

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

電感耦合式電漿源處理系統之計算模擬

Numerical Simulation of Inductively-Coupled Plasma Sources

計畫編號：NSC 88-2213-E-002 -026-

執行期限：87/08/01~88/07/31

主持人：楊照彥 國立台灣大學應用力學所

一、中文摘要

對於製程用電漿源的常用數值模型有三種：流體模型，動力模型，混合模型。本文針對電感耦合式電漿源建立一流體模型式數值模型，並運用計算流體力學領域中的高解析度方法，對目前之大尺寸電漿反應器作進一步之研究

本計劃所完成之具體工作有：(1) 建立二維，電感耦合式電漿源反應器之電磁場模型，(2) 以計算流體力學領域發展完備之高解析度算則建立電漿源之數值模型。(3) 建立一數值實驗診斷系統，使能將其用於電漿反應器之設計。

關鍵詞：輝光放電，高密度電漿，電感耦合式電漿，流體模型，動力模型，混合模型，電漿設備模型

關鍵詞：

輝光放電，高密度電漿，電感耦合式電漿，流體模型，動力模型，混合模型，電漿設備模型，

Abstract

For simulations of processing plasma sources, there've been three kinds of models: fluid model, kinetic model and hybrid model. Based on the well-developed high-resolution numerical

method from CFD, we constructed a fluid model to simulate the inductively coupled plasma source (ICPS).

In this work we also developed a model of the electro-magnetic field in the ICPS reactor. The increasingly popular large-sized reactor was the main target of our simulation.

Keywords :

Glow Discharge, High density plasma, Inductively coupled plasma source, Electron cyclotron resonance, Fluid model, Kinetic model, Hybrid model, Particle simulation, Plasma equipment modeling

二、理論

電子的流體模型

取電子之 Boltzmann 方程式的零次、一次、與二次的積矩可以得到統御其密度，動量與能量的方程式：

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \mathbf{u}_e) = +\nu \rho_e \quad (2),$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho_e \mathbf{u}_e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \mathbf{u}_e \mathbf{u}_e + P_e) \\ &= -\frac{\rho_e}{m_e} q \mathbf{E} - \frac{1}{m_e} q (\rho_e \mathbf{u}_e \times \mathbf{B}) - \frac{\rho_e \mathbf{u}_e}{\tau_m} \end{aligned} \quad (3),$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}_e + P_e \mathbf{u}_e) = -\frac{\rho_e}{m_e} q \mathbf{u}_e \cdot \mathbf{E} - \rho \frac{e - e_0}{\tau_e} \quad (4)$$

審視上述方程式吾人可發現等號左側與空氣動力學的尤拉方程式(Euler Equation)相同，此系統形成一雙曲型守恆律，所以吾人可套用尤拉方程式的黎曼問題(Riemann Problem)的解來建構一高解析度(High resolution method)數值法。

離子的流體模型

對於電漿中的離子,波茲曼方程式依然成立,若(1)式對速度空間積分(零階積矩),可以得到描述離子密度變化的方程式:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (n_i \mathbf{u}_i) + \nu n_e$$

再將(5)式對速度空間作一階積矩,取其穩態(忽略時變量),則可以得到描述離子平均速度(非個別速度)的運動方程式[8]:

$$n_i \mathbf{u}_i = -\nabla(D_i n_i) - \mu_i n_i (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$$

基本上(5)式為離子的連續方程式,而(6)式則為動量守恆方程式,此流體模型把離子巨觀地視為連續體。注意(5)式中

的 ν 是電漿的電子生成率, n_e 則是電子密度。就數值觀點而言,統御離子運動的是傳輸方程式,較電子單純許多。

電磁場模型

電磁場的統御方程式為馬克斯威方程式(Maxwell equations),引入羅倫茲轉

換(Lorents Transform),可將馬克斯威方程式轉為一向量位(vector potential)與純量位的方程式:

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (8)$$

若吾人將如圖一所示之電漿反應器簡化為一軸對稱之幾何形狀,式(7)、(8)可進一步簡化,其解法可以用數學解析或直接以差分法解之[15]。

三、結果

吾人針對一圓柱狀電感耦合式電漿源建立一軸對稱格點系統如圖一所示,該格點系統為非均勻格點,在靠近反應器的週圍有較細密的格點分布。圖-二顯示了該模組的 θ 方向電場強度,由於對於電感耦合式電漿源而言,其主要的輸入功是由 θ 方向電場完成,所以我們可以發現其電游離率隨著 θ 方向電場而變化,在圖三中顯示了電游離率在同一射頻週期的變化。這些模擬的成果均可作為設計與操作電漿源系統之參考,提供了一個解析研究的工具。

(6)

四、參考文獻

- 1.B. N. Chapman, *Glow Discharge Processes*, New York: Wiley, 1980.
- 2.Alfred Grill, *Cold Plasma in Materials Fabrication*, IEEE Press, 1994.
- 3.John L. Vossen and Werner Kern, *Thin Film Processes II*, Academic Press, 1991.
- 4.Yuri P. Raizer, *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, 1991.
- 5.3.E. Cherrington, *Gaseous Electronics and Gas Lasers*, Pergamon Press, 1987.

- 6.J.P.Boeuf, Phys. Rev., A36, p.2782-2792, 1987.
- 7.J.H.Tsai and C.H.Wu, Phys. Rev, A41, p5626, 1990.
- 8.F.F.Young and C.H.Wu, Appl.Phys. Lett, 62, p.473, 1993.
- 9.Chwan-Hwa "John" Wu, Chihwen "Chris" Li, Jyun-Hwei Tsai and Fongray Frank Young IEEE Trans. on Plasma Science, vol.23, pp.650-660, 1995.
- 10.Jyun-Hwei Tsai and Chwan-Hwa "John" Wu, Journal of Physics D: Applied Physics, vol.26, pp.496-499, 1994.
- 11.蔡俊輝, "電腦模擬對於射頻輝光放電在薄膜材料製程上之應用", 化工技術, 83年10月號。
- 12.Yang, J. Y., Huang, J. C. and Tsuei, L., "Numerical Solutions of the Nonlinear Model Boltzmann Equations," *Proceedings of the Royal Society, London, Series A*, 448, pp.55-80, 1995.
13. Yang, J. Y., and Huang, J. C., "Rarefied Flow Computations Using Nonlinear Model Boltzmann Equations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 120, pp. 323-339, 1995.
14. Hopwood, J., "Review of inductively coupled plasmas for plasma processing", *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1, pp. 109-116, 1992.
15. Fa Dai, and Chwan-Hwa "John" Wu, "Self-Consistent Multidimensional Electron Kinetic Analysis for Inductively Coupled Plasma Sources", *IEEE tran. Plasma sci*, vol. 23, no.4, 1995.
- 16.Kushner, M. J., "Advances in plasma equipment modeling", *Solid State Technology*, June 1996

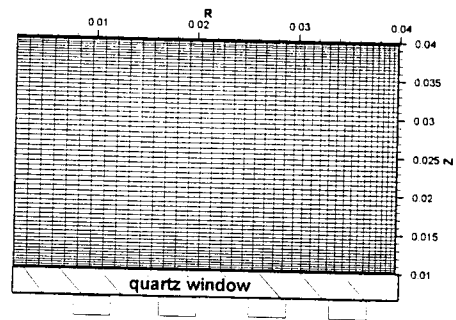


Figure-1 The grid arrangement of an ICPS module

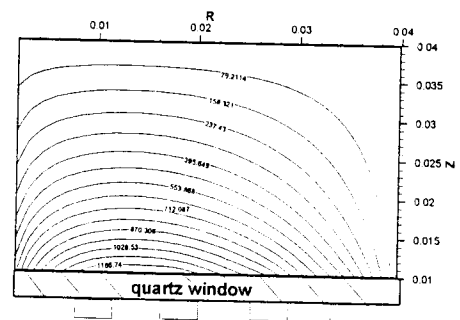


Figure-2 The azimuthal electric field strength of an ICPS module

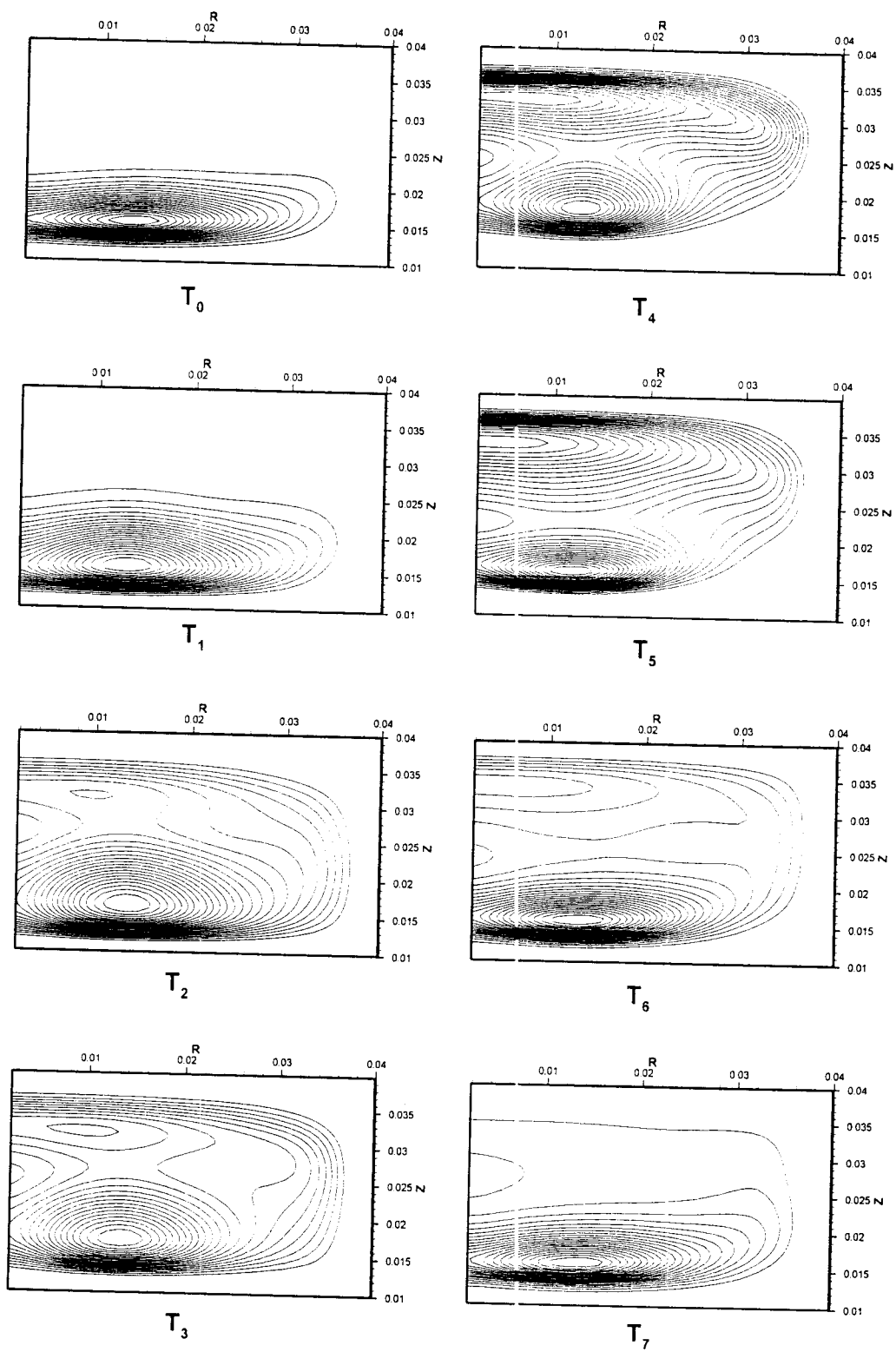


Figure-3 The ionization rate at 8 different phases