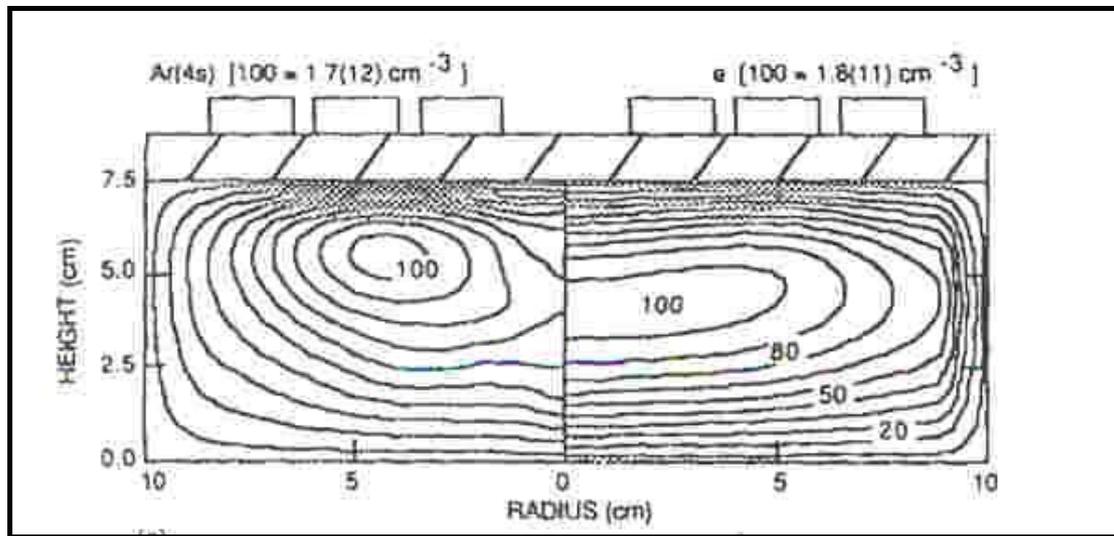


圖 5-5 Ar 離子分佈與電子密度分佈 ($Ar/CF_4/O_2$, 10mTorr) 【7】

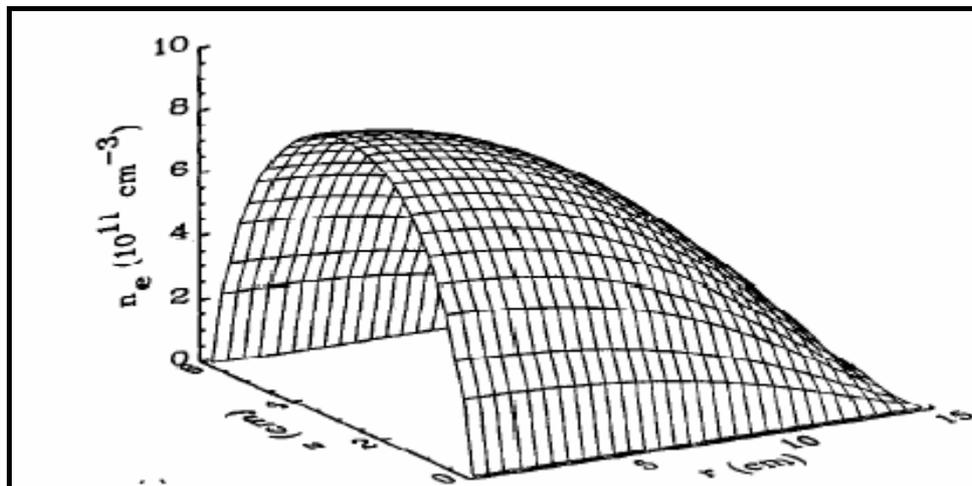


圖 5-6 R. A. Stewart 所模擬之電子密度分佈 【3】

本模型所計算模擬出的圖形，在電子密度分佈方面，如圖 5-7 所示，而離子密度分佈如圖 5-8 所示，工作壓力均為 10mTorr，輸入功率均為 400W。將之與先前的圖形 5-5 與 5-6 相比較之後，可以看出本程式的運算結果與不同模擬法則下所模擬出的電漿狀態，存在著相同的趨勢。也由於存在著相同的趨勢，可以說明本程式的模擬結果有一定的可信度。

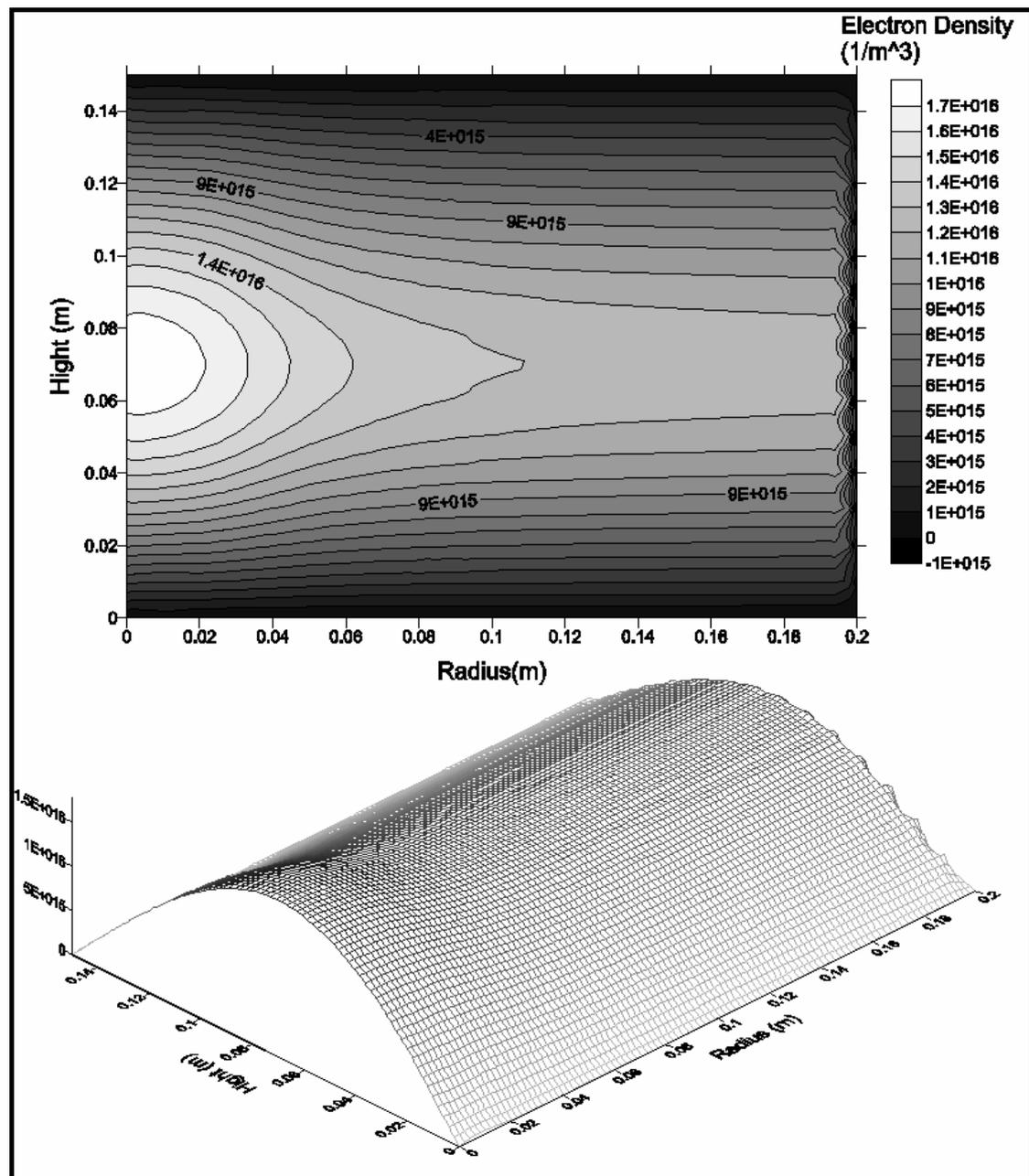


圖 5-7 程式計算之電子密度分佈 (Ar, 400W, 10mTorr)

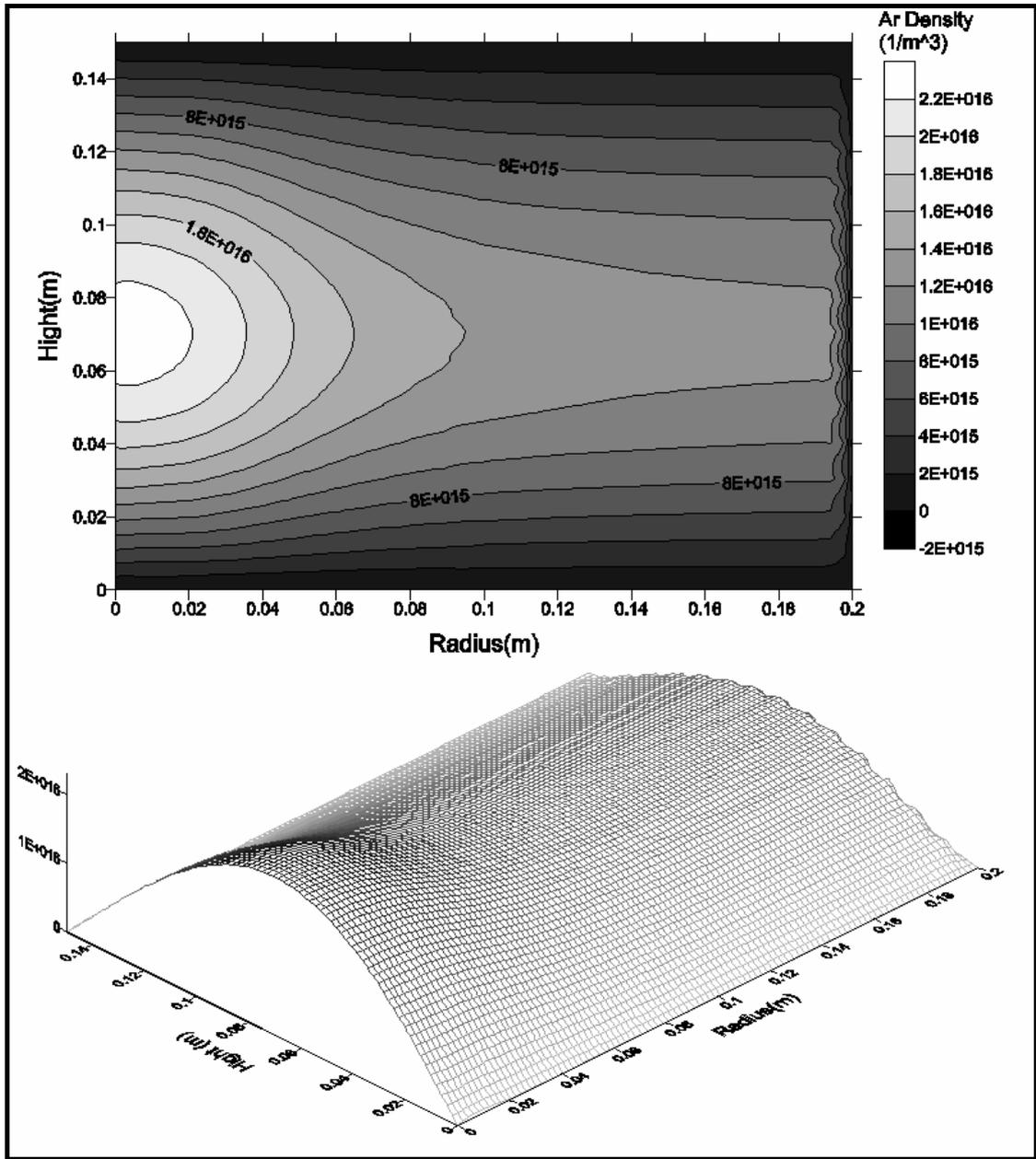


圖 5-8 程式計算之電子密度分佈 (Ar, 400W, 10mTorr)

5-1.3 電子溫度分佈之比較與討論

由 R. A. Stewart 等人在早期所做的模擬研究中，有相關的電子溫度分佈圖形如圖 5-9 所示。其設定為接近邊界時變化梯度為零，故在四周邊上並無下降的狀況出現。利用本程式所計算出的數值所呈現的圖形如圖 5-10 所示，由於本程式基於電子到達腔壁上時便因接地的關係而流失，也就是在腔壁上並不會有電子溫度存在，故在腔壁上的電子溫度也設定為零，因此與圖 5-9 所示的狀況有些許出入，但是明顯的，由圖 5-9 可以看出，接近感應線圈的部分溫度會比較高，而相對的角落也有較高的趨勢，形成一雙峰的分佈狀態，而雙峰中在遠離感應線圈的那端的值會比較小。再來，觀察程式所跑出的電子溫度分佈圖形如圖 5-10 所示，明顯的看出其中也存在著一雙峰的趨勢，且遠離線圈的高峰數值會比接近線圈的高峰數值小，因此又再一次證明本程式計算出的數值的可信度。

至於圖 5-10 在接近側腔壁部分有一梯度的下降趨勢，然而圖 5-9 卻沒有此一趨勢存在，較大的可能性在於 R. A. Stewart 所計算的部分比本程式所計算的範圍小，故圖 5-9 中看不出電子溫度有隨腔體半徑增加而減小的趨勢而本程式卻可以看出離開雙峰最高點後的電子溫度分佈區間走勢圖。再者，由於在 R. A. Stewart 論文中並無提及其模擬電漿時的感應線圈圈數與線圈的半徑，而本程式的線圈共三圈，半徑分別為 0.05、0.10、0.15 公尺，此一原因也可能是造成所呈現的圖形有所出入的原因之一。

但是可以確信的是，由圖 5-10 中可以看出，在半徑 0.12 之前的等高圖形分佈狀態與圖 5-9 幾乎是完全符合的趨勢狀態，此點也間接證明了先前所做的假設可能成立的一大佐證。

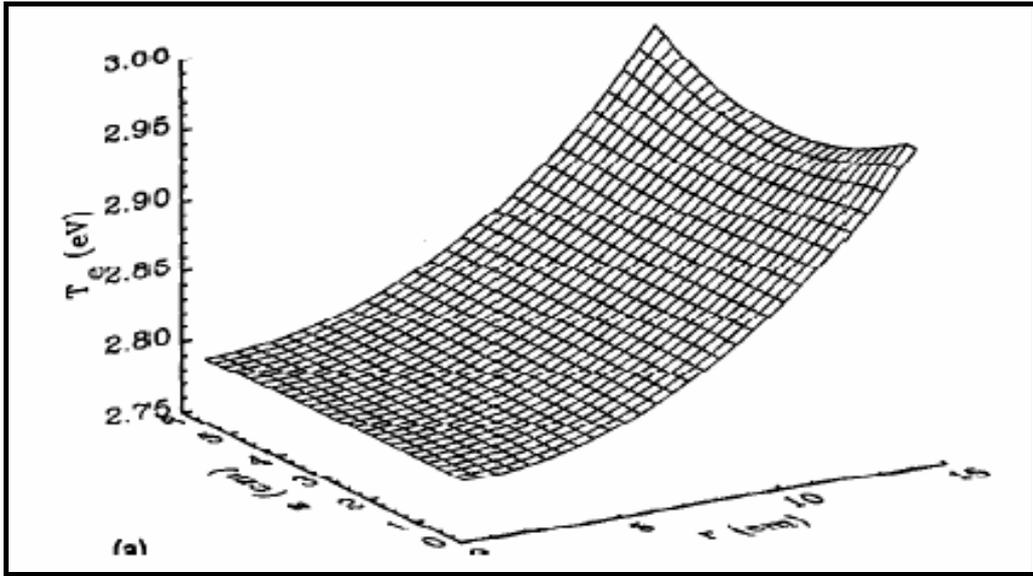


圖 5-9 R. A. Stewart 模擬之電子溫度分佈【3】

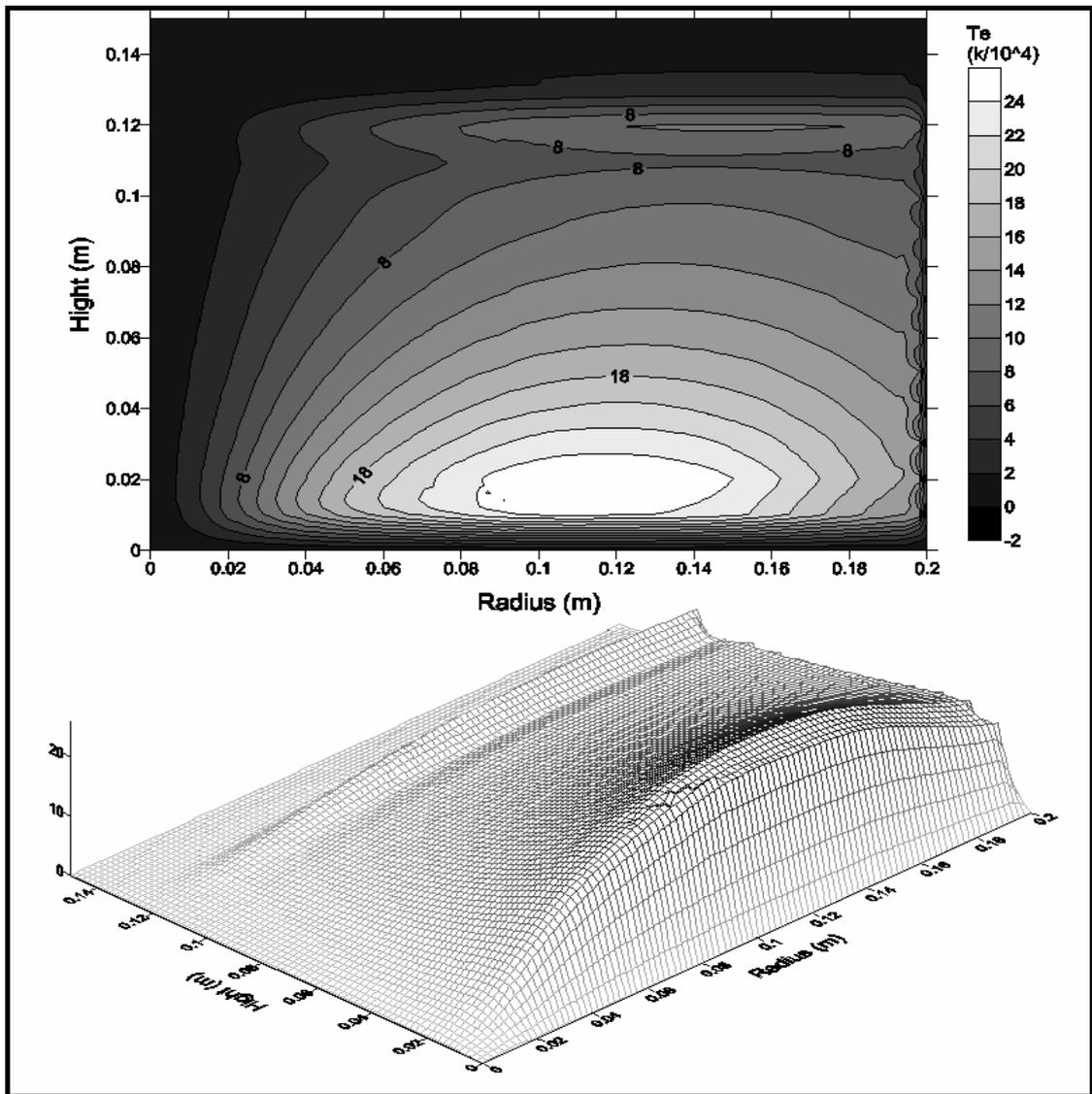


圖 5-10 程式計算之電子溫度分佈 (Ar, 400W, 10mTorr)

5-1.4 電漿電位分佈之比較與討論

同樣的，再次比照 Peter L.G. 所做的蒙地卡羅模型，其所演算出的氬氣電漿電位分佈情形如圖 5-11 所示，工作壓力 10mTorr，圖中大小值 100 乃是代表 13.8V，以此比例換算。另外在 R. A. Stewart 所模擬之電漿電位分佈如圖 5-12 所示。從此兩者中均可以明顯的看出在電漿中電位的分佈狀況，比較本程式所運算出的分佈狀態圖如圖 5-13 所示，程式乃是以輸入功率 400W，壓力 10mTorr 下計算分佈狀態，除了發現趨勢相同外，圖 5-13 與圖 5-11 由於工作環境差不多，故其大小值也差異不大，再一次證明了本程式的正確性。

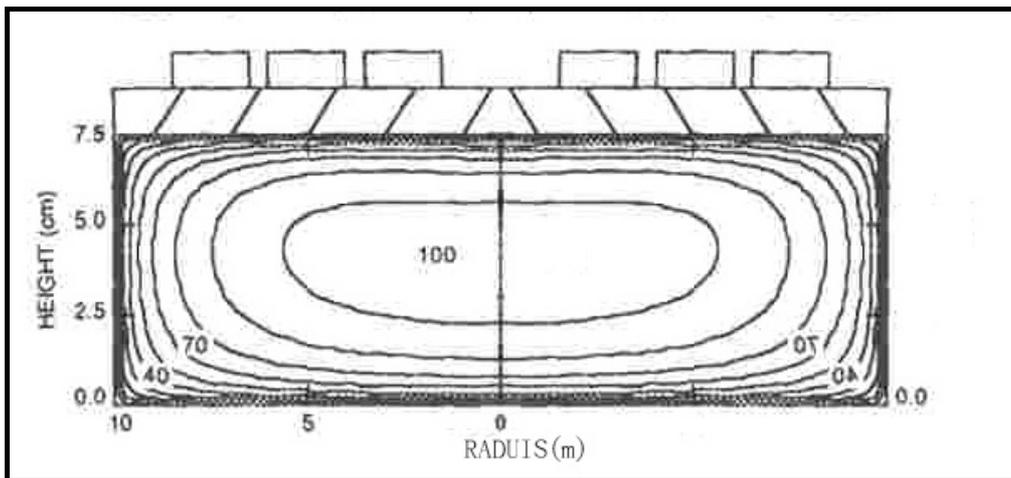


圖 5-11 Ar 氣電漿電位分佈 10mTorr 【7】

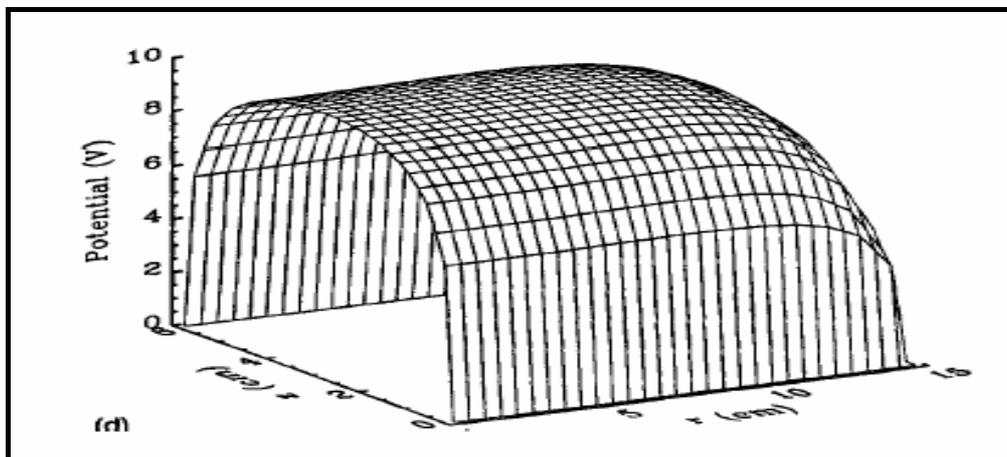


圖 5-12 R. A. Stewart 模擬之電漿電位分佈 【3】

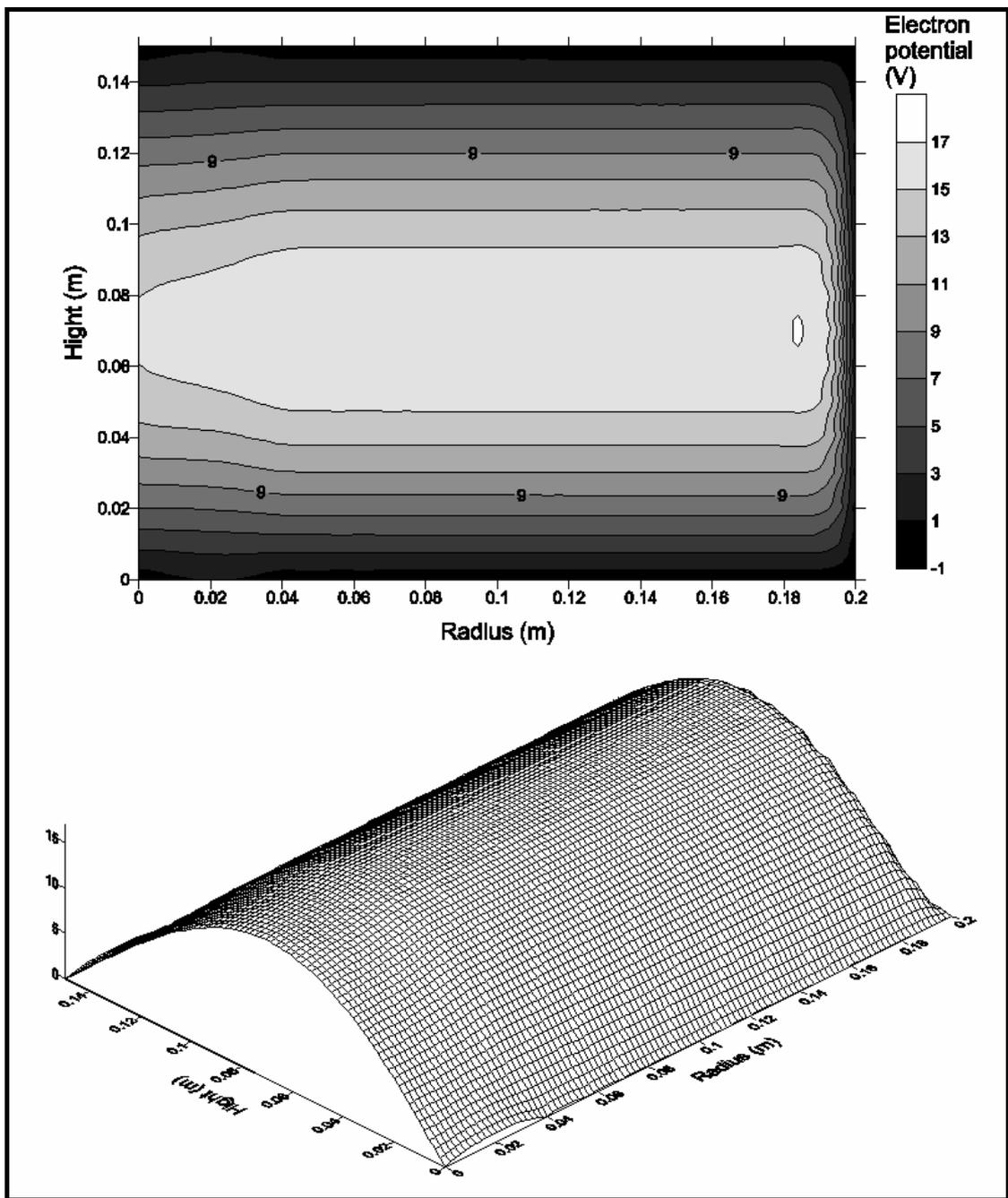


圖 5-13 程式計算之電漿電位分佈 (Ar, 400W, 10mTorr)

5-2 模擬與實驗結果比較

由於現今並無現有的儀器可以驗證電漿二維的分佈狀態，故在此二維分佈部分大多是利用相關論文來做驗證，上一小節便是利用國外較為著名的電漿模擬論文來比較與探討本模型的正確性。為了更進一步的驗證本模型的正確性，本章節將利用實驗的結果與模擬的結果兩相比較，將兩者作一個簡單的比較與驗證，藉此支持本模型的正確性。

5-2.1 實驗儀器介紹

用來做實驗驗證的主要機台乃是行政院國家奈米實驗室(NDL)的 LAM-TCP9400 機台，如圖 5-14(a)所示。此機台主要為蝕刻多晶矽用，主要的工作氣體為氟氣，由於我們實驗室跟 NDL 有合作計畫的關係，故破例在此機台上多加裝了一條管線，此一管線便是 Ar(氬氣)管，藉此來驗證本程式的氬氣模型。

在收集數據的方面，乃是利用 ASI 出產的 Hercules，機台如圖 5-14(b)所示，主要是利用在 TCP9400 的腔壁上裝置上一個 sensor(SEERS, Self Excited Electron Resonance Scope)，工作的理論如圖 5-15 所示，在此便不加贅述。Hercules 主要的功能在於可以收集電漿的平均電子密度與碰撞頻率，因此便可以利用收集到的平均電子密度來間接驗證本模型，不過由於其所收集的數據乃是一個平均電子密度值與碰撞頻率值，所以無法運用在二維電漿狀態空間分佈方面的驗證，且裝置 sensor 的位置在於腔體的側壁，此點也需要加以考量。



圖 5-14 (a)NDL 之 Lam-TCP9400 機台 (b)ASI Hercules 裝置

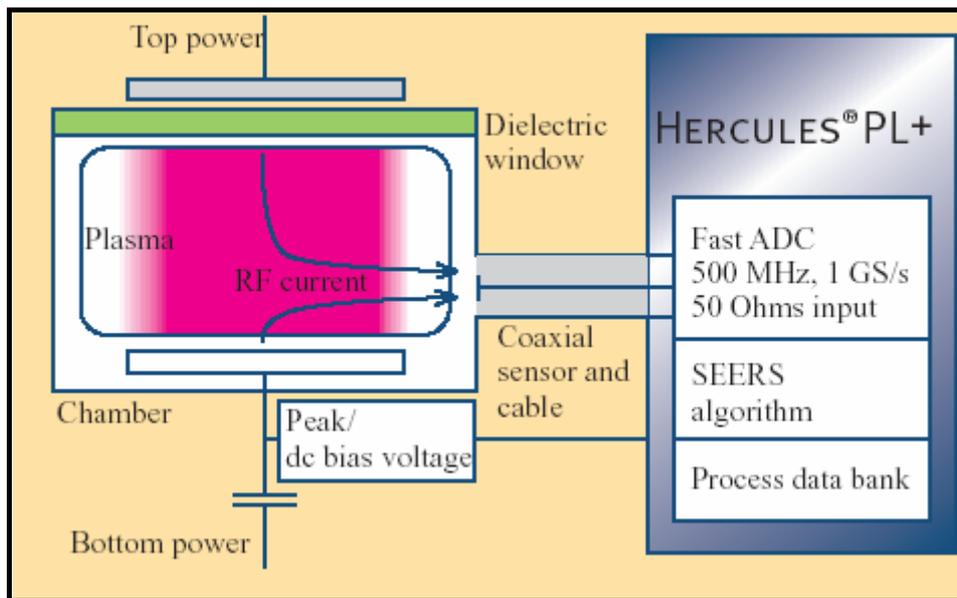


圖 5-15 SEERS 的工作原理概論

5-2.2 實驗數據與模型的比較與討論

由於實驗成本與時間的關係，在 Ar 電漿源部分所做的實驗並不多，也因此所能做比較的數據便比較少，但是基本上這些數據已經能夠看出一定的趨勢，可以初步驗證模型。值得一提的是 Ar 電漿在 Lam-TCP9400 機台上壓力小於 5mTorr 時無法點燃電漿，相關實驗的數據如表 5-1 所示，每一個實驗電漿點燃的時間均設定為十秒。

表 5-1 Ar 電漿實驗數據 (電子密度 $10^9 / \text{cm}^3$)

壓力(mTorr) \ 功率(W)	5	12	25
250		1.78	
400	1.14	1.87	3.36
800		2.21	

5-2.2(a) 定功率改變壓力之比較與討論

由於儀器所收集到的數據乃是一個平均的電子密度值，故吾人便將模型全部腔體中的電子密度予以平均，利用此一模型所計算的平均數值，經過收集整理後與實驗數值做比較，圖 5-16 乃是固定在吸收功率為 400W 時，不同壓力下電子密度大小值的趨勢，可以看出與實驗值不完全相同。

為了求準確，參考 Peter L.G. 的論文，其在輸入功率 1000W、改變壓力大小值時模型所呈現的趨勢如圖 5-17 所示，可以看出在模擬方面，本模擬程式與之相去不遠，但其所做的實驗值明顯不如利用 Hercules 所收集的數據來的貼近模擬曲線，所以本實驗所得的數值比較值得信賴，依照實驗所示，壓力上升會造成

電子密度增加，基本上在模擬時也是呈現增加的走向，至於數值明顯大於實驗數值，除了模擬數據乃是全部腔體數值平均、模擬的電漿狀態屬於忽略一些外在因素與流失的原因之外，實驗收集電子密度的 sensor 放置於腔壁、實驗數據不夠多也有一定的關係。

所以總結來說，本程式所模擬的數值算出的趨勢跟實驗所算出的走向有相似的關係，且就物理觀念來說，在一定體積的空間中，壓力增加使空間中離子密度增加也會有一定的極限，不可能無限制的增加下去，再者，壓力不斷增加雖使空間中粒子增多，但也導致輸入功率不足以滿足所有粒子反應所需之能量，因此理論上的下降趨勢可以說是合理的。

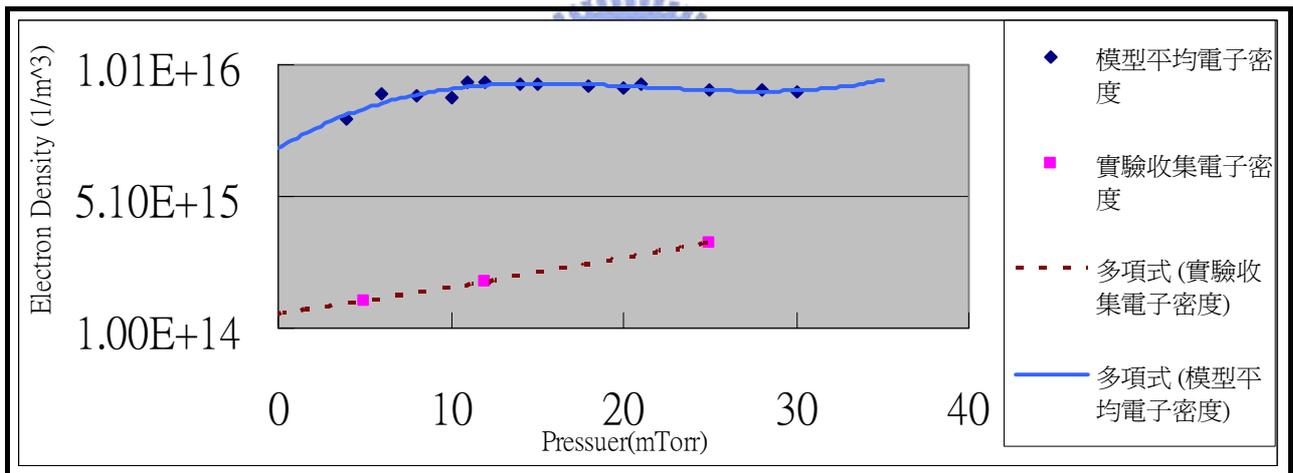


圖 5-16 400W 功率下模型與實驗之電子密度比較圖

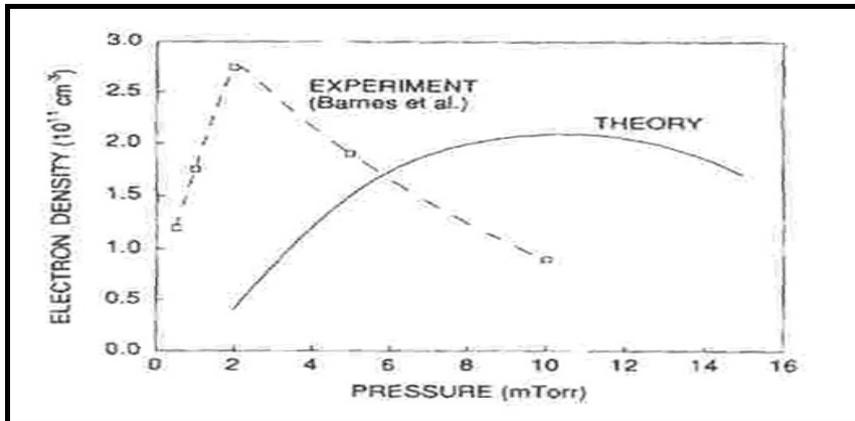


圖 5-17 Peter 模擬之電子密度變化狀態 (1000W, Ar)【7】

5-2.2(b) 定壓力改變功率之比較與討論

相同的，將實驗收集的數據利用圖表表示如圖 5-18 所示，是一個電子密度隨輸入功率增加而增加的趨勢，另一邊再來觀察模擬程式所收集的平均電子密度圖表，如圖 5-19 所示，可以發現模擬電漿狀態中的電子密度也會隨著輸入功率的增加而增加，實驗數據的斜率為 0.0006，模擬數據的斜率為 0.0004，約有百分之三十三的誤差。

因此，我們可以證明實驗與模擬有一樣的趨勢存在，也就是說模擬具有很好的可信度，唯一不同的是模擬的電子密度值大於實驗所量出的數值，此點跟上一小節中所討論的狀況是一樣的，但除了先前所說可能發生的情形外，在撰寫模型之初對於吸收功率的部分並沒有加入吸收不完全以及能量流失的考量，因此模擬數值應大於實驗所求得的數值。

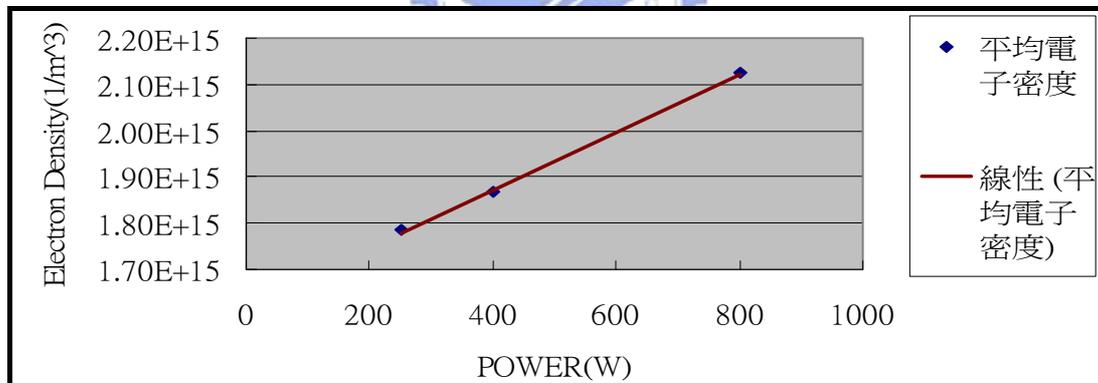


圖 5-18 12mTorr 不同輸入功率下實驗電子密度值

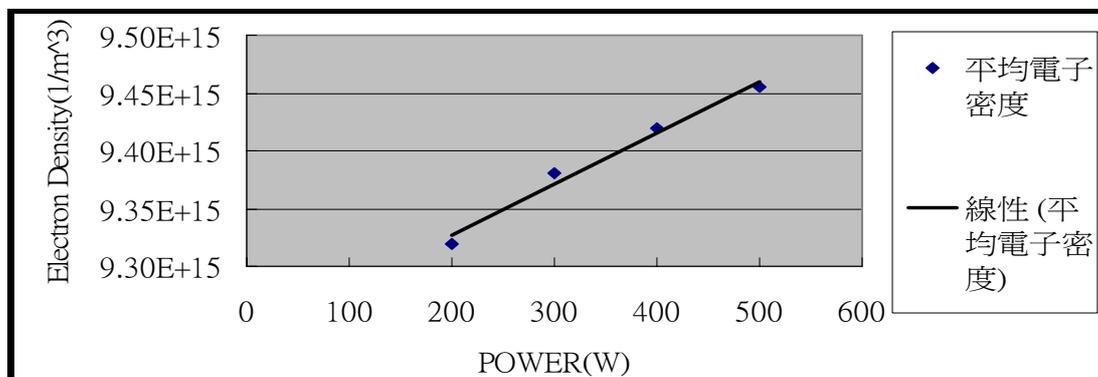


圖 5-19 12mTorr 不同輸入功率下模擬電子密度值

5-3 結果與討論

經過前兩小節的比較與討論，可以瞭解到利用 VB 所建立的 TCP 模型不但與不同的模擬方法所得的結果趨勢相同，而且與實驗所得的結果趨勢也相同。因此吾人便可在節省成本與研究之正確性兩者兼顧的基礎上，利用此一模型來做 TCP 電漿相關的研究。

本模型在趨勢上雖然均可以符合，但在數值分佈的大小值方面卻較不相同，基本上，從之前的比較中可以看出本模型與其他不同方法模擬的論文相去不遠，唯有實驗值明顯低於模擬值許多。在此歸納相互比較後的幾個主要可能造成差異的原因，整理條列如下。

在模擬與論文比較方面，主要的影響原因有：

1. 模擬的輸入功率不同

相關論文中有些並無提及使用功率，僅有提及一般操作功率在 500W，本模型由於要與實驗比較的關係，採用 400W 的輸入功率，因此數值會有不同。

2. 線圈的圈數不同

相關論文中在此一方面並無詳盡介紹，因此足以影響整個分佈甚至是數值大小的不同。

3. 線圈的長寬與電阻率不同

由於此點會影響吸收功率的大小值，國外論文中僅提到輸入功率，卻無此一部份的介紹，因此造成基本上的起始點不同，所以所運算出的數值也可能不同。

在模擬與實驗比較方面，主要的影響原因有：

1. 實驗收集的是腔壁的電子密度

由於 SEERS 是裝置在腔壁上，如圖 5-19 所示，且其收集的數據乃是由 RF 電流、電壓、感應電流等換算而成為平均電子密度，由模擬與實際觀察電漿腔體在激發電漿時的狀態可以知道，在腔體中心是電漿最為明亮，亦為產生電子最多的地方，而在腔壁所持有的電子密度較少，因此吾人將整個腔體的模擬電子密度取平均後，會大於實驗所收集到的數值。

2. 模擬較實際情形完美

程式模擬所考慮的狀況遠比實際情形簡單，且模擬不考慮許多外在的雜訊干擾等問題，單對吸收功率的這一部分來說，程式中並沒有加入吸收不完全以及能量流失等方面的考量。因此實際實驗值比模擬數值小屬於合理情形。



3. 實驗數據略顯不足

由於實驗的數據略顯不足，所以單憑少量數據所畫成的趨勢會很線性，比較沒有上下跳動的變化，跟模擬呈現有曲折的趨勢現象不盡相同，因此造成趨勢上跟程式模擬有些許的出入。

4. 機台本身的影響

由於機台屬於長時工作機台，會有許多殘留的粒子和累積的電荷..等等問題，因此同樣的電漿參數在每片 wafer 上並不會完全相同，此一點也會影響到實驗數值的正確性。此一點論在圖 5-20 由 IBM 公司公開發表收集的數據中可明顯看出【20】，相同的製程在 2 lots 中所量測到的電子密度與碰撞頻率會有不規律的上下跳動狀態。



圖 5-19 SEERS 裝置在腔體側壁圖

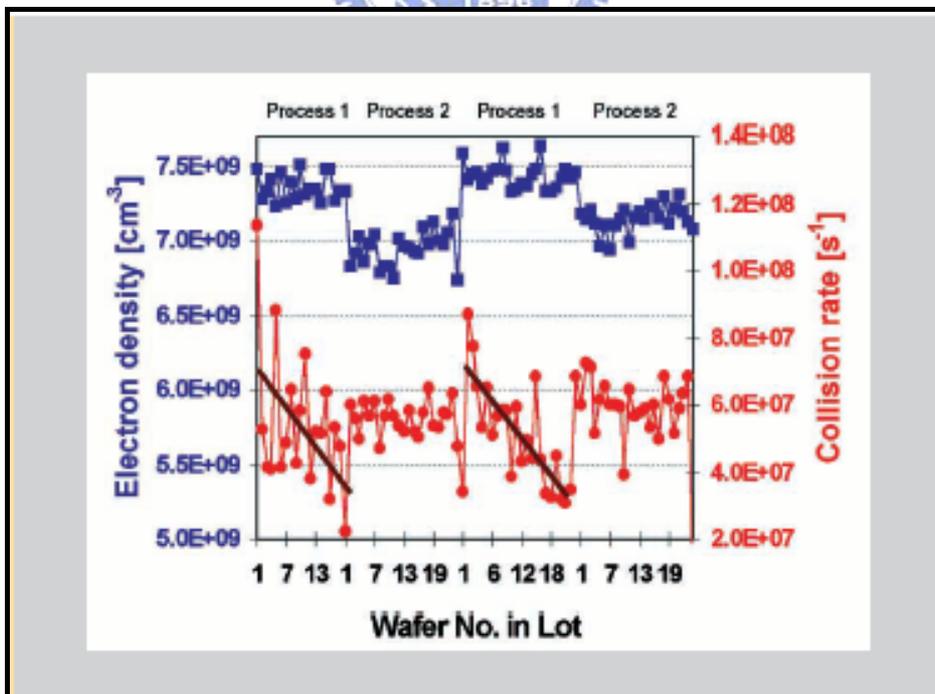


圖 5-20 IBM 公司所做相同製程 2 lots 的電子密度與碰撞頻率變化【20】

第六章 批次電漿蝕刻設備控制

6-1 前言

由於半導體業為了提高良率，近年來許多 RtR(Run to Run)控制器被廣泛的應用在許多半導體設備之上，而在眾多 RtR 控制器之中，使用指數加權移動平均法(Exponentially Weighted Moving Average)，簡稱 EWMA 運算法則，應用在修正預測製程的線性模式以及調整製程的控制模式上時，一般稱之為 EWMA 控制器。在 1959 年 Roberts 提出了 EWMA 管制圖後，EWMA 運算式便成為學者經常引用的公式，其基本定義如(6.1)所示：

$$z_t = \lambda x_t + (1-\lambda)z_{t-1} \dots\dots\dots (6.1)$$

其中 λ 為平滑常數(smoothing constant)，其範圍在 $0 < \lambda < 1$ ， x_t 為第 t 期的現值， z_t 則為過去 t 期之總加權值，可以看出當 λ 為 1 時，表示現在值完全不受過去所影響。在經過不斷的研究後顯示，EWMA 控制器已經可以被廣泛的運用在製程受到微小干擾時的抑制干擾控制上，對於製程雜訊(noise)與製程偏移(shift)能有效的控制，而為了補償 EWMA 控制器的不足，更有 Double EWMA、Adaptive EWMA 等控制器的產生。EWMA 主要的架構圖如圖 6-1 所示，屬於回饋控制的一種。

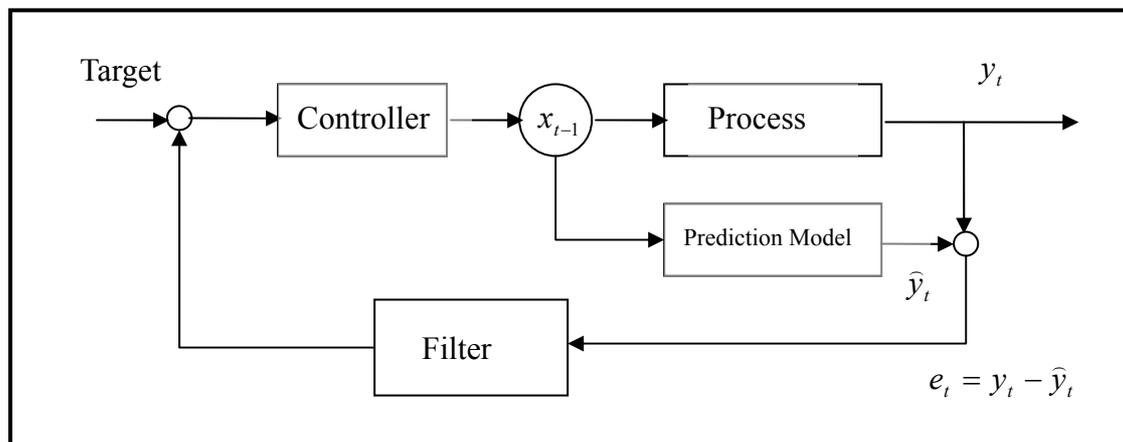


圖 6-1 EWMA 運算式控制架構圖

6-2 EWMA 控制法則

EWMA 運算法是依據其時間點與現今時間點的不同，對輸出值與目標值的差距，給予不同的權重，使權重呈現一種遞減的幾何分配，也就是對於距離現今時間點越近的資料給的權重越大，意即距離現今時間點越遠的資料，對現今數值的結果較不具有影響力。

EWMA 控制器架構如同圖 6-1 所示，是由一個一階線性預測模式(predictive model)、一個線性的過濾器(filter)、一個控制模式(controller model)與一個實際製程(Process)所構成，將 t-1 期的製程參數值(x_{t-1})輸入製程(process)中，可以由製程得知下一個時期的反應值(y_t)，同時以一個線性的預測公式作為預測製程動態的模式，可以得到預測值(\hat{y}_t)，之後將預測誤差(e_t)經過 EWMA 運算與加權的過程(filter)，再將所得的值與目標值(target)比較後，對控制器做調整，即可獲得下一個製程參數 x_t 。通常假設實際製程模型如(6.2)式所示：

$$y_t = \alpha + \beta u_{t-1} + \varepsilon_t \dots\dots\dots (6.2)$$

- y_t : 第t批次的輸出數值
- α : 製程模型的截距項
- β : 製程模型的斜率項
- u_{t-1} : 第t-1批次的輸入值
- ε_t : 第t批次的製程自然變異

至於 EWMA 的控制方法，為方便瞭解，將主要的步驟條列如下：

1. 決定預測模式(predictive model)

通常使用的是一個一階的方程式來當作預測模型，如(6.3)所示：

$$\hat{y}_t = a_{t-1} + bu_{t-1} \dots\dots\dots (6.3)$$

\hat{y}_t : 第t批次的預測輸出數值
 a_{t-1} : 第t-1批次的預測模型截距項
 b : 預測模型的斜率項
 u_{t-1} : 第t-1批次的輸入值

2. 誤差值的計算

每一批次的輸入完成之後，收集製程的輸出量測值，然後將之與預測值相互比較，計算出兩者之間的誤差值 e_t ，如(6.4)式所示：

$$e_t = y_t - \hat{y}_t \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

3. 調整預測模型的截距項

調整的方法如公式(6.5)所示，相同參數於(6.2)與(6.3)中有介紹過者，在此便不再贅述：

$$a_t = \lambda(y_t - bu_{t-1}) + (1 - \lambda)a_{t-1} \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

a_t : 第t批次的預測模型截距項
 λ : 預測權重值
 y_t : 第t批次的輸出值
 u_{t-1} : 第t-1批次的輸入值

先前提過 EWMA 運算法是對於現今時間點越接近的資料影響越大，在此式中便可以充分理解與瞭解。當 $\lambda = 0$ 時，表示不改變更截距項的估計值，也就是不對製程進行控制，而當 $\lambda = 1$ 時，即表示資料完全根據前一點的資料來更新截距項的估計值。總歸來說， λ 值越大表示截距的估計值將越依賴最近的資料，對於預測模型截距項所做的調整幅度也就越大，反之，若 λ 值越小，則截距項所調整的幅度便越小。因此 EWMA 對於越接近現今時間點的資料給予越大權重。為方便運算，將(6.5)式利用(6.4)式加以整理後，如(6.6)式所示：

$$\begin{aligned}
 a_t &= \lambda(y_t - bu_{t-1}) + (1 - \lambda)a_{t-1} = \lambda[y_t - (\hat{y}_t - a_{t-1})] + (1 - \lambda)a_{t-1} \quad \dots (6.6) \\
 &= \lambda(e_t + a_{t-1}) + (1 - \lambda)a_{t-1} = \lambda e_t + a_{t-1}
 \end{aligned}$$

從(6.6)式中可以看出每一批次的預測截距項其實可以透過每批次量測輸出值與預測輸出值的誤差來調整。

4. 找出新的預測截距值

每當估計出新的預測截距項大小值後，便可以得到一個新的預測模型，也就是一個新的 $\hat{y}_t = a_t + bu_{t-1} = \tilde{y}_t$ 。

5. 調整輸入值 u_t

由之前的步驟可以讓吾人有所依據來調整下一批次的製程輸入值 u_t ，使製程的輸出值達到所要求的目標值，調整的方法如(6.7)式所示，使 $\tilde{y}_t = T$ ，其中 T 為 target 值：

$$u_t = \frac{T - a_t}{b} \dots\dots\dots (6.7)$$

經過每批次不斷的重複步驟 1. ~ 5.，此即為 EWMA 控制方法，一般常見的流程圖如圖 6-2 所示。

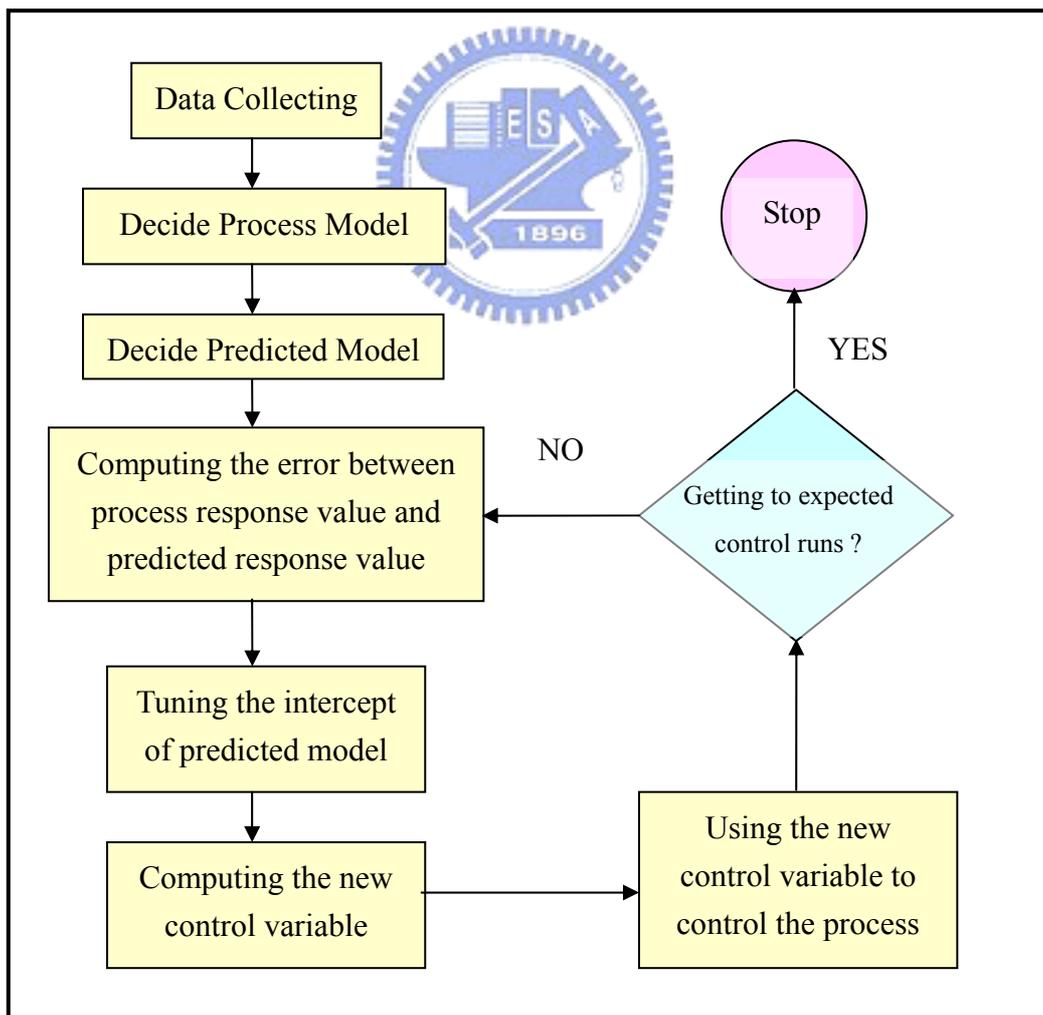


圖 6-2 EWMA 控制法流程圖

6-3 DEWMA 控制法則

雖然 EWMA 控制器已被證實是很有趣的一種控制器，但是由於 EWMA 控制器所控制過的製程平均值與目標值存在一個固定的差距，意即 EWMA 控制器無法將製程調整到所設定的目標值上，為了解決這個問題，後續的學者提出了一個雙循環的 EWMA 控制式，也就是所謂的 DEWMA(Double Exponentially Weighted Moving Average)控制法，此種控制方法不同於 EWMA 只估計截距項，它同時估計了預測模型的截距項和趨勢項，使控制的結果更加接近所欲達到的目標值。

至於 DEWMA 的控制方法，主要的步驟條列如下：

1. 決定同時考慮趨勢項與截距項的預測模型

相關的方程式設計如(6.8)所示：

$$\hat{y}_t = a_{t-1} + bu_{t-1} + D_{t-1} \dots\dots\dots (6.8)$$

- \hat{y}_t : 第t批次的預測輸出數值
- a_{t-1} : 第t-1批次的預測模型截距項
- b : 預測模型的斜率項
- u_{t-1} : 第t-1批次的輸入值
- D_{t-1} : 第t-1批次的預測模型趨勢項

2. 誤差值的計算

每一批次的輸入完成之後，收集製程的輸出量測值，然後將之與預測值相互比較，計算出兩者之間的誤差值 e_t ，如(6.9)式所示：

$$e_t = y_t - \hat{y}_t \dots\dots\dots (6.9)$$

3. 調整預測模型的截距項與趨勢項

調整的主要方法如公式(6.10)、(6.11)所示， λ_1 與 λ_2 皆為預測的權重值。

$$a_t = \lambda_1(y_t - bu_{t-1}) + (1 - \lambda_1)a_{t-1} \dots\dots\dots (6.10)$$

$$D_t = \lambda_2(y_t - bu_{t-1} - a_{t-1}) + (1 - \lambda_2)D_{t-1} \dots\dots\dots (6.11)$$

將(6.10)、(6.11)式利用(6.9)式加以整理後，如(6.12)、(6.13)式所示：

$$a_t = \lambda_1[y_t - (\hat{y} - a_{t-1} - D_{t-1})] + (1 - \lambda_1)(a_{t-1} + D_{t-1}) = \lambda_1 e_t + a_{t-1} + D_{t-1} \quad \cdots \quad (6.12)$$

$$D_t = \lambda_2[y_t - (\hat{y} - D_{t-1})] + (1 - \lambda_2)D_{t-1} = \lambda_2 e_t + D_{t-1} \cdots \cdots \cdots (6.13)$$

同樣的，從(6.12)、(6.13)式中可知，每一批次的預測截距項與趨勢項均可以透過每批次量測輸出值與預測輸出值的誤差來調整。

4. 找出新的預測截距值與預測趨勢值

每當估計出新的預測截距項與趨勢項大小值後，便可以得到一個新的預測模型，也就是一個新的 $\hat{y}_t = a_t + bu_{t-1} + D_{t-1} = \tilde{y}_t$ 。

5. 調整輸入值 u_t

調整下一批次的製程輸入值 u_t ，調整的方法如(6.14)式所示，使 $\tilde{y}_t = T$ ， T 為 target 值：

$$u_t = \frac{T - a_t - D_t}{b} \cdots \cdots \cdots (6.14)$$

經過每批次不斷的重複步驟 1.~5.，此即為 DEWMA 控制方法，流程圖如圖 6-3 所示。

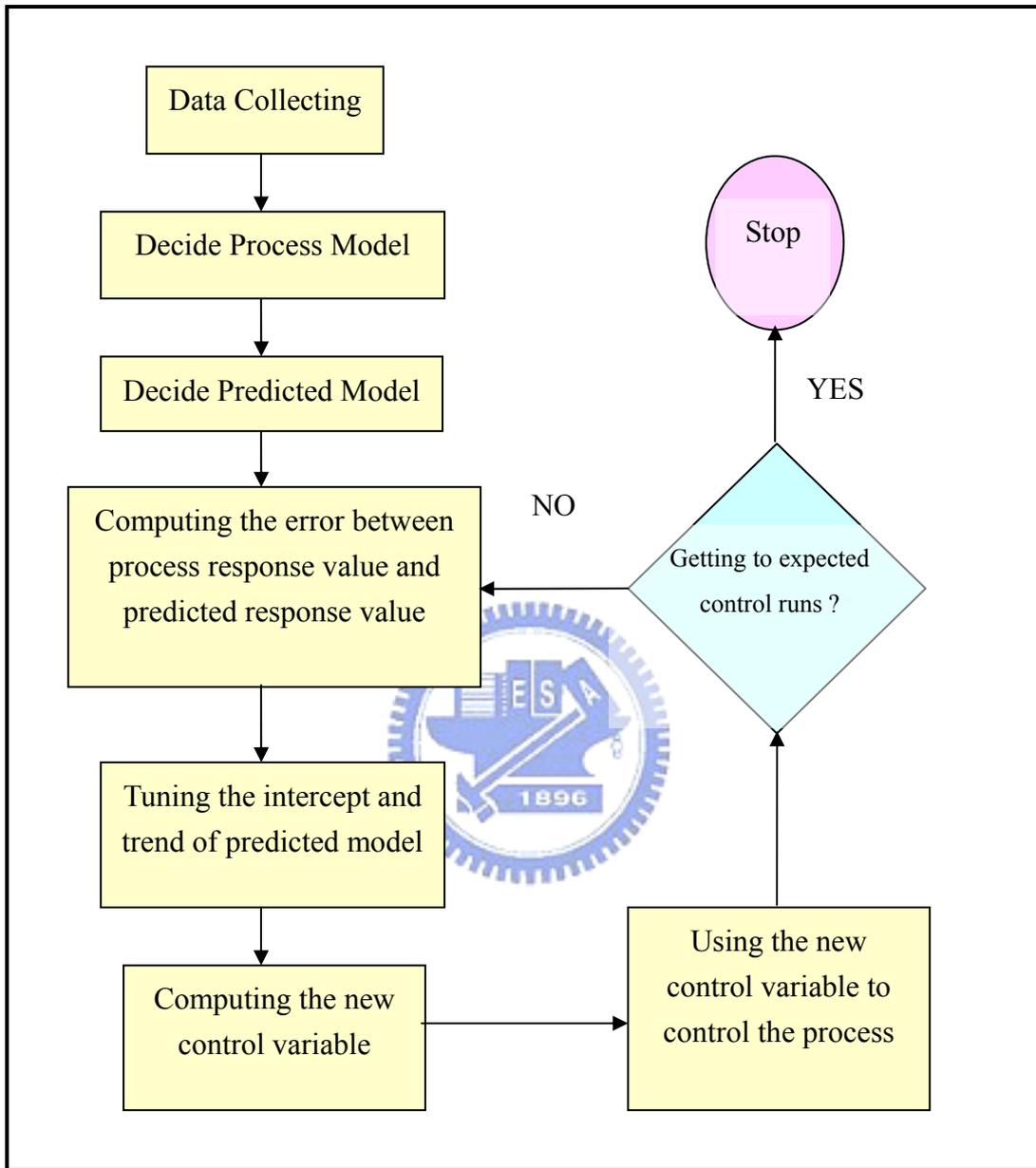


圖 6-3 DEWMA 控制法流程圖

6-4 Adaptive EWMA 控制法則

由於EWMA控制器在控制自我相關性較大之製程時仍然有不足之處，而且傳統的EWMA控制器中所選擇的權重值 λ (又稱折扣因子)通常考慮為一個固定的常數，很難兼顧到減少製程初始偏差與製程輸出值之變異數。因此，在西元2000年的時候，Patel and Jenkins【15】曾針對EWMA控制器提出一個連續調整權重值 λ 的方法，也就是所謂的Adaptive EWMA控制法，論文中並提及在系統增益值(system gain)已知的情形之下，如何以其所提出的連續調整權重值的方式，提高傳統EWMA控制法的控制品質。

至於 Adaptive DEWMA 的控制方法，主要的步驟條列如下：

1. 決定預測模型

此一模型和一般 EWMA 預測模型一樣，如(6.15)所示：

$$\hat{y}_t = a_{t-1} + bu_{t-1} \dots\dots\dots (6.15)$$

- \hat{y}_t : 第t批次的預測輸出數值
- a_{t-1} : 第t-1批次的預測模型截距項
- b : 預測模型的斜率項
- u_{t-1} : 第t-1批次的輸入值

2. 誤差值的計算

每一批次的輸入完成之後，收集製程的輸出量測值，然後將之與目標值T相互比較，計算出兩者之間的誤差值 e_{t-1} ，如(6.16)式所示：

$$e_{t-1} = y_{t-1} - T \dots\dots\dots (6.16)$$

3. 調整 EWMA 控制器所選擇的權重值 λ

利用論文中的方法，整理如公式(6.17)、(6.18)、(6.19)所示：

$$\mu_t = \mu_{t-1} + \varepsilon_{t-1}(y_t - \mu_{t-1}) \quad \dots\dots\dots (6.17)$$

$$\xi_t = \xi_{t-1} + \varepsilon_{t-1}(y_t^2 - \xi_{t-1}) \quad \dots\dots\dots (6.18)$$

$$\lambda_t = \frac{\delta^2 + 4\mu_t^2}{\delta + \mu_t^2 + \xi_t} \quad \dots\dots\dots (6.19)$$

上式中的 δ 、 ε_{t-1} 均為參數值，且必須滿足 $0 < \delta < 1$; $0 \leq \varepsilon_{t-1} < 1$ 這兩個關係，再者， μ_{t-1} 、 ξ_{t-1} 為第 $t-1$ 期為求得 EWMA 控制器之權重值所需的參數值，至於 λ_{t-1} 乃是第 $t-1$ 期 EWMA 控制器所選擇的權重值。

4. 調整輸入值 u_t

經上素步驟，得到新的權重值後，依據此權重值以及量測值與目標值 T 之間的誤差來調整每一批次的製程輸入值大 u_t ，調整大小的方法如(6.20)式所示，同時調整截距項 a 值大小，方法如(6.21)， T 為 target 值：

$$u_t = u_{t-1} - \frac{\lambda_t}{b} e_t \quad \dots\dots\dots (6.20)$$

$$a_t = \lambda_t(y_t - bu_{t-1}) + (1 - \lambda_t)a_{t-1} \quad \dots\dots\dots (6.21)$$

將獲得的輸入值用來控制製程，使控制後的製程輸出能更加接近目標值，經過每批次不斷的重複步驟 1. ~ 4.，此即為 Adaptive EWMA 控制法，控制流程圖如圖 6-4 所示。

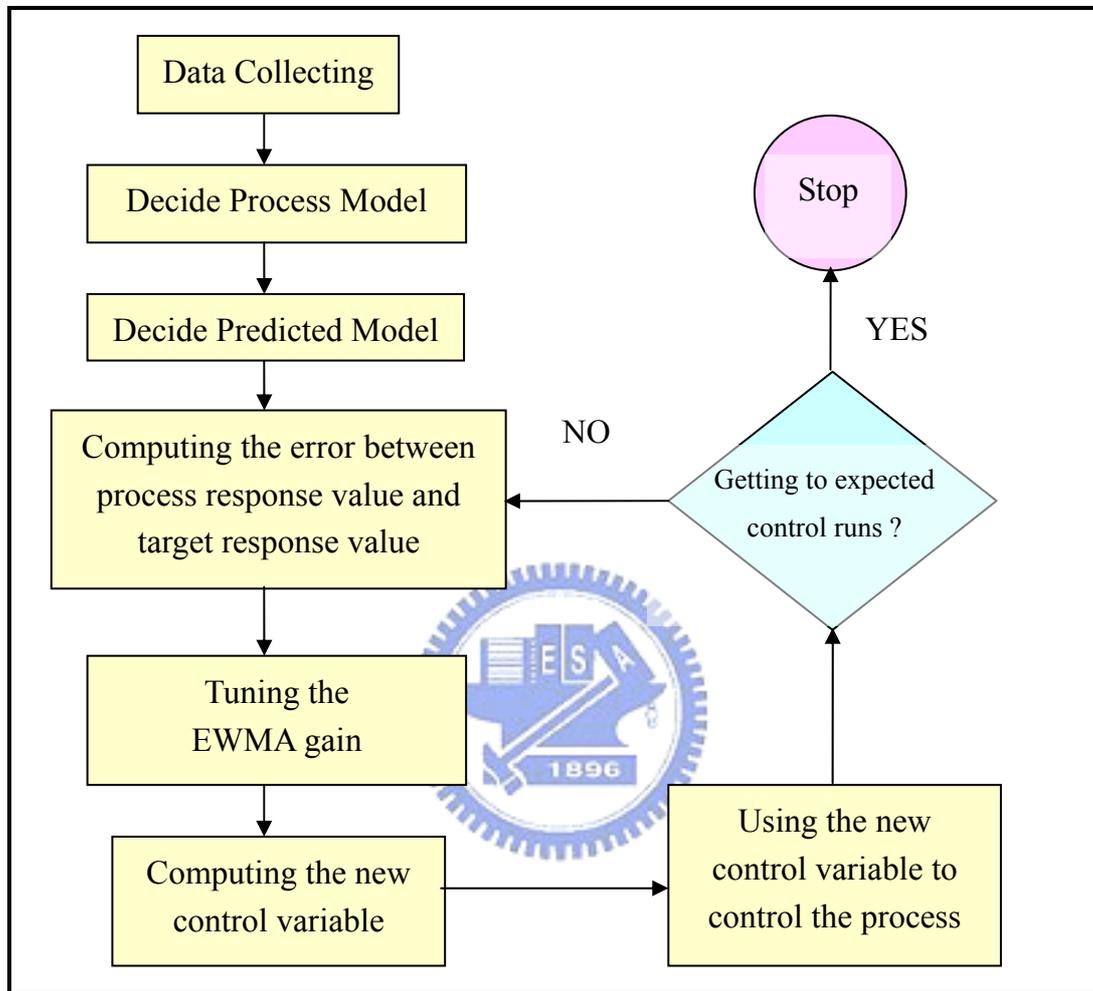


圖 6-4 Adaptive EWMA 控制法流程圖

第七章 電漿蝕刻設備控制之模擬與討論

7-1 前言

電漿蝕刻系統，經過相關的物理分析之後，可以瞭解當電子密度越高時電漿中粒子的碰撞頻率越高，相對的也會使蝕刻率增加，簡單說就是電漿蝕刻率與電漿中的電子密度大小有正相關的關係，也就是說，電子密度的分佈與大小將直接影響電漿的蝕刻率，因此，為了有效控制電漿的蝕刻率，就必須從電子密度這方面開始著手，本章將利用上一章所介紹的 EWMA 運算方法，來對電子密度作相關的控制分析與討論。

由上一章中可以瞭解到 EWMA 控制法需要一個製程模型(process model)來進行控制，在此吾人利用所建立的電漿模型來當作此一模型的資料收集對象，藉由模型的數據收集，再利用線性回歸的方式(見附錄)，取得相關的方程式，在輸入為腔體壓力，輸出為電子密度時，得出的方程式如(7.1)所示，而輸入為輸入功率，輸出為電子密度的方程式如(7.2)：

$$y = 3 \times 10^{11} x^3 - 2 \times 10^{13} x^2 + 4 \times 10^{14} x + 7 \times 10^{15} + N \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

$$y = 4 \times 10^{11} x_1 + 9.2382 \times 10^{15} + N \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

其中 y 代表輸出的電子密度大小，x 代表輸入的壓力大小， x_1 代表輸入功率，而 N 代表的是一個介於 $0.25 \times 10^{15} \sim 0.025 \times 10^{15}$ 大小之間隨機的變數，變數大小為目標的 3.125% ~ 0.3125%，取此區間乃是參考圖 5-20 中電子密度跳動上下誤差值而來，用此模擬外在可能存在的干擾，可以讓此方程式更加趨於現實，至於控制的準確度設定值為誤差小於 0.1%。此兩系統均是 SISO(single input single output)的系統。

7-2 EWMA 控制的結果與討論

由在上一章對 EWMA 的介紹可知，預測模型的公式為 $\hat{y}_t = a_{t-1} + bu_{t-1}$ ，初始的設定 $a = 10^{12}$; $b = 0.1115 \times 10^{15}$ ，在不加 EWMA 控制器前，製程模型輸入腔體壓力大小為 6mTorr 時電子密度如圖 7-1 所示，仿照圖 5-20 加上干擾，使其變動率約在 0.25×10^{15} 間，同樣的變動也加入在(7.2)中。

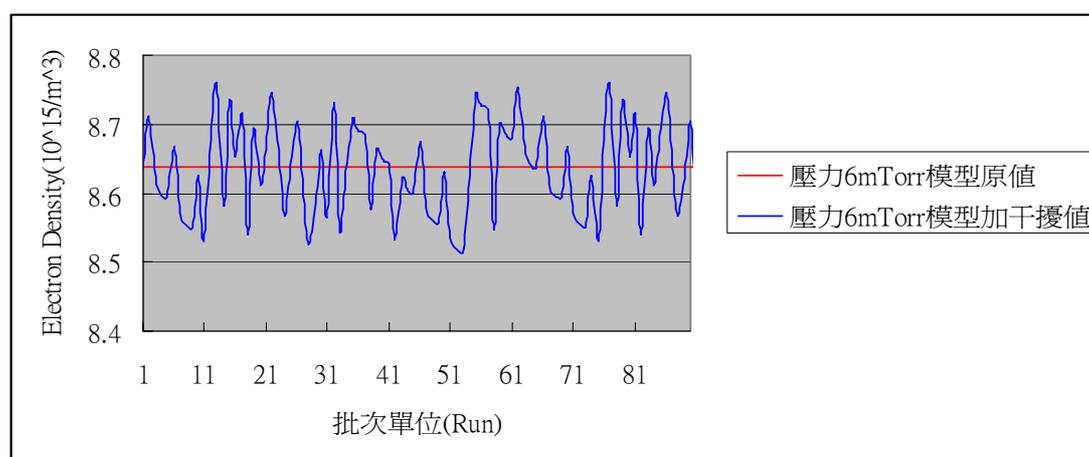


圖 7-1 製程模型未受控制之電子密度分佈

7-2.1 控制腔體壓力部分

首先，在權重值均為 0.5 時，若改變 b 值，可以看出預測模型的斜率項對系統達到穩定的影響，但是由於影響不大，故將其放在一起討論，如圖 7-2 所示。經模擬發現 b 值增加到 0.2 後再不斷增加時，變化不大，不僅將 b=0.2 圖形畫出，再由圖形中可知，原設定 b=0.1115 時系統表現的不錯，因此以下 EWMA 的模擬均以 b=0.1115 作為預設值，而為了使不同的控制器可以在相同的基礎下互相比較，在 DEWMA、AEWMA 控制器中均定 b 值為 0.1115。

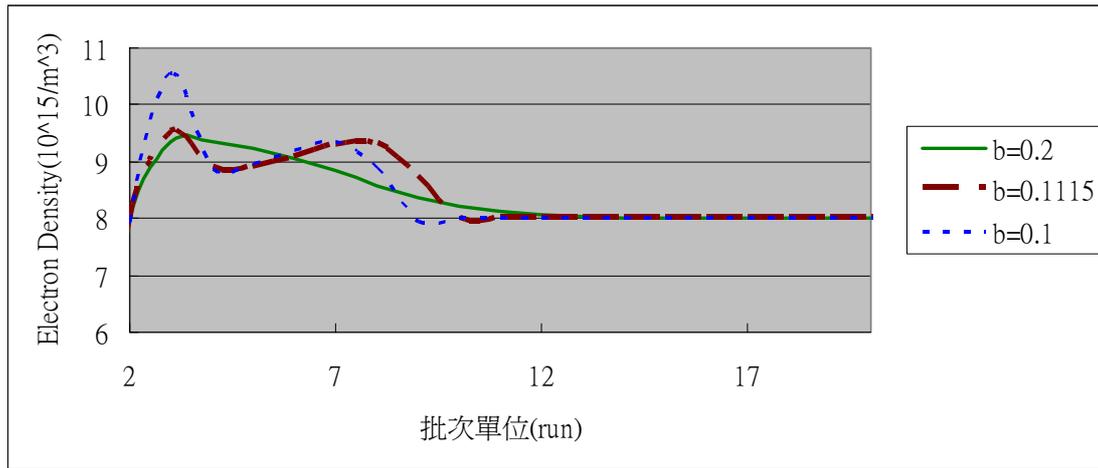


圖 7-2 改變預測模型斜率項之影響

接著，便開始改變輸入的權重值，藉此來觀看不同權值對 EWMA 控制器的控制效果有何影響，在此由小到大來調整權重值，當 $\lambda=0.2$ 、 0.5 、 0.7 、 0.9 時，模擬出的結果依序如圖 7-3 至圖 7-6 所示。從圖形中可以看出，權重值增加雖可以減少 overshoot，也就是電子密度一開始的跳動情形，從圖 7-3 的 overshoot 超過目標值很多到圖 7-6 的 overshoot 僅超出目標值較少，可以看出增加權重值可以改善電子密度的 overshoot，但隨著權重增加到 0.9 ，可發現達到穩定目標值的附近時，系統呈現波動般的跳動，而無法達到穩定的目標值。

由此吾人可以瞭解，在控制腔體壓力時，EWMA 控制器可將原本無法穩定的電子密度控制到所需的目標電子密度上，然而就先前的模擬結果中可以發現，調整權重到最快穩定時如圖 7-4 時，由開始到穩定大約需要 10 個批次，且初始的 overshoot 不會過大，成功的達到了控制的目的，證明 EWMA 控制器可以利用在控制電漿電子密度上。

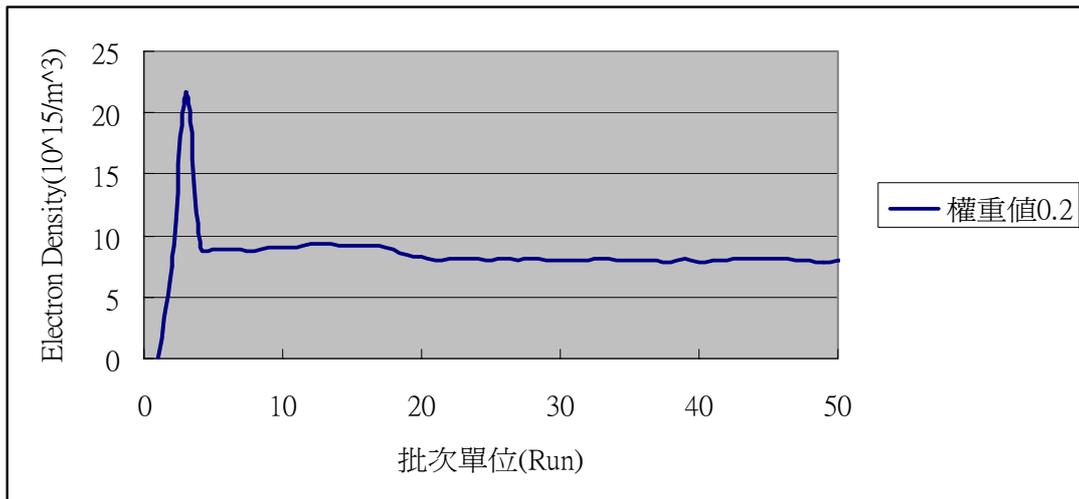


圖 7-3 權重值 0.2 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)

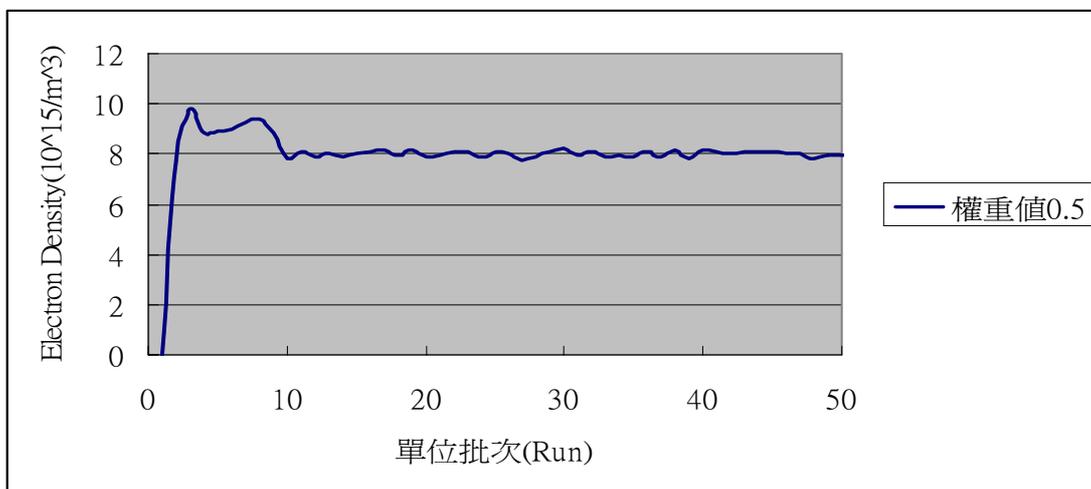


圖 7-4 權重值 0.5 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)

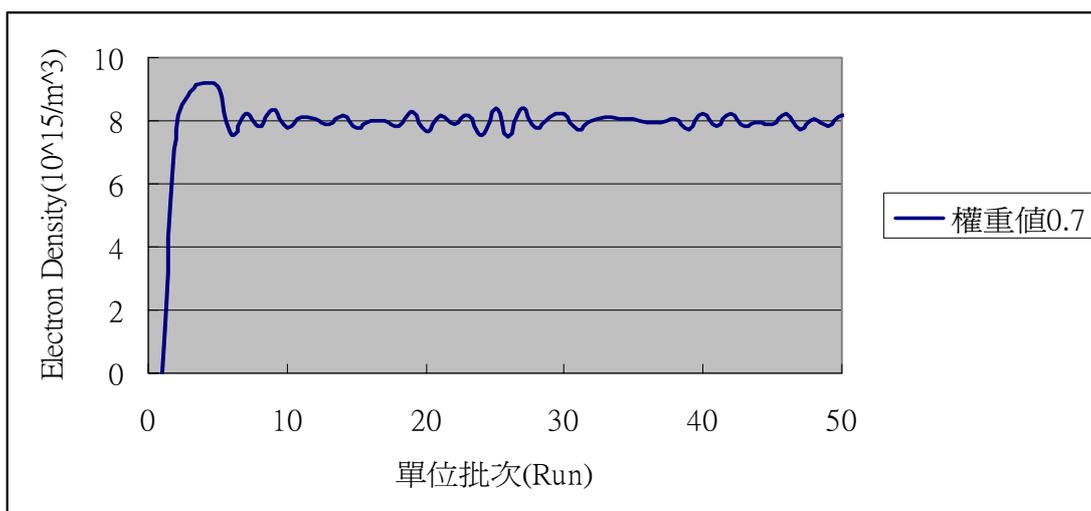


圖 7-5 權重值 0.7 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)

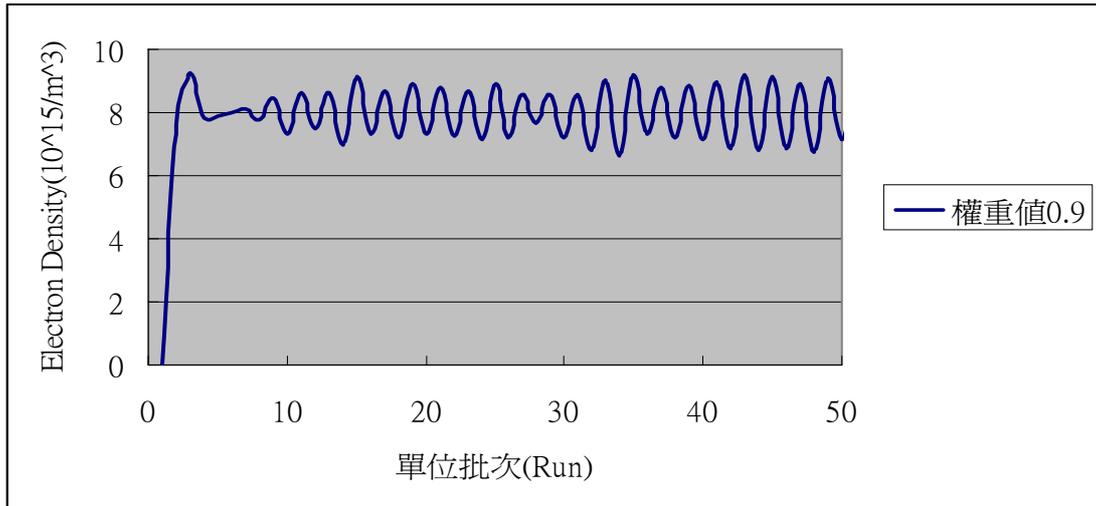


圖 7-6 權重值 0.9 之 EWMA 控制情形(改變腔體壓力)

7-2.2 控制輸入功率部分

同樣的，改變輸入的權重值，來觀看不同權值對 EWMA 控制器的控制效果有何影響，由小到大來調整權重值，當 $\lambda=0.5$ 、 0.7 、 0.9 時，模擬出的結果依序如圖 7-7 至圖 7-9 所示。



從圖形中可以看出，權重值增加可以同時減少 overshoot 以及穩定的時間，也就是電子密度一開始的跳動情形。探討此一部分可以得知，當製程模型與預測模型均為線性的方程式時，過去的數值對下一批次來說是可以依靠的，因此，當調大權重值後，會得到很好的控制效果，由圖形相互比較可以發現，在權重 0.9 時，最快約只要七個批次單位就可以達到穩定。

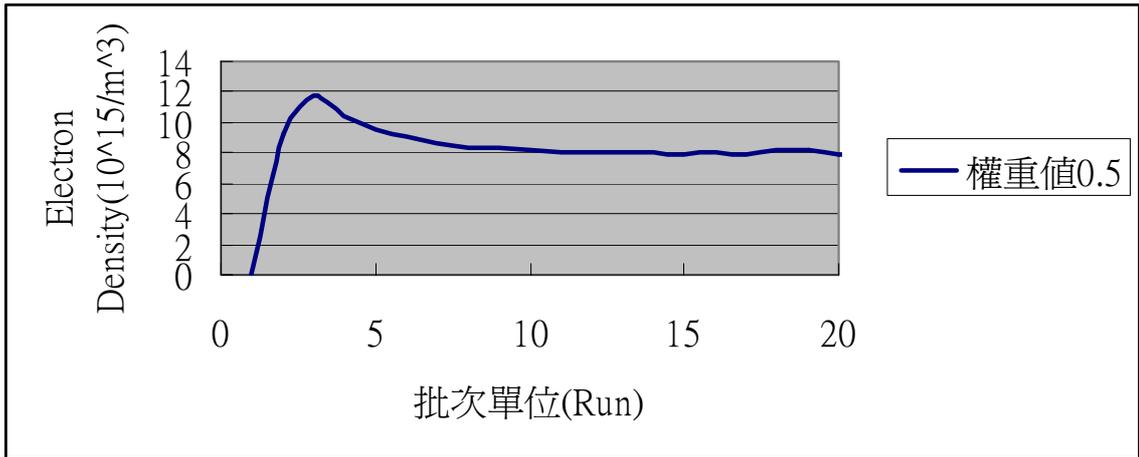


圖 7-7 權重值 0.5 之 EWMA 控制情形(改變輸入功率)

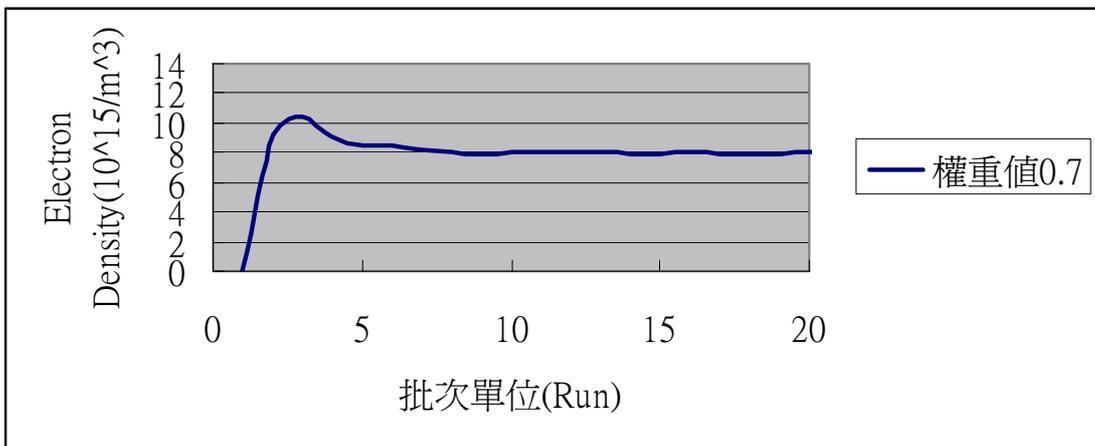


圖 7-8 權重值 0.7 之 EWMA 控制情形(改變輸入功率)

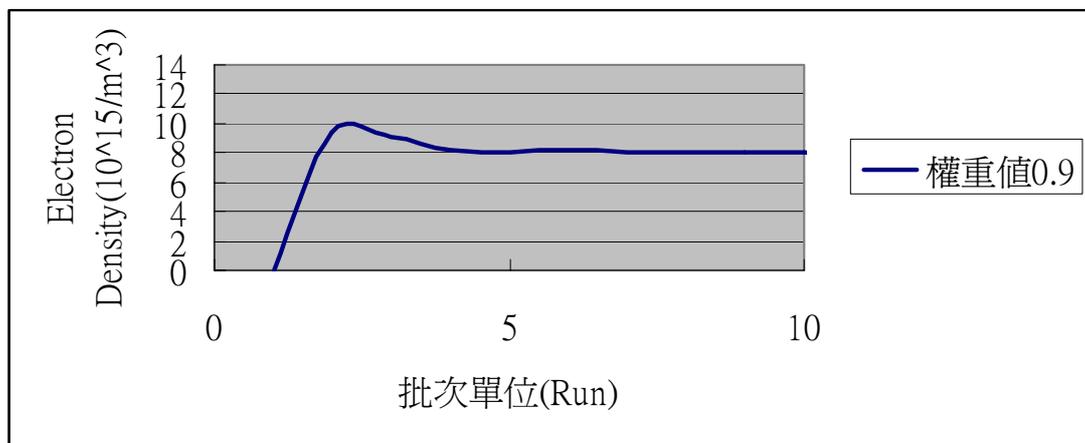


圖 7-9 權重值 0.9 之 EWMA 控制情形(改變輸入功率)

7-3 DEWMA 控制的結果與討論

雖然 EWMA 控制器已經可以達成控制的目標，但為了找出更好的控制器，因此便再模擬 DEWMA 控制器的結果來做比較。由上一章可知，DEWMA 控制器的預測方程式為 $\hat{y}_t = a_{t-1} + bu_{t-1} + D_{t-1}$ ，擁有兩個權重值來分別影響截距項(a)值與趨勢項(D)值，以下便在 $b=0.1115$ (上一節中已有說明)之下更改不同權重來模擬討論之。

7-3.1 控制腔體壓力的部分

在截距項權重值比趨勢項權重值($\lambda_1 : \lambda_2$)為 0.2:0.2 時，如圖 7-10 所示，在經過多次模擬後，發現當把比值由 0.2:0.2 更改至 0.2:0.3、0.2:0.5，其所形成的圖形均無多大變化，均如圖 7-10 所示。再經過模擬後發現， $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.3:0.2$ 時如圖 7-11 所示，同樣改其趨勢項的權重後發現圖形變化也不大，同樣的情形也發生在 $\lambda_1 = 0.4$ 時，其圖形均類似 $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.4:0.2$ ，如圖 7-12 所示。因此吾人可以發現，在 DEWMA 控制器下，趨勢項的權重大小 λ_2 對系統影響不大，截距項的權重大小 λ_1 對系統影響比較大。

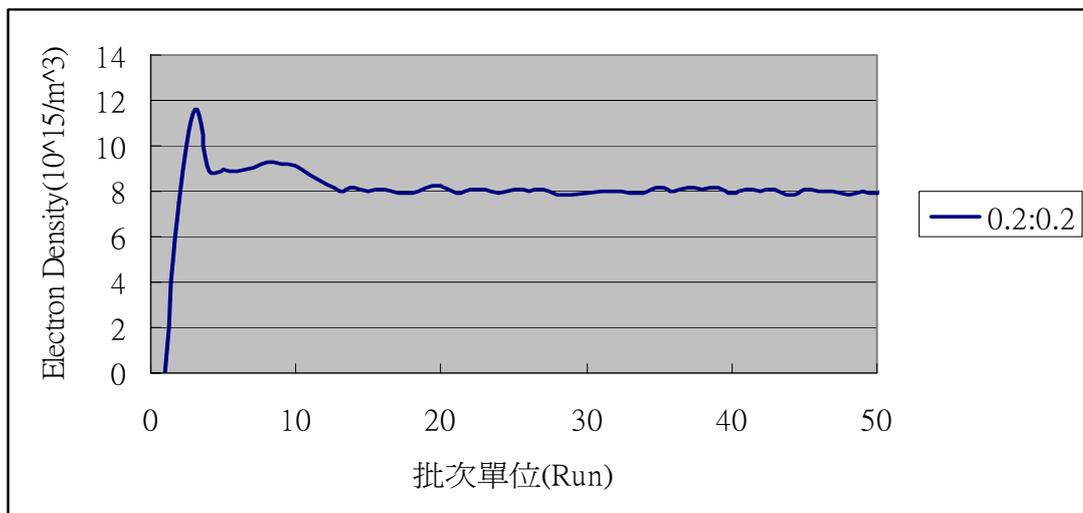


圖 7-10 $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.2:0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

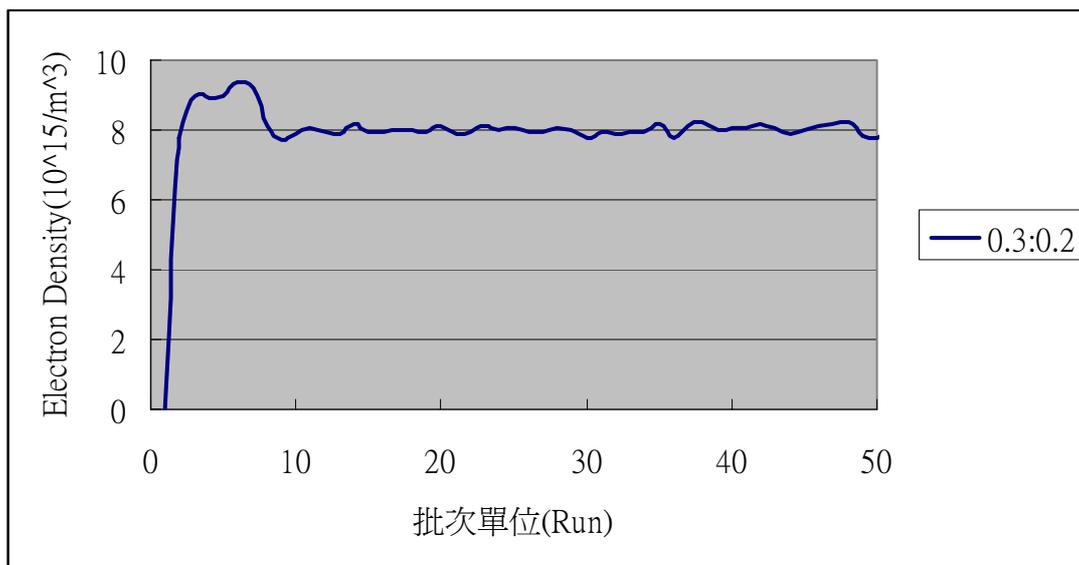


圖 7-11 $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.3 : 0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

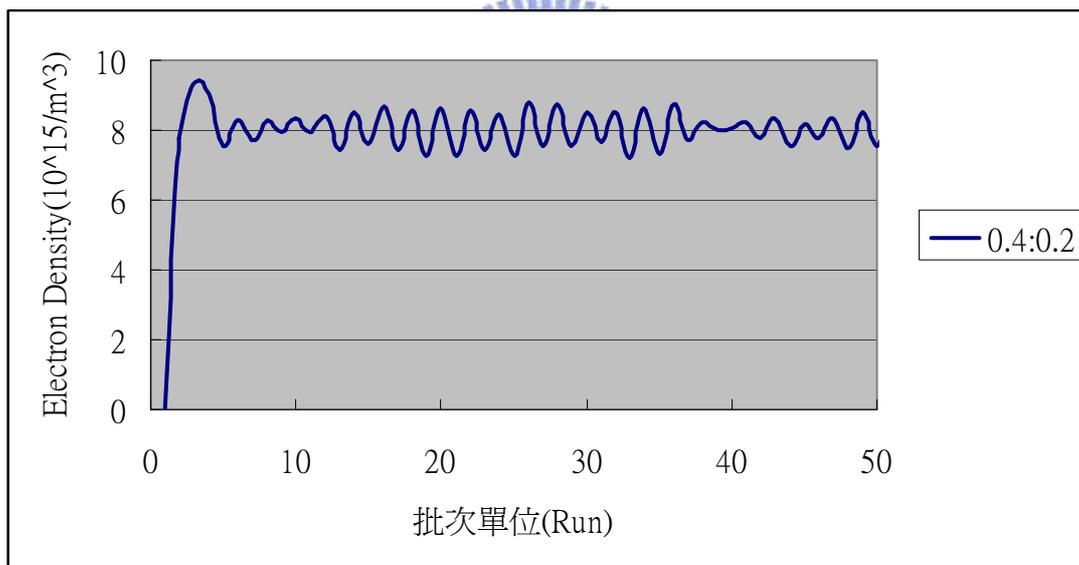


圖 7-12 $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.4 : 0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

不過可以明顯發現的是，不論權重大小多少，DEWMA 的 overshoot 比 EWMA 來的小，但達到穩定的目標電子密度所需的批次單位仍然需要大約 10 個單位，和 EWMA 控制器的結果差不多，所以基本上 DEWMA 對於控制壓力改善電子密度的方面並沒有必要捨棄 EWMA 控制器來使用它。

7-3.2 控制輸入功率的部分

同樣的，比較截距項權重值比趨勢項權重值($\lambda_1:\lambda_2$)為 0.2:0.2 時，如圖 7-13 所示，在經過多次模擬後，發現當把比值由 0.2:0.2 更改至 0.2:0.4、0.2:0.6，圖形上並無多大變化，僅有稍微的改善穩定的時間，比較圖 7-4 所示，因此，在線性的系統中 DEWMA 控制器趨勢項的權重大小 λ_2 同樣的對系統影響不大。

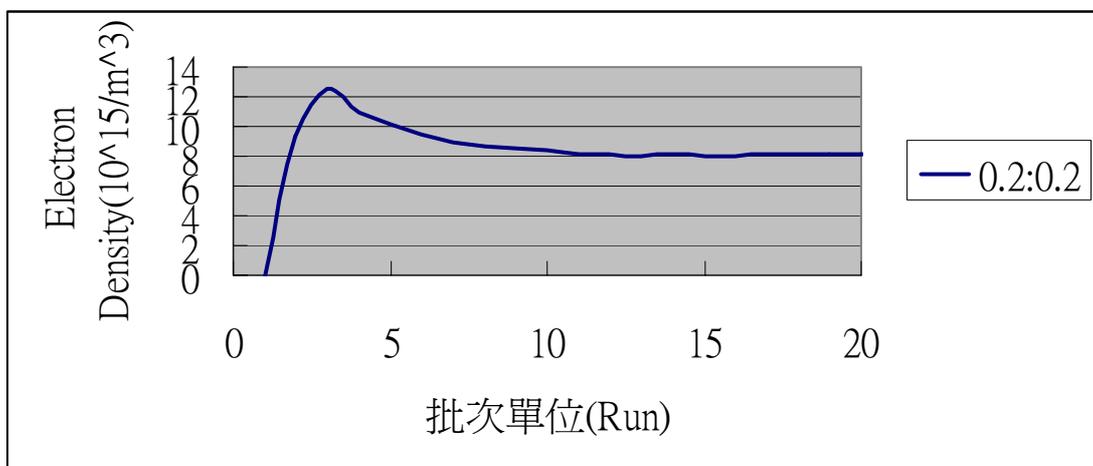


圖 7-13 $\lambda_1:\lambda_2=0.2:0.2$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)

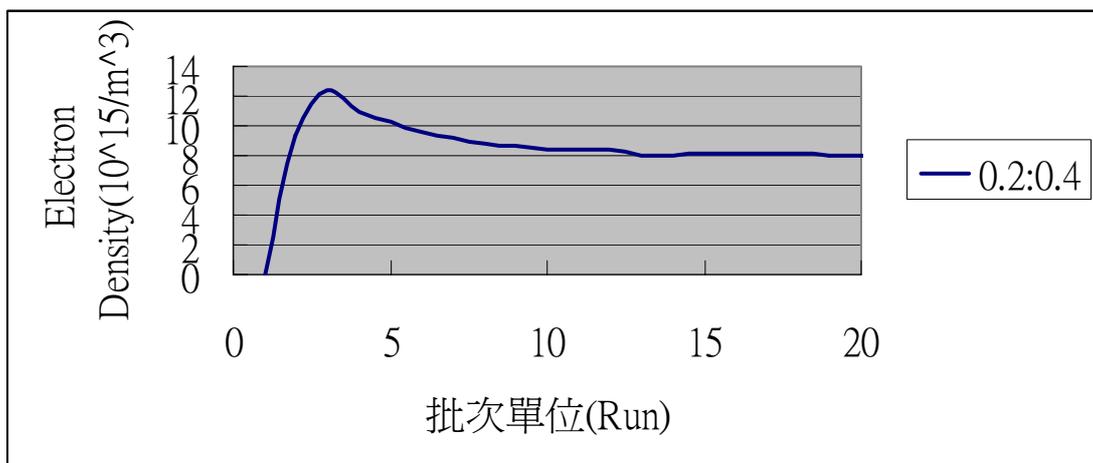


圖 7-14 $\lambda_1:\lambda_2=0.2:0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)

接著，觀察改變權重 λ_1 大小，如圖 7-15 至圖 7-17 所示，此三圖依序分別代表的是 $\lambda_1:\lambda_2=0.4:0.4$ 、 $0.6:0.4$ 、 $0.9:0.4$ 。從比較中可以發現，在同是線性系統時，權重值增加也和 EWMA 一樣，overshoot 與穩定時間均會減少，但是在 λ_1 超過 0.6 後，反而會增加穩定所需時間，且在達成穩定之前，上下震盪的情形會很明顯，探討此部分可以發現，不論截距項與趨勢項，在實際上均只影響到方程式的大小值，可以說趨勢項乃是由截距項所分出的一小部份，所以趨勢項與截距項間有一定的比例關係存在，趨勢項權重值越大，所能接受的截距項權重值就越大，但是不同於 EWMA 權重值 (λ_1) 越大越好，趨勢項的權重值 (λ_2) 和截距項的權重值 (λ_1) 需要進行最佳化運算。

比較 EWMA 與 DEWMA 兩個控制器，在觀察後發現，在控制輸入為輸入功率時，DEWMA 的 overshoot 也比 EWMA 來的小，且達到穩定的目標電子密度所需的批次單位僅需要大約五個批次單位，和 EWMA 控制器的結果相比穩定數度較快，所以可以發現當製程模型與預測模型均為線性方程式時，基本上 DEWMA 對於控制輸入功率改善電子密度的方面比 EWMA 控制器來的好。

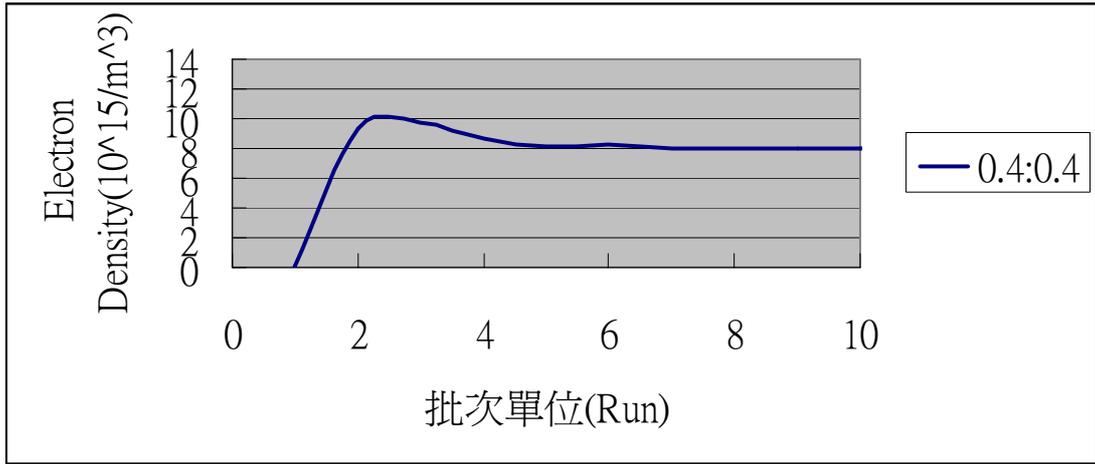


圖 7-15 $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.4 : 0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)

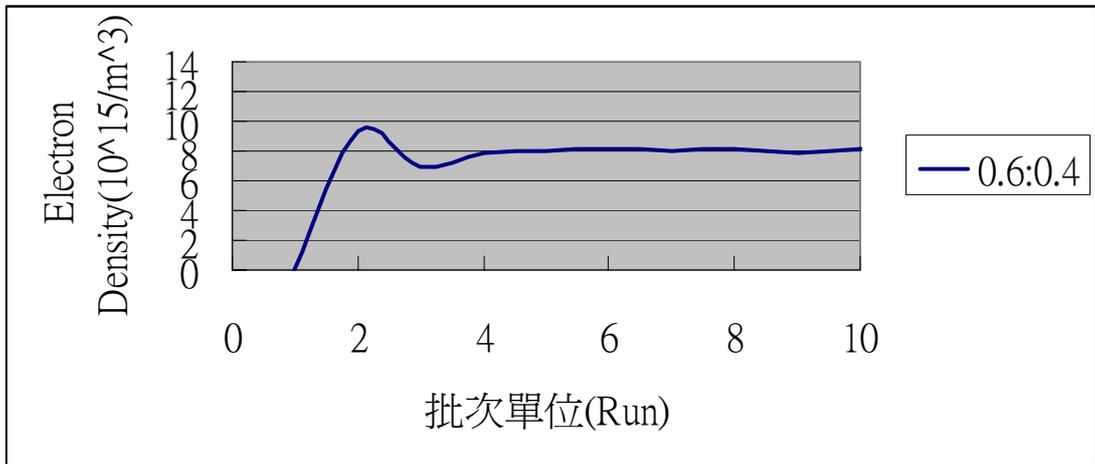


圖 7-16 $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.6 : 0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)

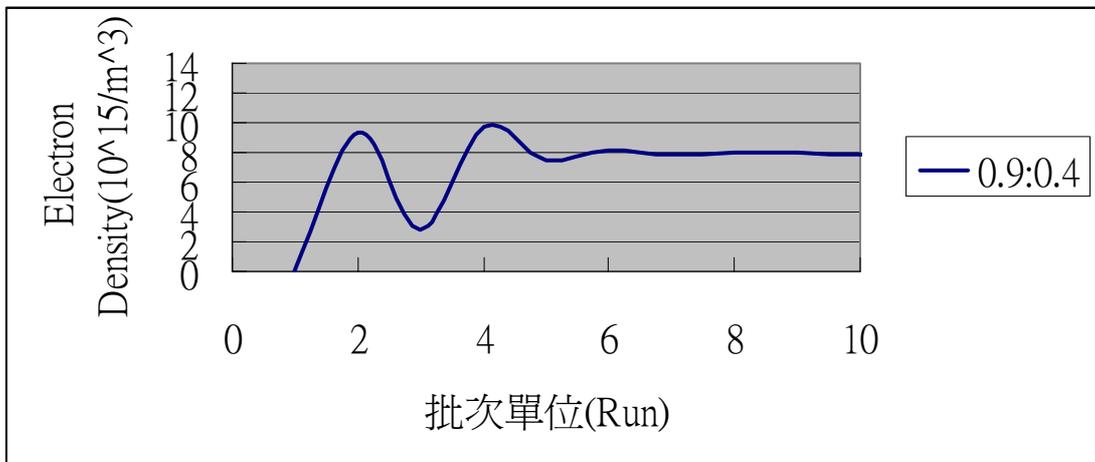


圖 7-17 $\lambda_1 : \lambda_2 = 0.9 : 0.4$ 時 DEWMA 控制情形(改變輸入功率)

7-4 Adaptive EWMA 控制的結果與討論

如同上一章中所介紹，在有干擾的情況下利用 AEWMA 控制法來觀察控制結果，其中設定 μ_0 、 ξ_0 初始值為 0.4，此初始值稍微會影響控制過程中一開始系統初始的 overshoot 的最大最小值，不過由於影響不大，如圖 7-18 所示，故暫時選擇定為 0.4。

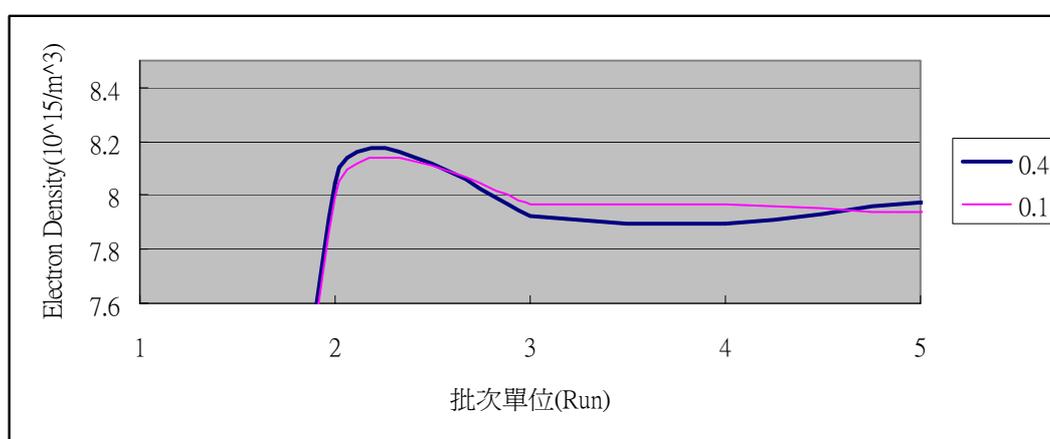


圖 7-18 μ_0 、 ξ_0 初始值對 AEWMA 控制影響情形

7-4.1 控制腔體壓力的部分

由於在此控制器下權重值會自己調整，因此接下來調整重點便是調整 δ 、 ε_{t-1} 這兩個參數值。由於設定上必須滿足 $0 < \delta < 1$; $0 \leq \varepsilon_{t-1} < 1$ 這兩個關係，所以模擬開始時設定 $\delta = 0.1$ 而 $\varepsilon_{t-1} = 0.1$ 來計算，發現當預測模型斜率項 $b=0.1115$ 時，圖形如圖 7-19 所示，可以迅速的達到目標值，明顯可以看出到達穩定時需要的批次單位比 EWMA 和 DEWMA 要多很多。

由於 δ 、 ε_{t-1} 為可調整的係數，欲探討 δ 、 ε_{t-1} 兩者大小值對控制效果影響的關係，依序由 $\delta:\varepsilon_{t-1} = 0.01:0.01$ 、 $0.15:0.15$ 、 $0.3:0.3$ 的調整模式觀察。可以得

到圖 7-20 至圖 7-22，將之與圖 7-19 做比較，可以發現同時將 $\delta:\varepsilon_{t-1}$ 比值增大，將從漸漸穩定轉變成漸漸發散。

再觀察圖 7-23($\delta:\varepsilon_{t-1}=0.5:0.1$)與圖 7-24($\delta:\varepsilon_{t-1}=0.9:0.1$)可以看出，增加 δ 值會減少達到平衡時變動的大小值，但不會影響達到穩定的速度。再利用先前的圖表後，考慮圖 7-25($\delta:\varepsilon_{t-1}=0.01:0.05$)、圖 7-26($\delta:\varepsilon_{t-1}=0.1:0.2$)、圖 7-27($\delta:\varepsilon_{t-1}=0.15:0.01$)的分佈情形，吾人便可整理出 AEWMA 控制器中 δ 、 ε_{t-1} 兩者大小值對於系統的影響表，如表 7-1 所示，在設計 AEWMA 控制器時可以參考此一關係進行參數的設定。

總歸整理來說， δ 值是越小越好，而 ε_{t-1} 值不能超過 0.3，否則會造成發散，而 ε_{t-1} 大小對控制的影響為一曲線，在本論文控制設定下 $\varepsilon_{t-1}=0.1$ 效果最好，所以在使用 AEWMA 法時，還是必須找尋適當的 δ 、 ε_{t-1} 大小值才能達到最好的控制效能。



表 7-1 δ 、 ε_{t-1} 對電漿電子密度步階響應的影響(改變腔體壓力)

	Overshoot(%)	穩定所需時間	抑制干擾效果
固定 $\delta=0.1$ 、 ε_{t-1} 增加	增加	增加	減少
固定 $\varepsilon_{t-1}=0.1$ 、 δ 增加	不變	增加	減少
固定 $\delta=0.01$ 、 ε_{t-1} 增加	減少	減少	增加
固定 $\varepsilon_{t-1}=0.01$ 、 δ 增加	增加	減少	增加
ε_{t-1} 、 δ 同時增加	均為 0.1 時最少	均為 0.1 時最少	均為 0.1 最好

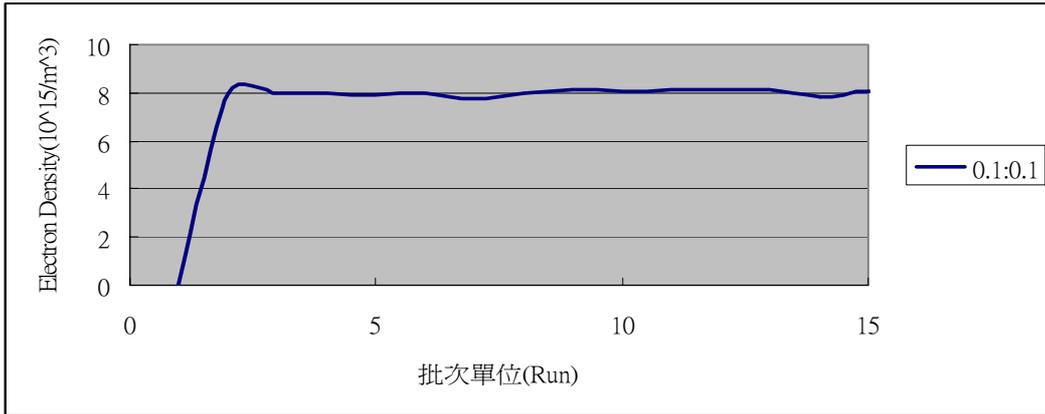


圖 7-19 $\delta:\epsilon_{t-1} = 0.1:0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

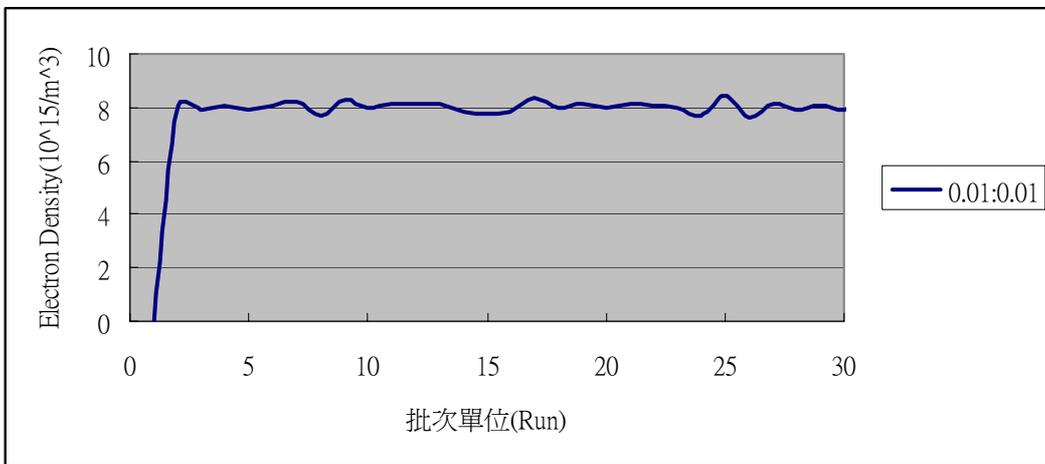


圖 7-20 當 $\delta:\epsilon_{t-1} = 0.01:0.01$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

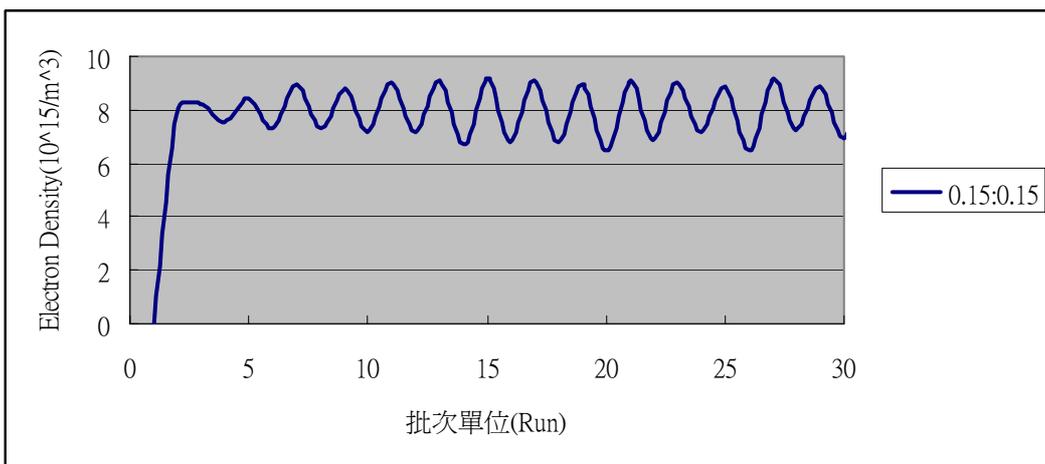


圖 7-21 當 $\delta:\epsilon_{t-1} = 0.15:0.15$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

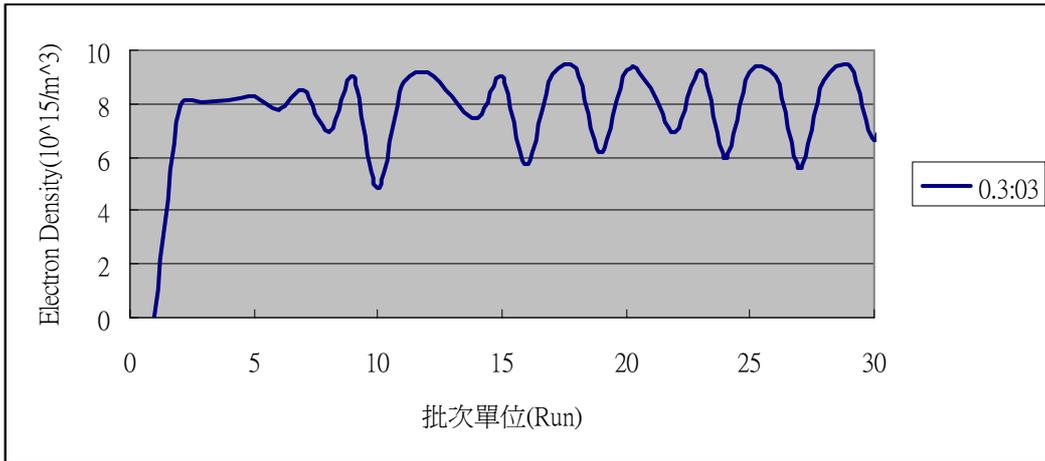


圖 7-22 當 $\delta : \epsilon_{t-1} = 0.3 : 0.3$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

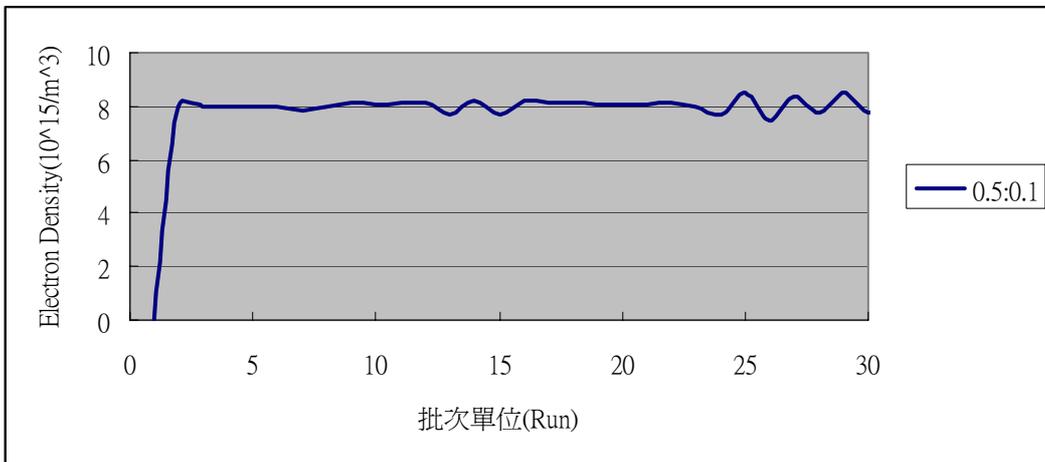


圖 7-23 當 $\delta : \epsilon_{t-1} = 0.5 : 0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

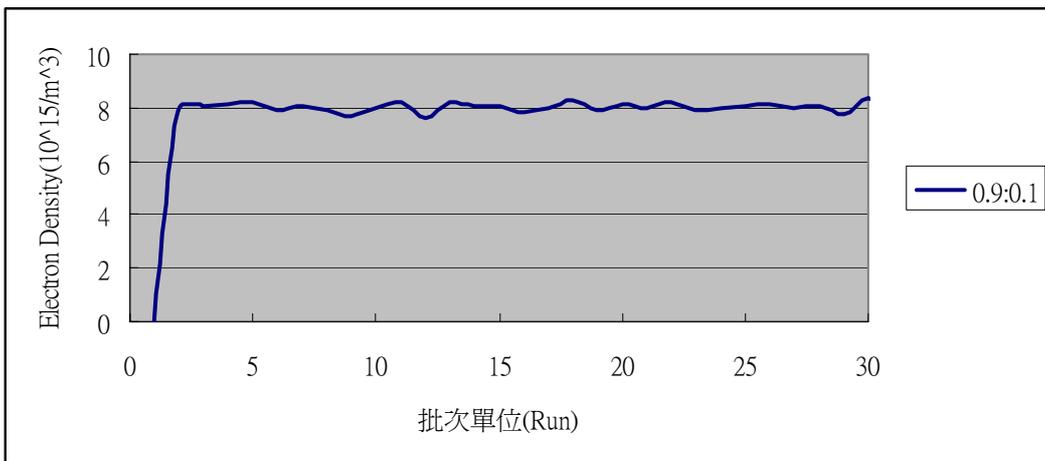


圖 7-24 當 $\delta : \epsilon_{t-1} = 0.9 : 0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

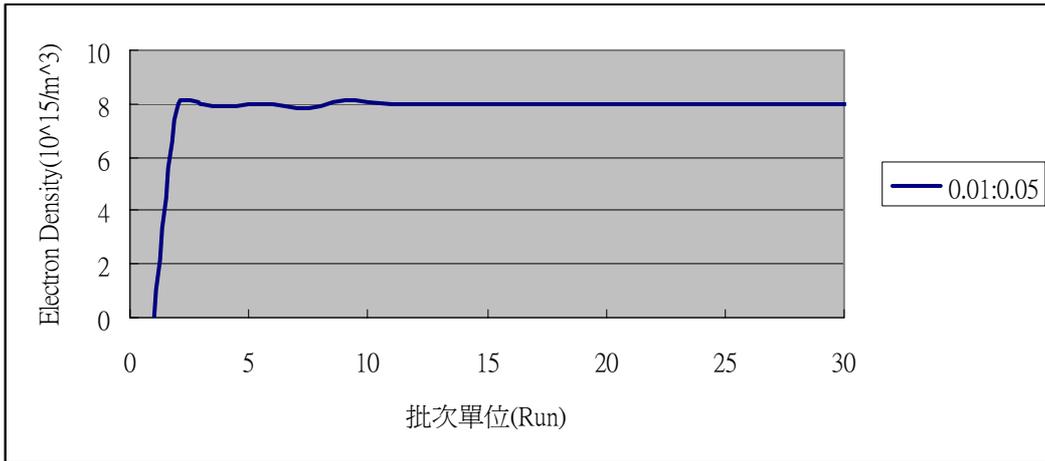


圖 7-25 當 $\delta:\epsilon_{t-1}=0.01:0.05$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

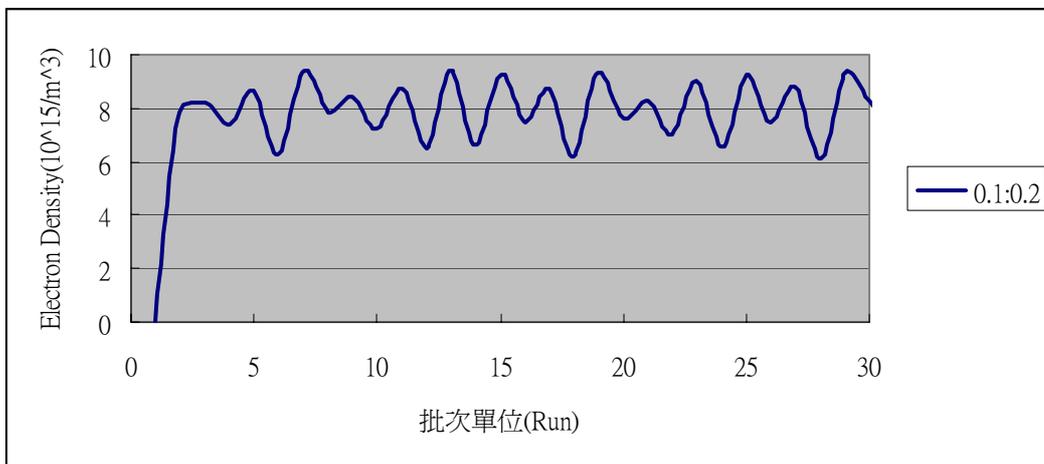


圖 7-26 當 $\delta:\epsilon_{t-1}=0.1:0.2$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

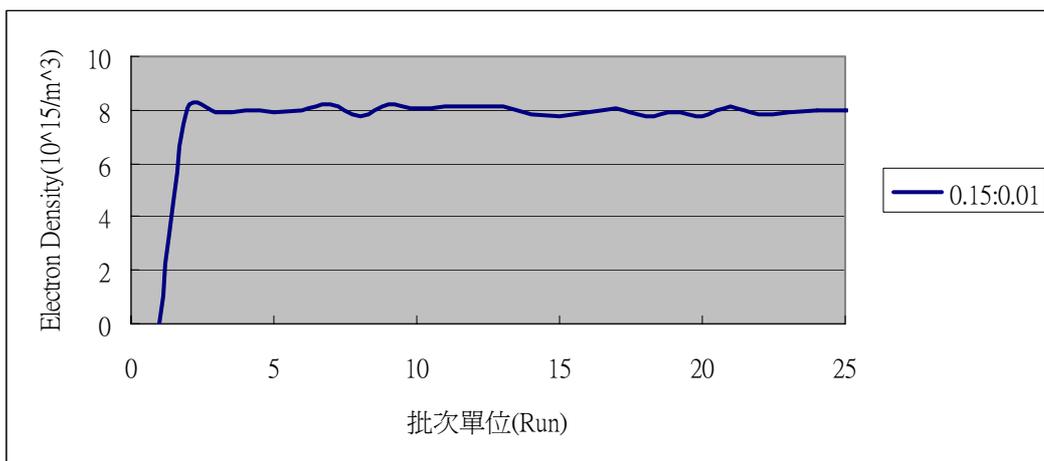


圖 7-27 當 $\delta:\epsilon_{t-1}=0.15:0.01$ 之 AEWMA 控制情形(改變腔體壓力)

7-4.2 控制輸入功率的部分

同樣的，設定 μ_0 、 ξ_0 初始值為 0.4，比較 $\delta: \varepsilon_{i-1} = 0.1:0.1$ 、 $0.4:0.4$ 、 $0.5:0.5$ 、 $0.9:0.9$ ，依序如圖 7-28 至圖 7-31 所示，可以發現在所欲控制的製程模型為線性時，增加比值也會減少 overshoot 與穩定時間，但在 $0.9:0.9$ 時，雖然 overshoot 減少，穩定時間約三個批次單位，但會有些許的動盪，也就是抑制干擾的性能比較不好。

觀察圖 7-32 ($\delta: \varepsilon_{i-1} = 0.5:0.1$) 與圖 7-28 ($\delta: \varepsilon_{i-1} = 0.1:0.1$)，同樣的可以發現到，增加 δ 值會減少達到平衡時變動的大小值，但不會影響達到穩定的速度。再利用先前的圖表同時，考慮圖 7-33 ($\delta: \varepsilon_{i-1} = 0.1:0.5$) 的分佈情形，吾人便可整理出 AEWMA 控制器中 δ 、 ε_{i-1} 兩者大小值對於系統的影響表，如表 7-2 所示，在設計 AEWMA 控制器時可以參考此一關係進行參數的設定。基本上在控制此一線性的系統時，將 δ 調小、將 ε_{i-1} 調大，會有較好的效果，如圖 7-33 所示，但不論 δ 、 ε_{i-1} 數值為何，在與同為控制輸入功率的 EWMA、DEWMA 比較後，可以發現 AEWMA 明顯的比前兩者為優。

表 7-2 δ 、 ε_{i-1} 對電漿電子密度步階響應的影響(改變輸入功率)

	Overshoot(%)	穩定所需時間	抑制干擾效果
固定 $\delta=0.1$ 、 ε_{i-1} 增加	增加	減少	增加
固定 $\varepsilon_{i-1}=0.1$ 、 δ 增加	增加	增加	減少
固定 $\delta=0.5$ 、 ε_{i-1} 增加	不變	減少	不變
固定 $\varepsilon_{i-1}=0.5$ 、 δ 增加	不變	不變	不變
ε_{i-1} 、 δ 同時增加	均為 0.5 時最少	均為 0.5 時最少	均為 0.5 時最好

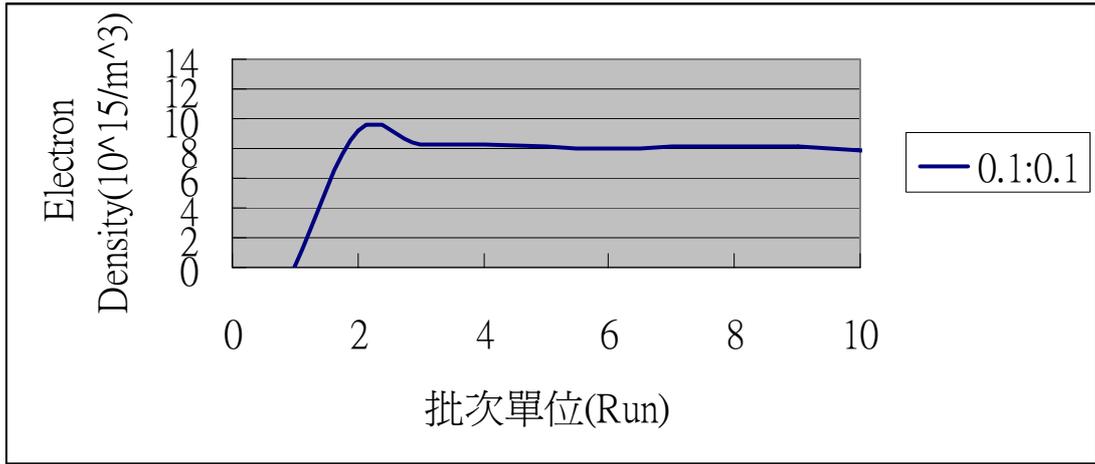


圖 7-28 當 $\delta:\varepsilon_{t-1} = 0.1:0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)

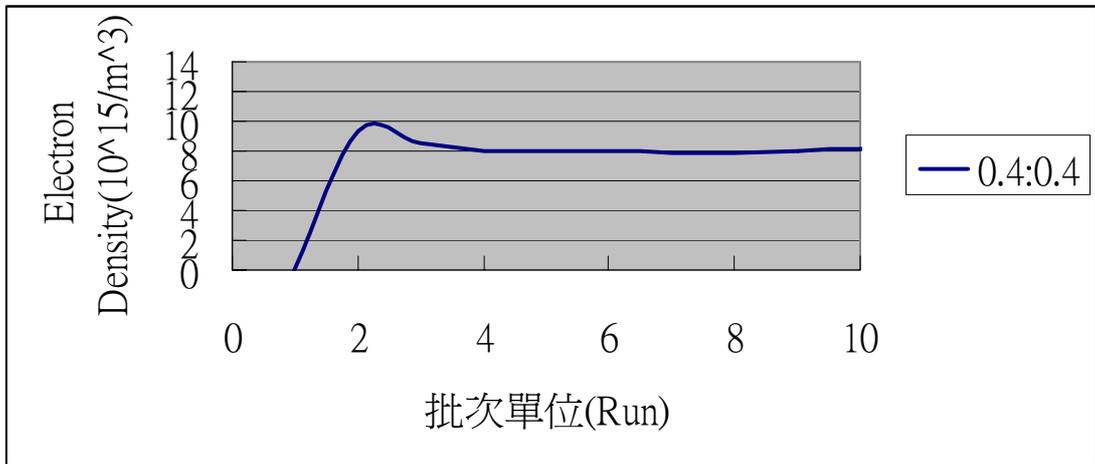


圖 7-29 當 $\delta:\varepsilon_{t-1} = 0.4:0.4$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)

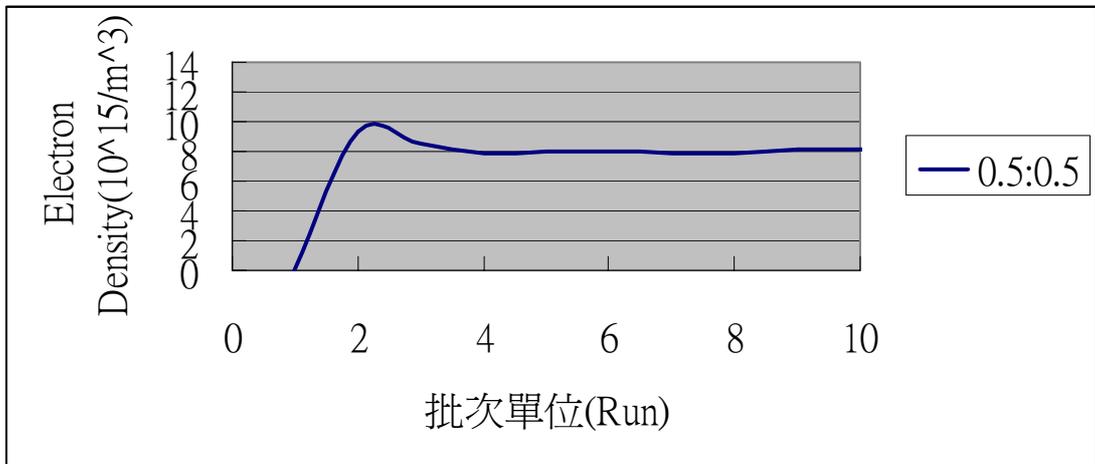


圖 7-30 當 $\delta:\varepsilon_{t-1} = 0.5:0.5$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)

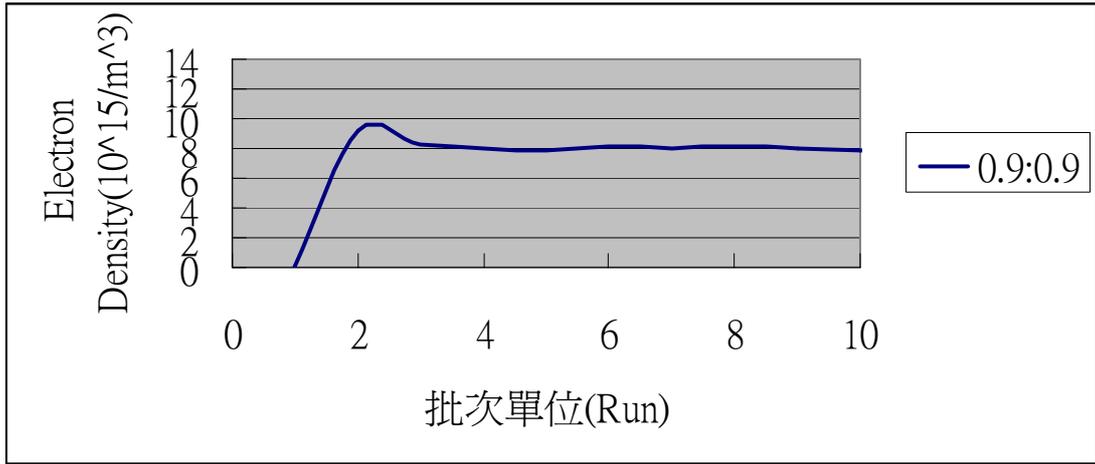


圖 7-31 當 $\delta : \varepsilon_{t-1} = 0.9 : 0.9$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)

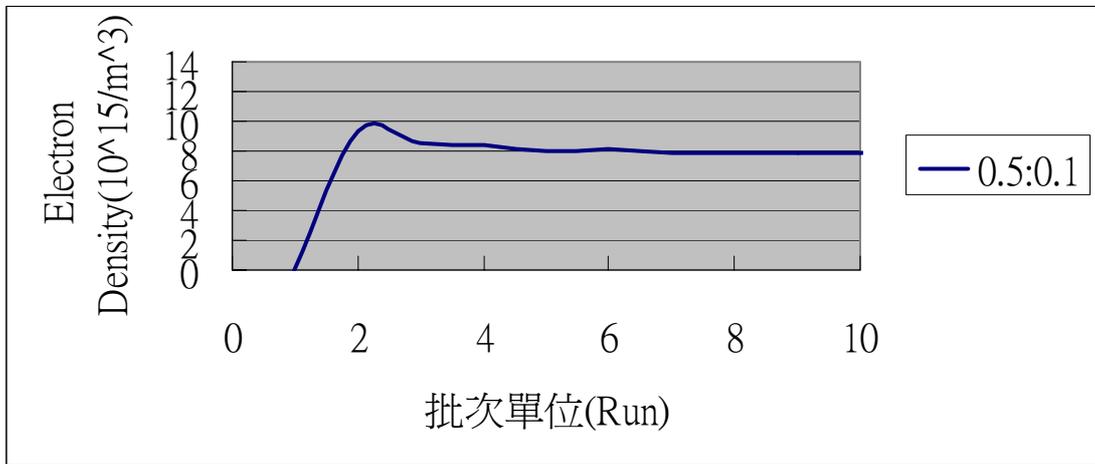


圖 7-32 當 $\delta : \varepsilon_{t-1} = 0.5 : 0.1$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)

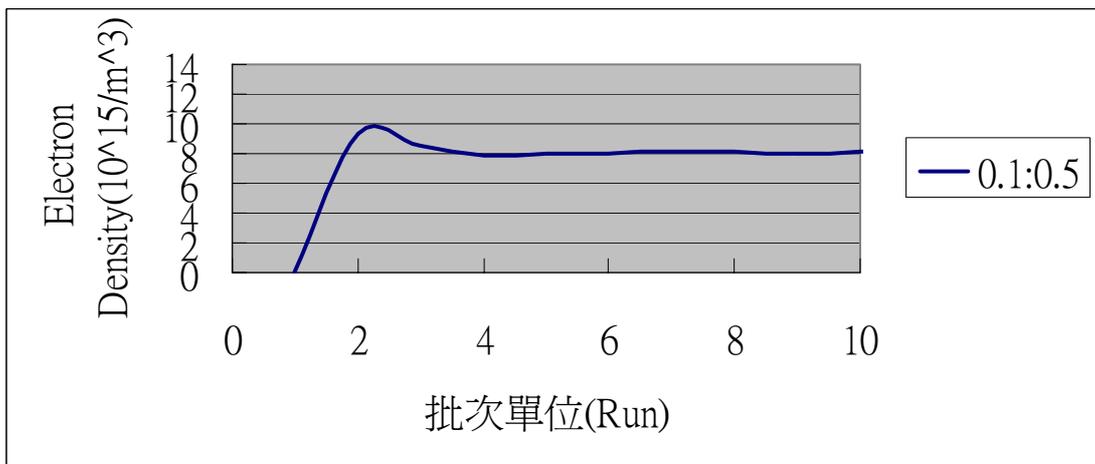


圖 7-33 當 $\delta : \varepsilon_{t-1} = 0.1 : 0.5$ 之 AEWMA 控制情形(改變輸入功率)

7-5 結果與討論

在實現方面，一開始設定為控制平均電子密度的原因在於 sensor 所能收集的乃是平均的電子密度，利用 sensor 收集的平均電子密度大小來訓練下一批次控制器的參數大小，故利用此法來做控制是可行的。

從本章中可以知道此三種 EWMA 控制器均可以應用在維持電漿密度上，使得電漿的電子密度維持在一定值，從而使蝕刻時可以更精確的掌握蝕刻的時間與深度關係，防止相同製程與相同輸入參數產生不同蝕刻率的問題。而三個控制器中又以 Adaptive EWMA 得到的效果最好，至於 EWMA 與 DEWMA 則相較不遠，相關比較如表 7-3 所示。若在相同成本考量下，建議利用 Adaptive EWMA 控制法是最好的，如果實現上與成本上只能運用到 EWMA 與 DEWMA 兩種控制器，控制腔體壓力及控制輸入功率均建議使用 EWMA 控制器。

表 7-3 三種控制器的比較

	穩定速度(run)		Overshoot(相對比較)	
	控制腔體壓力	控制輸入功率	控制腔體壓力	控制輸入功率
EWMA	約為 10 單位	約 7 個單位	高	高
DEWMA	約為 10 單位	約 5 個單位	中	低
AEWMA	約為 5 單位	約 3 個單位	低	低

第八章 均勻度

8-1 前言

在電漿蝕刻控制中，雖然能控制平均的電子密度在固定的目標值上，但實際情形就如同本論文中所模擬的分佈，並非每一個位置都是相同大小的電子密度值，故在控制蝕刻的平坦化方面並無法利用改變壓力或輸入功率進行改善，這點實在是非控制器所能控制的，也因此，激發本人對此一部份投注的研究，進而產生創新的思維，也就是利用 bias 來改善電漿蝕刻的均勻度。

8-2 bias 的原理



為了增加離子到達 wafer 的能量，在第二章對 TCP 的介紹中即可瞭解，在腔體放置 wafer 處下方會架構一個 RF-power，也就是所謂的 bias-power。其工作原理乃是利用 RF-power 的高頻率變壓，如圖 8-1 所示，連接 RF-power 為 Va 面，另一面為 Vb 面，RF 乃是快速的作週期性的電壓變換，由圖中可以看出如 Va 面產生的電壓般，當一開始由 Va 變成負 1KV 的電壓時，可以看見 Vb 面也感應產生負 1KV 大小的電壓，開始吸引 Ion 到達（充正電），故在 Va 維持負 1KV 時，Vb 的電位由於離子的到達而上升。當 Va 變換到正 1KV 時，Vb 面也感應而變增加 2KV 的電位，加上先前吸引的 Ion，所以電位會比正 1KV 要多，當 Va 維持在正 1KV 時，由於電子速度遠比離子快，所以此時 Vb 面大量吸收電子，導致電位下降的很快。如此不斷的轉換後，由於充 Ion 正電少、充電子負電多，由於電荷開始累積，半週期充正電荷和負電荷最後會平衡，所以幾個週期後會在 Vb 面形成一個負電位的偏移，也就是所謂的 bias。

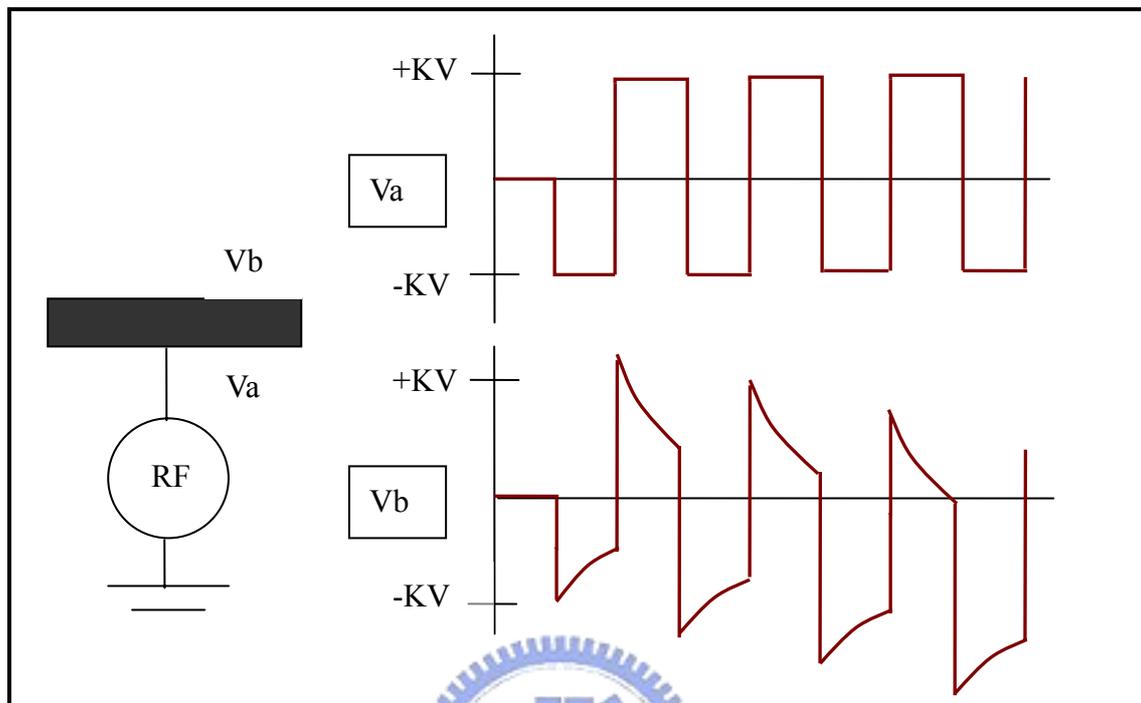


圖 8-1 Bias 形成的過程圖

8-3 均勻度的構思

模擬程式建構完成後，在不斷的改變參數來模擬電漿分佈狀態的結果發現，無論如何改變壓力與輸入功率，均發現在同一腔體高度下，電漿電位並非平坦分佈，由於影響電漿蝕刻主要是接近 wafer 的部分，由模型的數值觀察不加 bias 時接近 wafer 的電位分佈，當高度為 0.14 公尺、半徑由腔體中心至腔體外壁時（亦即從 0 至 0.2 公尺時），可以得到如圖 8-2 所示。

為了更一步驗證此一分佈的正確性，發現由蕭雅光【16】所做論文可得到驗證。其論文中乃是利用探針在電漿腔體內移動來收集不同位置電位的大小分佈，利用其所做的實驗之中距離 wafer 最接近的一個高度所量測的電位分佈，如圖 8-3 所示，可以發現與本模型所得之數據有相類似的曲線，因此證明了此一分佈的正

確性。雖然其所收集的電漿與本模型的反應氣體不同，但不同氣體在分佈上的差異不大，較大的差異大多存在於數值大小的不同之上。觀察其收集的數據分佈中，在低壓時趨勢線與本模型所呈現的結果相差不多。

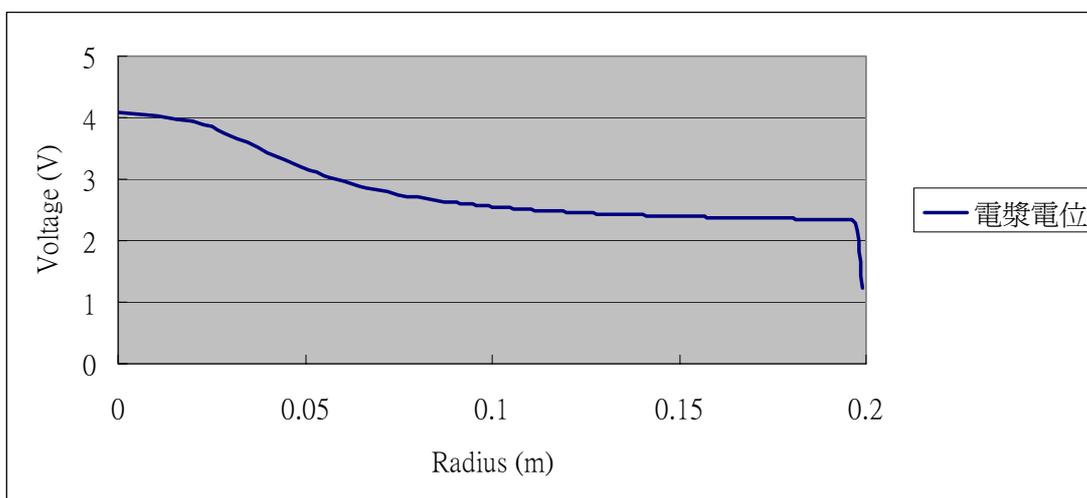


圖 8-2 Ar, 12mTorr, 400W(Z=0.14m)

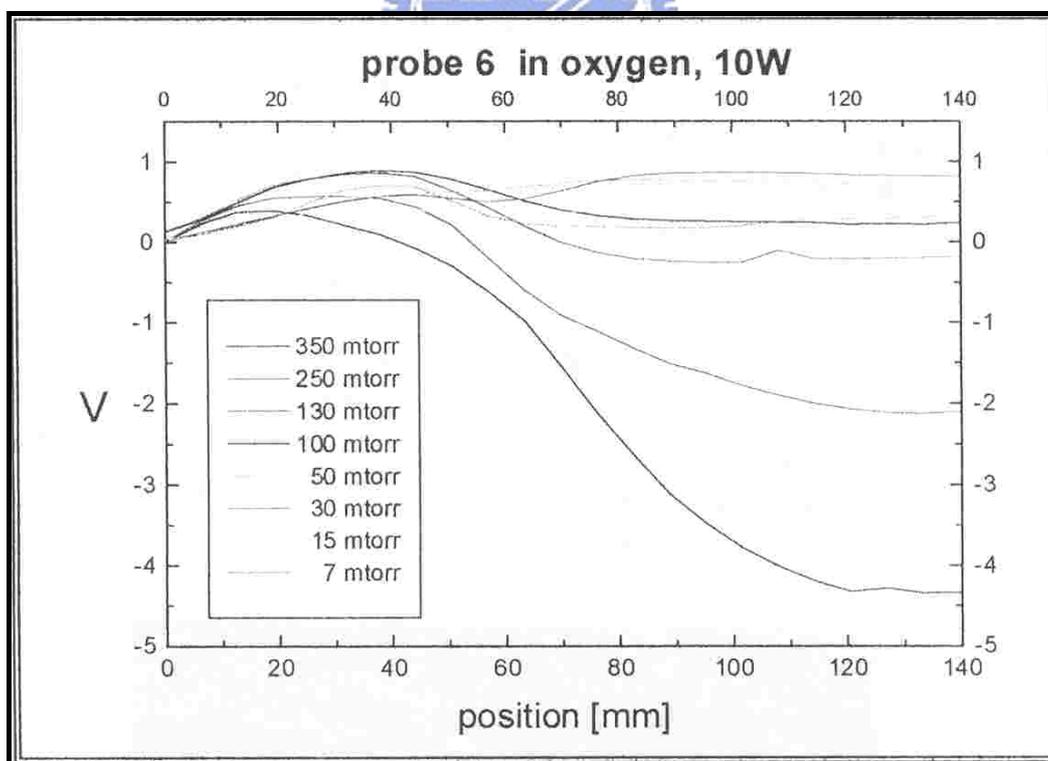


圖 8-3 探針量測電位大小分佈【16】

根據電漿理論，離子受 sheath 的電壓差而被加速吸向 wafer，造成轟擊、化學反應等作用，而加上 bias 便是在 wafer 處形成一個加強的電壓降，有利於離子的加速與能量的增加，由林志忠【17】論文的研究結果顯示，當 bias 的數值越大，所產生的蝕刻率會越好，也間接的證明了離子獲得能量越大，蝕刻率越大的關係，其論文中對 bias 與蝕刻率的研究整理圖形如圖 8-4 所示。

從圖形中可以更清楚的看出電漿蝕刻率要高，則 bias 就必須要調大，也就是兩者間存在一個正相關性，也由於此一特性，在控制壓力與輸入功率均無法達到均勻化的窘境中，提供了學生對均勻化可能可使實現的構思。

構思的構造如圖 8-5 所示，利用 bias 的大小不同，在特定區域給予 bias 電壓，用來改善電漿原本呈現不均勻的電位分佈。由於電位的分佈不均，導致電漿蝕刻時的不均勻（一般在 wafer 中間蝕刻較深，到了外圍蝕刻變淺），因此藉由 bias 的補償，期望將 wafer 上方的電漿電位分佈維持在一定值，藉此來達到所謂均勻化 (uniform) 的目標。

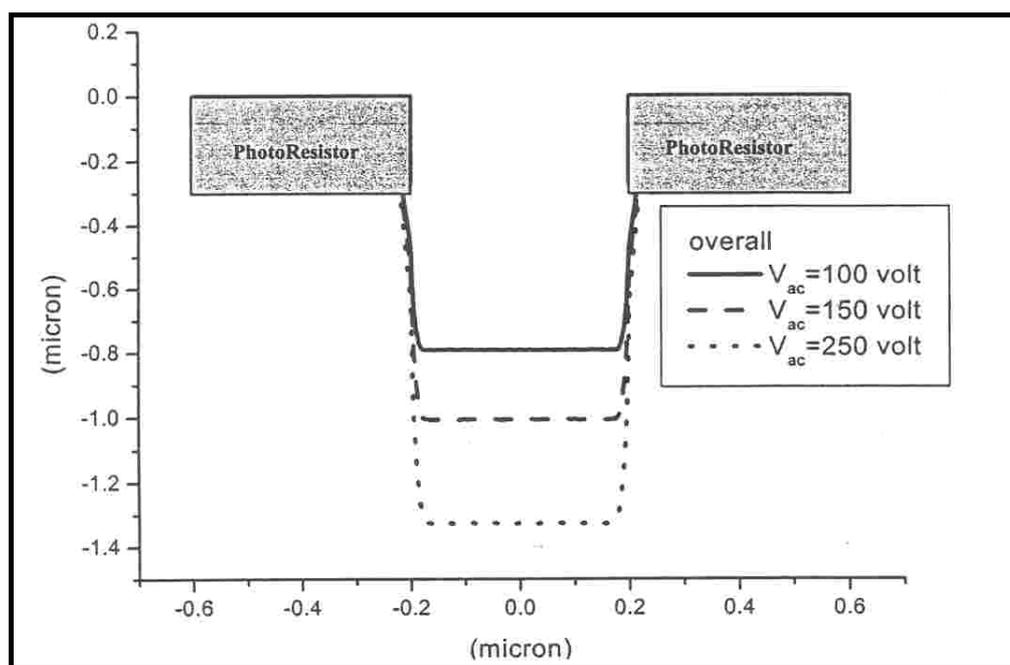


圖 8-4 蝕刻與 bias 大小關係圖【17】

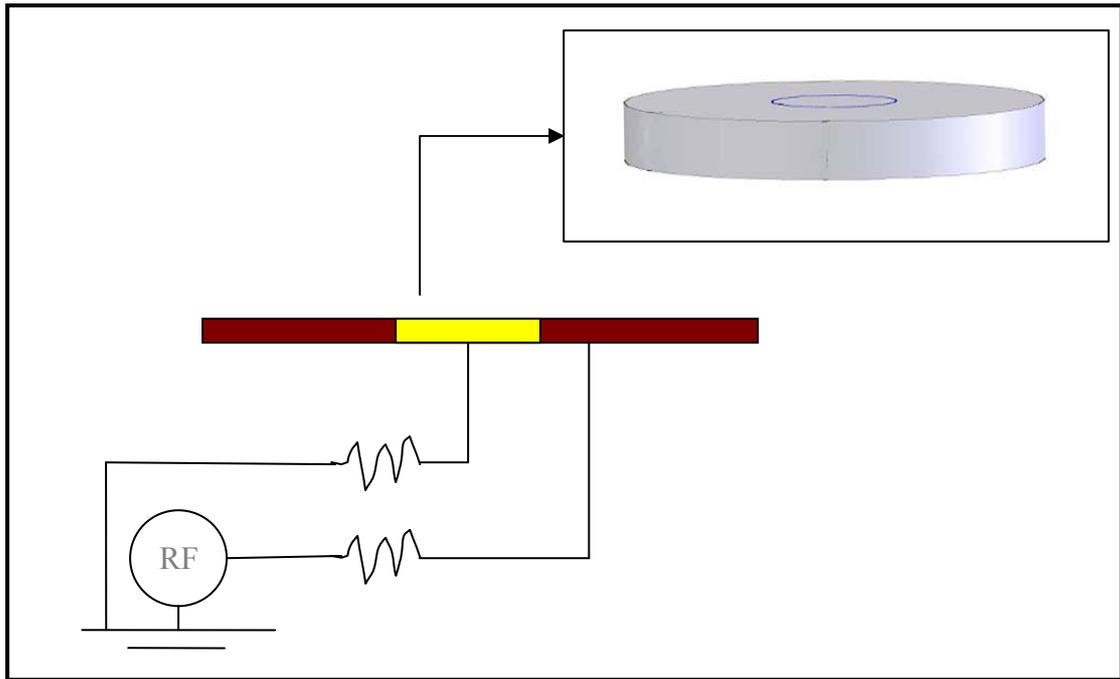


圖 8-5 創新 bias 的構造

8-4 結果與討論



利用先前所設計的 bias 來進行模擬，假設 bias 中央為接地，如圖 8-5 所示，而外圍給予產生 1.5V 的偏壓，其圖形分佈如圖 8-6 所示，由於目前所實驗的機台為六吋的 wafer，因此在此僅考量到半徑 0.14m 部分即可。配合上先前圖 8-2 的分佈，吾人可以得到一經過補償的電壓降分佈，如圖 8-7 所示。經過補償後發現，電壓降隨半徑增加而產生的差異在小於 1V 之間，也就是可以成功的讓電壓的分佈維持在一定的目標值上，藉此達到均勻化的目的。

如果要將差異量更佳化，可以進行更多圈的設計構造，若考慮四層的構造，其 bias 分佈如圖 8-8 所示，經過補償後的電漿電位分佈如圖 8-9 所示，發現差異量小於 0.5V，更佳使電位分佈均勻化。若中間部分也需要增加偏壓來提高蝕刻率，則可將圖 8-5 中接地的部分接到 RF-power 的地方，藉由改變電阻來影響所產生的偏壓大小，利用此種構造，吾人便可在兼顧均勻化與蝕刻率的情形下，讓

電漿蝕刻設備更為完善與精密。

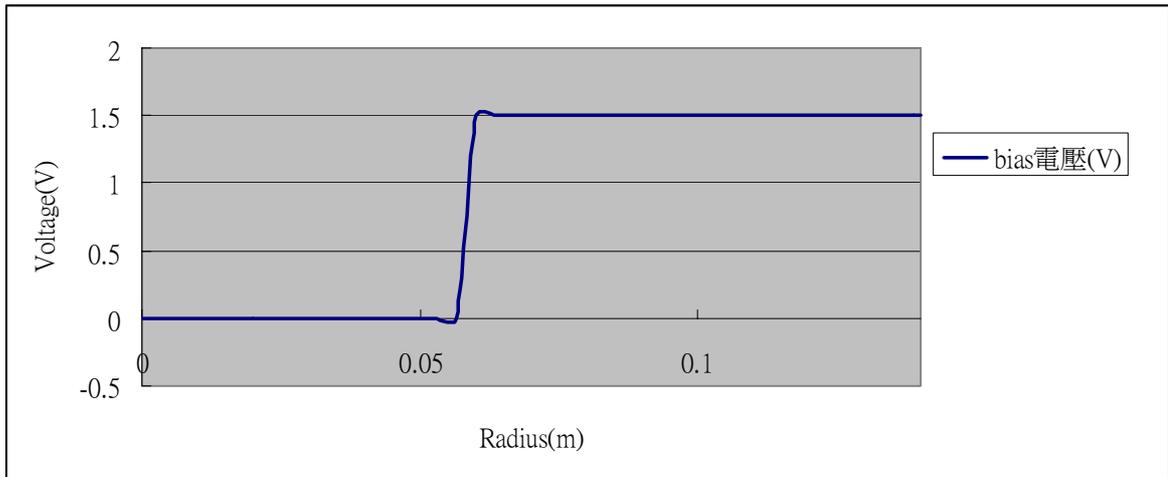


圖 8-6 RF 產生之偏壓分佈

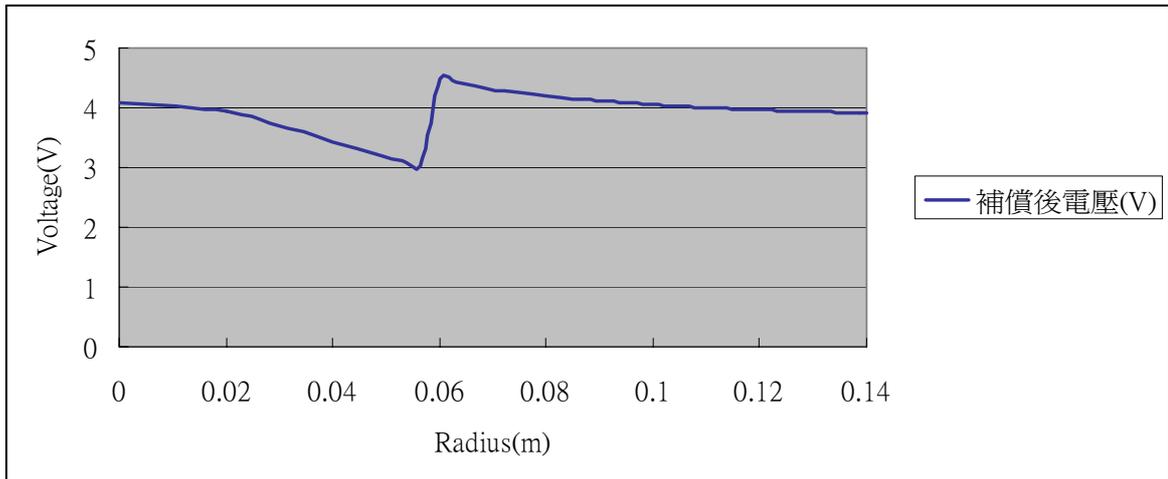


圖 8-7 補償後之電壓大小分佈

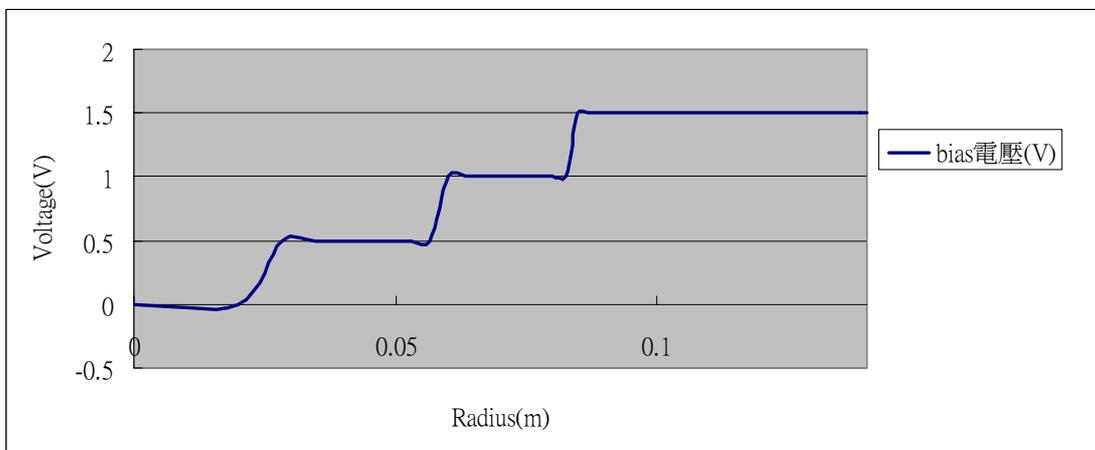


圖 8-8 四層構造所產生的 bias 電位大小分佈

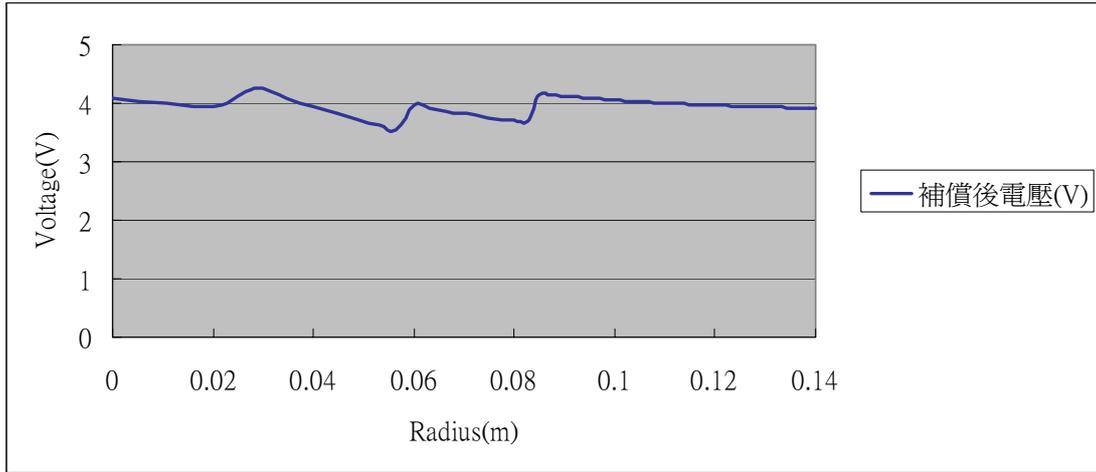


圖 8-9 四層構造之 bias 補償後之電漿電位分佈



第九章 結論與未來工作

9-1 結論

本論文主要是利用流體模式建立氬氣電漿的二維模型，並發展成一簡單的人機介面，讓往後使用者能簡單易懂且充分的利用本模型。在模型的支援之下，利用 EWMA、DEWMA、AEWMA 三種不同的批次製程控制法，來達到控制電漿電子密度的目標，藉此穩定電漿的蝕刻速率，也由於對此方面的研究，進而思索出如何改善蝕刻平坦度的研究構想。在此將本論文主要的結論依照電漿模型方面、批次電漿蝕刻設備控制方面與平坦化方面，共三個部分來介紹：

電漿模型方面：



1. 利用本模型所做的氬氣電漿穩態分佈情形與許多不同論文的模型所模擬的結果相符合。
2. 穩態氬氣流體模型之電子密度會隨壓力與輸入功率增加而增加，較高的壓力或輸入功率會有較高的電子密度，但並非無限制的線性增加，而是呈現曲線的分佈。
3. 利用實驗所收集的平均值與模型所計算的平均值相比較，證明本模型模擬數據的趨勢圖與實驗數據趨勢圖相符合。
4. 接近感應線圈部分，在腔體之中所產生的感應電場、感應磁場均較腔體空間中其他部分為大。
5. 電漿電位在腔體中心較平緩，主要的電位降出現在接近腔壁時，且腔體正中心部分之電位略高於其他部分。

批次電漿蝕刻設備控制方面：

1. 不論 EWMA、DEWMA 或 AEWMA，均可以有效的控制系統達到所要求的穩定目標值上，差別在於穩定所需的時間與超越量(overshoot)的大小。
2. 無論 EWMA 或 DEWMA，權重值的設定會嚴重影響到控制的效益與結果。本研究發現，權重值的選擇上應在 0.5 之下，但也不能太小。
3. 影響 AEWMA 控制效益的主要是影響更新權重的參數，參數大時表示差異量在下一個批次的系統參數中所佔的比重較高。
4. AEWMA 控制器在執行時無須找尋最佳權重值，控制的效益在此電漿系統中表現較好，可以節省多時間和成本。
5. DEWMA 整體效益和 EWMA 相差不遠，雖其控制的效益可更為貼近目標值，但其複雜程度卻較 EWMA 高，在精度要求不是極高時，使用 EWMA 控制器即可。



均勻度方面：

1. 此一創新的方法可以幫助實現控制器所不能達到的均勻度目標。
2. 理論上可以成功的控制 wafer 表面的電位大小差異量小於 1V。
3. 理論上利用更多更細的構造下，可以達成更小電位差異量的目的，改善電漿蝕刻的均勻度。

9-2 未來工作

本論文所涉及的領域包含了模型的建立、控制的探討與均勻度的改善等三大部分，每一部份都可以說是電漿相關研究領域裡的重點部分，由此三部分往下繼續延伸，可以作的研究種類與細節非常的多樣化，在此提供一些本人認為下一步可以繼續研究的方向與方針，如同上一小節，在此也分三部分敘述。

電漿模型方面：

1. 在原模擬中加入 bias 模擬的部分，使電漿蝕刻機台的狀態能完全的模擬出來。
2. 程式所建立的模型可再考量 RF match Network 及更多實際的雜訊與干擾，讓模型更趨完整。
3. 利用既有的使用介面與模擬的程式碼，以此為基底，擴充撰寫反應更為複雜的氯氣電漿的二維模擬狀態，再者，可以做混和氣體模擬電漿狀態，以更符合實際的電漿蝕刻機台。
4. 加入電漿與 wafer 間蝕刻機制的表面化學反應模型，以期更能瞭解電漿蝕刻的反應細節。

批次電漿蝕刻設備控制方面：

1. 由於本論文僅作到 SISO 的控制模擬，實際上電漿機台所能調整的大參數不僅只包含輸入功率或腔體壓力，故可在此基礎上，繼續深入探討 MISO(multiple input , single output)或 MIMO(multiple input , multiple output)的控制系統，以期將設備調整、控制到最好的狀態。

2. 考量控制過程中，訊號間的雜訊(noise)與所受的干擾(disturbance)，以其將控制器設計的更佳完善，以符合實際在機台上運作時可能遭遇的狀態。
3. 深入研究控制器的實現部分，以期能用實際結果來驗證控制器的好壞與實用性。
4. 尋找不同的控制法則，找尋更好的控制效能。

均勻度方面：

1. 探討多層結構時，結構與結構間的阻隔不導電物質，以期能達成每一區塊互不干擾的原則與設定。
2. 探討不同的製程參數下，其電位不平分的分佈狀況，如此方能找出並決定每一個 bias 區塊的最佳半徑大小值。
3. 以實驗來驗證本構想的可行性，並量測實際情形是否有改進電漿蝕刻均勻化的效果。
4. 發展更好的結構材質或設計，以達成完善電漿蝕刻均勻化的目標。



附錄

線性回歸的基本理論

回歸分析就是利用統計運算來決定 $y = f(x)$ 這個函數的方法。研究者應根據過去的經驗或是理論來判斷這個數學公式應該為何種形狀，基本上主要分為五大類：線性、對數、多項式、乘冪、指數。而判斷資料符合性的作法，主要建立在殘差(residual error)之上，殘差(E_i)就是觀察值(Y_i)減預測值(\hat{Y}_i)的大小，公式(a)所示：

$$E_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad \dots\dots\dots (a)$$

殘差值越大，表示回歸線越不接近現實。我們將所有的殘差予以平方再加總，即為殘差的平方和(SS_e)，因為殘差的平方和受到樣本數的大小影響，所以不同的樣本數或單位的殘差平方和無法做比較，為了克服這個困難，就要讓他們放在同一個尺度上。作法就是將殘差平方和除以總平方和 (SS_t)。

總平方和就是所有的數減去其平均值，然後平方再加總。其實它就是變異數的分子，令 \bar{Y} 是平均值、 Y 表示資料的觀察值、 \hat{Y} 表示回歸線所產生的預測值，則相關公式條列(b)、(c)所示：

$$SS_e = \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad \dots\dots\dots (b)$$

$$SS_t = \sum (Y - \bar{Y})^2 \quad \dots\dots\dots (c)$$

事實上，經過一些換算後，可以得到總平方和減去殘差平方和就是回歸平方和 (SS_{reg})，亦即如公式(d)所示：

$$SS_t - SS_e = \sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 = SS_{reg} \quad \dots\dots\dots (d)$$

SS_{reg} 就是回歸平方和，它就是每個預測值減去平均數後，加以平方，然後再加總起來。回歸平方和佔總平方和的百分比，就是這條回歸線可以符合資料的部分，通稱為 R^2 ，又稱為決斷係數(Coefficient of Determination)，公式表示如(e)所示：

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_t} = \frac{\sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (e)$$

又因為 $SS_t = SS_{reg} + SS_e$ ，所以可以整理得出公式(f)：

$$R^2 = 1 - \frac{SS_e}{SS_t} = 1 - \frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (f)$$

簡單的說，殘差平方和佔總平方和的百分比，就是這條回歸線所不能符合或解釋資料的部分。1 減去這個部分所表示的就是這條回歸線可以符合資料的部分。 R^2 的值介於 0 與 1 之間。如果回歸運算的預測值等於平均數，那麼 R^2 等於 0；如果這條回歸線完全符合資料，一點殘差都沒有， R^2 就等於 1。但是事實上， R^2 當然通常不會等於 0 也不會等於 1，而是介於兩者之間。 R^2 越大，表示這條線越符合資料，也就是符合性比較好。

值得注意的是，如果兩條回歸線的 R^2 值差異不多，合理性也差不多，那麼回歸線越簡單越好，因為這才能符合科學化繁為簡的大原則，而且較合理及簡單的回歸線，其 R^2 值略小也無妨。

至於本論文中(7.1)式之取決過程便是取決於 R^2 值的大小，相關的比較圖形如圖 1 至圖 8 所示，可以發現用多項式分析時其 R^2 值最高，而多項式二次方(圖 5)、三次方(圖 6)、四次方(圖 7)、五次方(圖 8)中，雖五次方與四次方均比三次方時 R^2 值高，但改變不大，如同上一段落中所提及，基於化繁為簡的原則，使用三次方的回歸結果就足夠，因此本論文採用三次方的回歸方程。

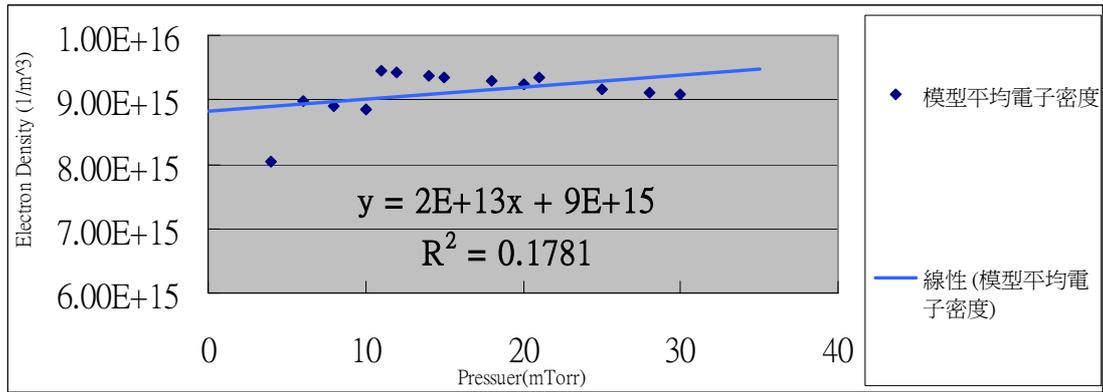


圖 1 線性之回歸圖形($R^2=0.1781$)

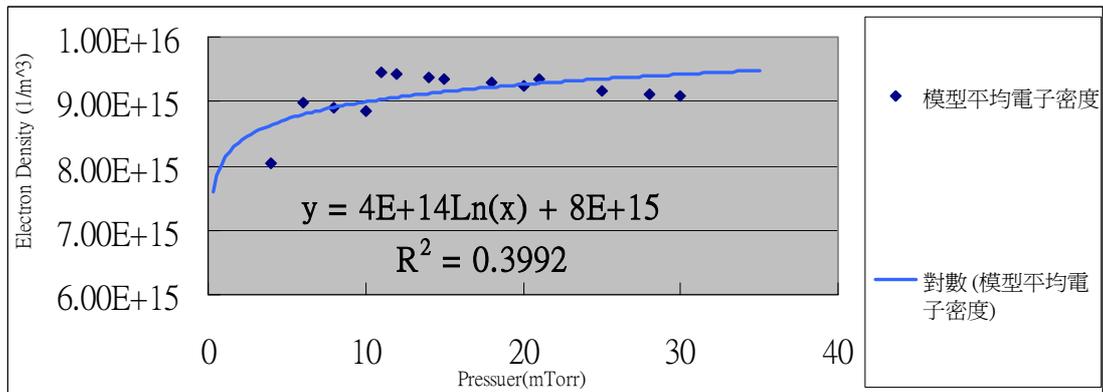


圖 2 對數之回歸圖形($R^2=0.3992$)

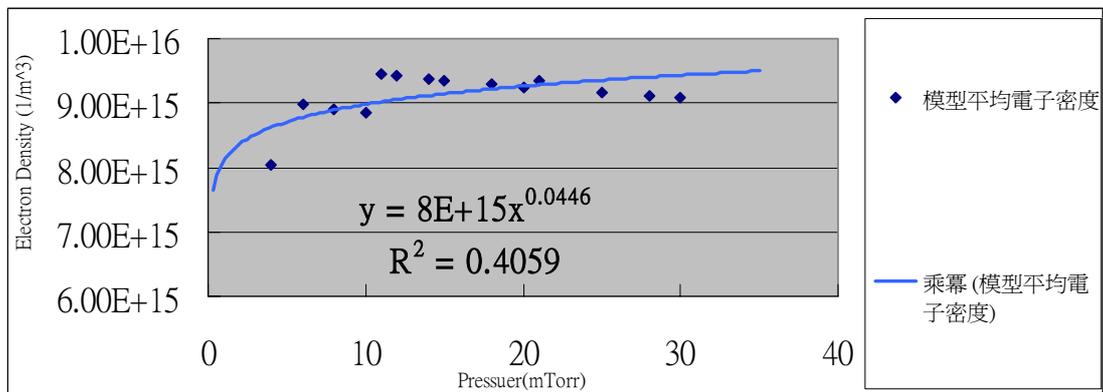


圖 3 乘冪之回歸圖形($R^2=0.4059$)

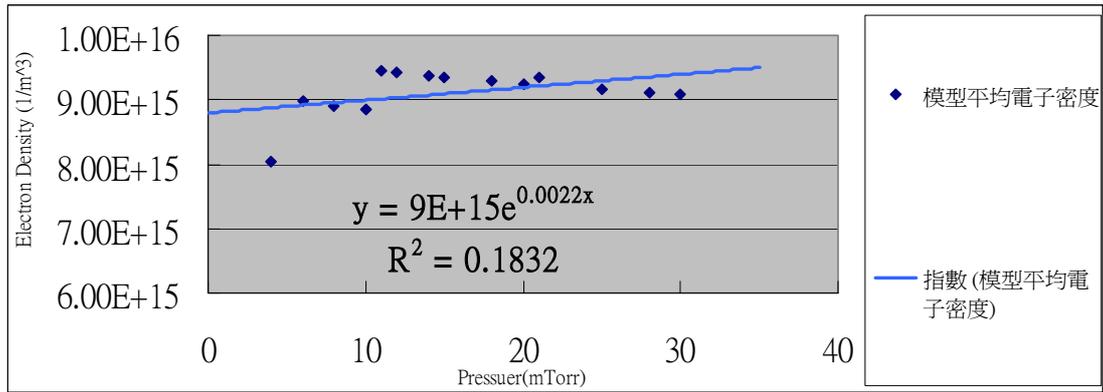


圖 4 指數之回歸圖形 ($R^2=0.1832$)

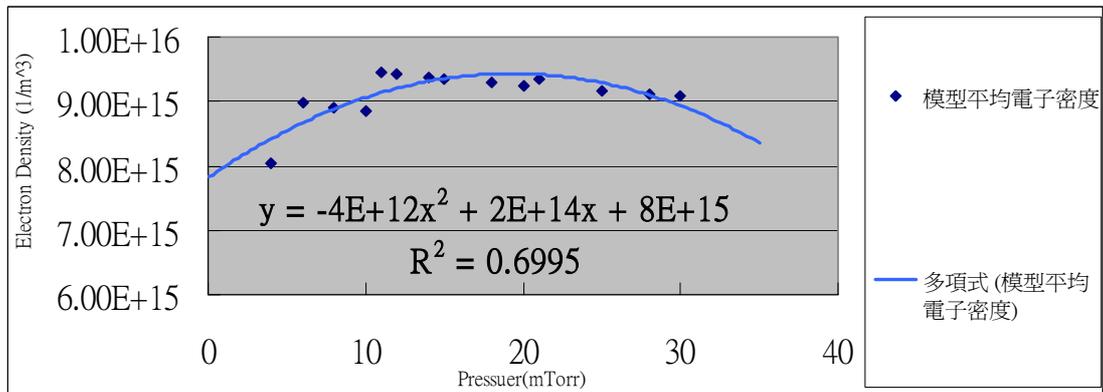


圖 5 多項式二次方之回歸圖形 ($R^2=0.6995$)

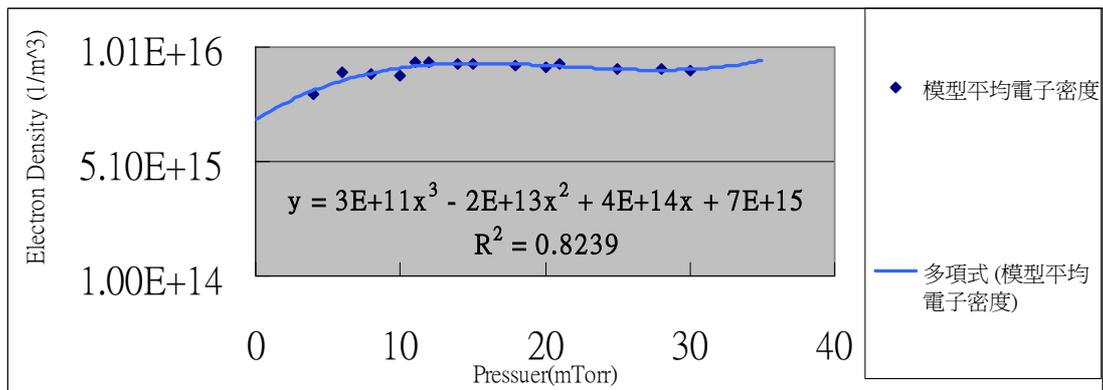


圖 6 多項式三次方之回歸圖形 ($R^2=0.8239$)

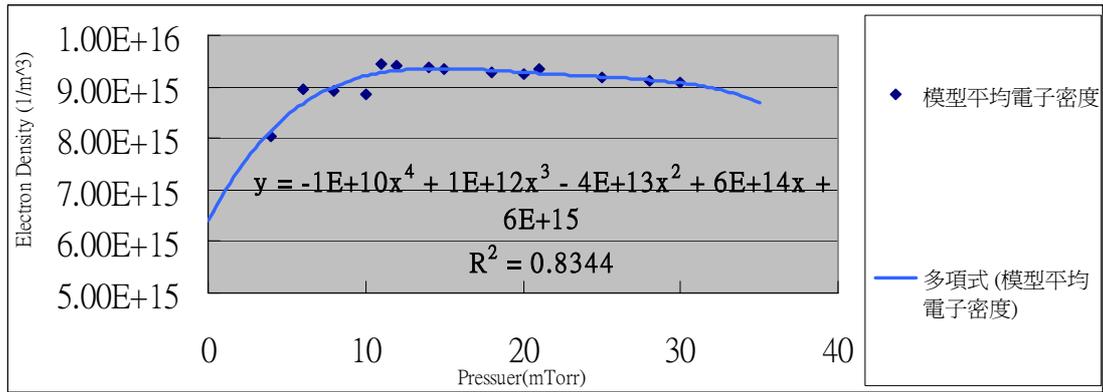


圖 7 多項式四次方之回歸圖形($R^2=0.8344$)

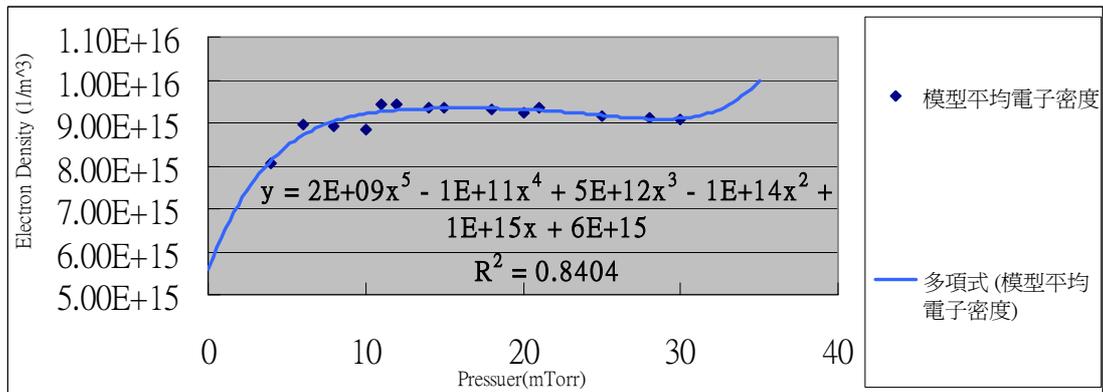


圖 8 多項式五次方之回歸圖形($R^2=0.8404$)

參考文獻

- [1] Brian Chapman, “Glow Discharge Process: sputtering and plasma etching” , Wiley, New York, 1980
- [2] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, “Principles of Plasma Discharge and Materials processing” , Wiley, New York, 1994
- [3] R. A. Stewart, P. Vitello, and D. B. Graves, “Two-dimensional fluid model of high density inductively coupled plasma sources” , 1994 J. Vac. Sci. Technol. B, 12, p487-485
- [4] M. Li, H. Wu, and Y. Chen 1995 IEEE Trans. Plasma. Sci. 23, p558-562
- [5] J. D. Bukowski and D. B. Graves 1996 J. Appl. Phys. 80 p2614-2623
- [6] J. W. Coburn, “Plasma etching and reactive ion etching” , IBM Research Laboratory San Jose. California 95193
- [7] Peter L.G. Ventzek, Robert J. Hoekstra, and Mark J. Kushner, “Two-dimensional modeling of high plasma density inductively coupled source for materials processing” , 1994 J. Vac. Sci. Technol. B. 12(1)
- [8] A. P. Paranjpe, “Modeling an inductively coupled plasma source” , 1994 J. Vac. Sci. Technol. A 12(4)
- [9] 林信成, “Visual Basic 程式設計” , 初版, 第三波, 1999
- [10] 簡聰海, “數值分析-使用 Visual Basic” , 第二版, 全華科技圖書, 2002
- [11] 陳錦輝, “超上手 Visual Basic 學習手冊” 金禾資訊, 2002
- [12] Semiconductor Equipment and Materials International, “SEMI international standards” , 1999
- [13] kenichi NANBU, “Particle Modeling of Non-equilibrium Plasma and Gases for Materials Processing” , Institute of Fluid Science, Tohoku

University

- [14] B.K.Bogomolov, "Management of Process of Plasma Etching of Silicon", N.S. technical University, 2002
- [15] Nital S. Patel and Steven T. Jenkins, "Adaptive Optimization of Run-to Run Controllers : The EWMA Example" IEEE Transactions on semiconductor engineering, VOL. 13, NO. 1, FEBRUARY 2000
- [16] 蕭雅光, "反應式離子蝕刻系統的放電模型之研究", 國立台灣大學物理研究所碩士論文, 1996
- [17] 林志忠, "電漿蝕刻模擬", 國立清華大學系統與科學研究所碩士論文, 2001
- [18] 張家豪, "300mm 晶圓電感式電漿蝕刻機台之研製與電漿特性分析", 國立清華大學工程與系統科學系碩士論文, 2000
- [19] 傅春霖, "電感式電漿源二維流場模式及區域平均模式電腦模擬比較", 國立清華大學系統與科學研究所碩士論文, 2001
- [20] IBM Essonnes Plasma Etch and Deposition Technology Days, Essonnes, France, 1998
- [21] 吳銘益, "應用類神經網路於批次製程控制之研究", 私立元智大學工業工程與管理研究所碩士論文, 2002