

# 低温非平衡等离子体流动的控制方程及数值应用

杨弼杰<sup>1</sup> 周宁<sup>2</sup> 孙泉华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区  
100190)

<sup>2</sup> 中微半导体设备(上海)有限公司, 上海浦东区 201201)

**摘要** 本文从 Boltzmann 方程出发, 推导了描述低温非平衡等离子体流动的控制方程组。该方程组考虑了平动非平衡、化学非平衡及磁场对带电粒子输运过程的影响。并利用已有 Chapman-Enskog 展开结果, 给出了通量和物性参数的具体表达形式。在此基础上, 基于 SIMPLEC 算法, 对 GEC-CCP 发生器内氙气的流动和放电过程进行了数值模拟。研究表明, 该模型能较好地描述等离子体实际流动和放电过程, 合理的选择物性参数和物理化学机理是正确模拟非平衡等离子体流动的基础。

**关键词:** 控制方程组, 低温等离子体, 非平衡流动, CFD

## 一、引言

低温等离子体技术广泛应用于半导体制造业和航空航天领域。尽管等离子体物理的学科已经比较成熟且低温等离子体技术得到了大量应用, 但作为一种多物理场耦合的复杂过程, 对其流动细节的认识存在困难。国内外对低温非平衡等离子体流动的数值模拟, 更多侧重于等离子体本身的物理化学过程, 而对流动的分析 and 讨论不足。本文从 Boltzmann 方程出发, 推导了完整的控制方程组。并用该模型研究 GEC-CCP 发生器内氙气的流动和放电过程, 得到了较好的结果。

## 二、控制方程组与数值结果

### 3.1 控制方程

完整的描述低温等离子体流动, 需要考虑以下物理现象: 电子和重粒子的平动温度非平衡; 化学非平衡; 电磁场对输运过程的影响以及分子内部自由度的激发。控制方程的推导方法常用动理论和控制体法。因为 Boltzmann 方程基于粒子的分布函数, 动理论既能给出宏观量的微观解释, 又能提供更多的物理细节。本文通过动理论方法, 从物理上揭示低温等离子体流动过程中的影响因素和守恒方程。而类比中性反应气体的工程做法, 给出通量和输运系数的表达形式。

电子守恒方程:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot [n_e (\bar{u}_h + \bar{u}_e)] = S_e \quad (1)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_e T_e) + \nabla \cdot \left( \frac{5}{2} T_e \bar{\Gamma}_e - \chi \nabla T_e \right) = \bar{j}_e \cdot \bar{E} - \nabla \cdot \bar{q}_e + \Delta E_e^h \quad (2)$$

重粒子守恒方程:

$$\partial_t (\rho_h \bar{u}_h) + \nabla \cdot (\rho_h \bar{u}_h \bar{u}_h) = -\nabla \cdot \bar{P}_h - \nabla p_e + (\sigma_h + \sigma_e) \bar{E} + (\bar{j}_h + \bar{j}_e) \times \bar{B} \quad (3)$$

$$C_{p,h} \left( \frac{\partial \rho_h T_h}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_h \bar{u}_h T_h \right) = \nabla \cdot (k \nabla T_h) + \sum_{i \in h} \bar{J}_i C_{pi} \nabla T_h + \bar{j}_h \cdot \bar{E} - \Delta E_e^h \quad (4)$$

### 3.2 数值结果

GEC-CCP 发生器是 1989 年由美国若干个科研机构共同提出的一个标准模型。如图所示，GEC-CCP 采用电容耦合的放电方式，共有两个平行电极，一侧电极接地，另一侧电极接驱动电源。电极和腔壁之间由一圈绝缘物质隔离。整个发生器呈轴对称分布。氩气从驱动电极流入，从另一侧的腔壁底端流出。本文计算中，外接电源的频率为 13.56MHz，电压幅值为 100V。入口和出口处的气体压力均为 0.1Torr，气体体积流量为 10sccm。所有壁面温度均假设为 300K。

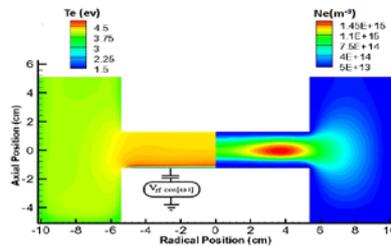


图1 平均电子数密度和电子温度

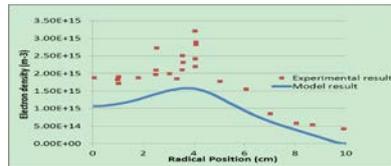


图2 数值结果和实验结果比较

## 三、结论

本文从动理论出发，结合 Fick 定律、Fourier 定律。给出了不考虑辐射输运条件下低温非平衡等离子体的控制方程组。并将其运用于模拟 GEC-CCP 发生器内等离子体的流动，取得了较好的结果。该控制方程组也可以用来求解高速问题，例如等离子体在 arc-jet 内的流动等。

## 参 考 文 献

- 1 Boeuf J P, Pitchford L C. Physical Review E, 1995; 51(2): 1374~1390
- 2 Lymberopoulos D P, Economou D J. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1995; 100(4): 473~494
- 3 Overzet L J, Hopkins M B. J. Appl. Phys., 1993; 74: 2484~2486
- 4 ESI Group. CFD-ACE+ Modules Manual. 2009
- 5 Graille B, Magin T E, Massot M. Mathematical Models and Methods in Applied Science, 2009; 19(4): 527~599
- 6 Giovangigli V, Graille B. J.Phys.A: Math. Theor., 2009; 42: 025503
- 7 Hirschfelder J O, Curtiss C F, Bird R B. Molecular Theory of Gas and Liquids. New York: McGraw Hill, 1954.