

# GEC-CCP 发生器内等离子体流动的数值分析

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

1 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

2 中微半导体设备(上海)有限公司, 上海浦东区 201201

**摘要** 本文对 GEC-CCP 发生器内氩气的流动和放电过程进行了数值模拟。计算采用流体模型, 考虑了热非平衡和化学非平衡过程, 强调了流动对气体放电过程的影响, 并与实验结果进行了对比。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。此外, 合理的物性参数和化学反应机理是正确模拟非平衡等离子体流动的基础, 特别是物理化学模型对电子数密度的数值及分布的预测有较大的影响。

**关键词** 低温等离子体, 非平衡流动, CFD 模型, 氩气放电

## 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。前者主要涉及材料表面的刻蚀和物质的气相沉积, 如该技术已在超大规模集成电路的生产中起着不可替代的作用; 后者主要应用于各种方式的电推进技术, 以实现卫星的姿态调整和航天飞行器的星际航行。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, 但是低温等离子体流动涉及流动传热、电化学反应、电磁效应等多物理过程, 不同工况下的流动呈现出相异的特点, 还有电子与重粒子之间的物性差别明显, 且流场内的压力、温度的变化范围较大。这些特点造成对等离子体流动细节认识上的困难。从另一方面可以认为, 对低温等离子体流动的了解程度决定了低温等离子体技术的应用深度和广度。

国外对低温等离子体流动的模拟研究起步较早, 研究偏重于物理化学过程, 发展了以粒子模型<sup>[1,2]</sup>和流体模型<sup>[3,4]</sup>为主的模拟方法, 并逐步形成功能强大的模拟体系<sup>[5,6,7]</sup>。国内在该领域的工作相对较少, 但也取得了一定进展。如大连理工大学对电容和电感耦合式等离子体发生器的粒子模型和流体模型进行了研究<sup>[8]</sup>; 力学所近期围绕电弧等离子体发动机进行了相关研究, 但数值模拟仍采用了化学平衡和热平衡的假设<sup>[9,10]</sup>。从目前的文献调研来看, 国内外对低

温等离子体流动的数值模拟, 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。

本文针对低气压下氩气在电容耦合式 (CCP) 发生器中的放电过程, 具体选择了 GEC-CCP 发生器的一个标模, 运用流体模型对等离子体流动进行数值模拟。模拟时考虑了电子和重粒子之间的热非平衡现象以及化学组元之间的化学非平衡效应, 并通过与实验结果进行比较, 考察目前模型对低温等离子体数值模拟的可靠性。此外, 初步探讨了物性参数、化学反应机理等对低温等离子体流动的影响。

## 1 问题描述

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, 图 1 为该发生器的几何外形, 与 Overzert 和 Hopkins<sup>[12]</sup>的实验设备一致。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。

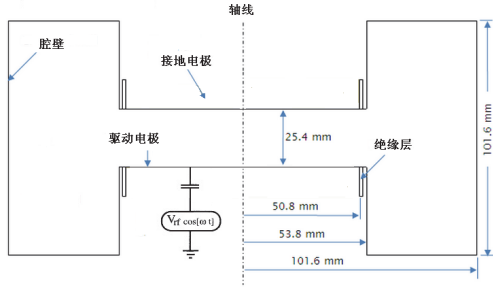


图 1 GEC-CCP 发生器几何外形

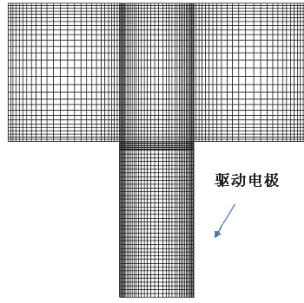


图 2 计算网格

图 2 为本文采用的计算网格，网格在电极附近做了加密，总网格数约为 7000。其中，驱动电极位于右侧，计算假设所有物理量呈轴对称分布。

## 2 计算模型介绍

本文对低温等离子体的数值模拟采用流体模型，主要包括以下六条假设：

1. 在氩气放电过程中，只考虑  $\text{Ar}$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^*$  (只考虑一个激发态) 和电子  $e$ 。
2. 尽管电子温度和重粒子温度不同，但所有重粒子拥有相同的温度，且都满足 Boltzman 分布。
3. 电子和重粒子之间的能量交换包括弹性碰撞和非弹性碰撞两部分。并且，当电子出现在化学反应中时，认为该化学反应所需的能量由电子提供。
4. 从 Boltzman 方程推导电子数密度和电子温度方程时，忽略电子质量的影响。
5. 流动是轴对称的，并且是层流。
6. 不考虑辐射对传热的影响。

下面分别对氩气放电过程的控制方程、模型中的化学反应速率和物性参数以及边界条件进行具体介绍。

### 2.1 控制方程

气体总体的宏观流动可由 N-S 方程组来描述，而电子和重粒子各自的组分浓度由其组分方程控制。由于电子和重粒子碰撞不充分，表现出明显的热非平衡效应，还需分别对电子和重粒子列出温度方程。考虑到自感磁场很小，本文忽略了磁场对流动的影响，而由泊松方程求解静电场。

1) 质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$\rho$  表示所有粒子的总密度， $\vec{V}$  表示所有粒子的平均速度。

2) 动量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \left( u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) \rho u_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \bar{f} \quad (2)$$

$p$  由两部分组成，一部分来自重粒子的贡献，另一部分来自电子的贡献。 $\vec{\tau}$  是剪切应力张量， $\bar{f}$  表示体积力。

3) 重粒子温度方程：

$$C_p \left( \frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u \bar{T} \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum_i \bar{J}_i C_{pi} \cdot \nabla T \quad (3)$$

$$+ \dot{Q}_{ion} + \frac{Dp}{Dt} - \sum_{r=non\_elec} \varepsilon_r q_r + \sum_{r=elastic} \varepsilon_r q_r$$

其中， $\dot{Q}_{ion} = \sum_{q_i > 0} q_i n_i \mu_i \bar{E} \cdot \bar{E}$ ，表示带电离子从电场得到的焦耳热。 $\sum_{r=non\_elas} \varepsilon_r q_r$ ，表示重粒子之间（包括离子），因化学反应而产生的反应热。 $\sum_{r=elastic} \varepsilon_r q_r$ ，表示电子和重粒子因弹性碰撞引起的能量交换。

4) 重粒子组分方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (J_{ij}) = M_i \omega_i \quad (4)$$

这里使用了漂移扩散假设来近似  $\bar{J}_i$ ，即  $\bar{J}_i = -\rho D_i \nabla Y_i + \rho q_i \mu_i \bar{E} Y_i$ ，其中右边第一项表示组员的扩散，第二项表示带电粒子在电场作用下的迁移。

5) 电子温度方程：

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_e T_e) + \nabla \cdot \left( \frac{5}{2} T_e \bar{\Gamma}_e - \chi \nabla T_e \right) = P_{joule} - n_e \sum_r n_r k_r \varepsilon_r \quad (5)$$

$P_{joule} = \bar{j}_e \cdot \bar{E} = e \bar{\Gamma}_e \cdot \nabla \phi$ ，表示电子从电磁场获得的焦耳热。 $n_e \sum_r n_r k_r \varepsilon_r$  表示电子因为与重粒子发生碰撞（包括弹性碰撞和非弹性碰撞）而引起的能量交换。其中  $\chi = \frac{5}{2} n_e D_e$ 。

6) 电子数密度方程：

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\Gamma}_e = S \quad (6)$$

其中,  $\bar{\Gamma}_e = \mu_e n_e \nabla \phi - D_e \nabla n_e$ 。这里也采用了漂移扩散假设, 并且忽略电子的惯性项(对流项)的贡献。

7) Poisson 方程:

$$-\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = e \left( \sum_i q_i n_i - n_e \right) \quad (7)$$

其中,  $\phi$  表示静电势。而静电场  $\bar{E} = -\nabla \phi$ 。

## 2.2 化学反应速率和物性参数

表 1 氩气放电的重要化学反应过程

No.	Process	Reaction	Rate coefficient(cm <sup>3</sup> /s)
1	Ground state excitation	Ar + e → Ar* + e	k <sub>ex</sub>
2	Ground state ionization	Ar + e → Ar <sup>+</sup> + 2e	k <sub>i</sub>
3	Step-wise ionization	Ar* + e → Ar <sup>+</sup> + 2e	k <sub>si</sub>
4	Superelastic collisions	Ar* + e → Ar + e	k <sub>sc</sub>
5	Quenching to resonant	Ar* + e → Ar + e	k <sub>r</sub> =2×10 <sup>-7</sup>
6	Metastable pooling	Ar* + Ar* → Ar <sup>+</sup> + Ar + e	k <sub>mp</sub> =6.2×10 <sup>-10</sup>
7	Two-body quenching	Ar* + Ar → 2Ar	k <sub>2q</sub> =3×10 <sup>-15</sup>

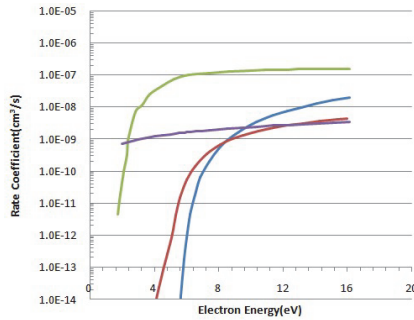


图 3 反应速率与电子能量的关系

物性参数对低温等离子体流动模拟的影响较大。一般而言, 在平衡条件下, 物性参数可以表示为粒子能量的函数<sup>[3,4]</sup>。本文仿照 Boeuf 的方法<sup>[3]</sup>, 假设电子迁移率是常数。Ar<sup>+</sup>迁移率满足(8)(9)式:

$$\rho \mu_i = 10^3 (1 - 2.2 \times 10^{-3} \sqrt{E/p}) \text{ torr cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

for  $\sqrt{E/p} \leq 60 \text{ V/(cm torr)}$

$$\rho \mu_i = \frac{8.25 \times 10^3}{\sqrt{E/p}} \left[ 1 - \frac{86.52}{(\sqrt{E/p})^2} \right] \text{ torr cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

for  $\sqrt{E/p} > 60 \text{ V/(cm torr)}$

电子的扩散系数满足 Einstein 方程, 即式(10), Ar<sup>+</sup>的扩散系数为定值。

$$D_i = k_B T_i / q_i \mu_i \quad (10)$$

表 1 为本文所使用的详细反应机理。Meijer<sup>[11]</sup>认为 Ar 在 CCP 的放电过程中, 其化学反应速率系数并不满足 Arrhenius 形式, 而应表示为电子能量的函数。具体反应速率和电子能量 ( $\varepsilon_e = 3/2 T_e$ ) 的关系由图 3 所示。因其并不满足 Arrhenius 形式, 故反应速率表达式采用分段函数表示。

此外, 流体的粘性由混合 Sutherland 模型确定, 而重粒子的热传导系数由普朗特数计算而得。

## 2.3 边界条件

针对边界条件的设置包括了 GEC-CCP 发生器内流向电极或壁面的电子、Ar<sup>+</sup>及 Ar\* 的通量等。具体来讲, 电子通量如式(11)所示,

$$\Gamma_{en} = \frac{1}{4} n_e v_{e,th} - \gamma \sum_i (q_i \Gamma_{in}) \quad (11)$$

其中  $v_{e,th} = [e T_e / 2\pi m_e]^{1/2}$ 。第一项表示电子的热扩散, 第二项表示电子的二次发射。其中  $\gamma$  是二次发射系数。而与该电子通量相应的, 由电子带走的电子能量如式(12)所示。

$$q_{e,n} = \frac{5}{2} T_e \Gamma_{e,n} - \chi \frac{\partial T_e}{\partial n} = 2 T_e \Gamma_{e,n} \quad (12)$$

而 Ar<sup>+</sup>和 Ar\* 流向电极或壁面的通量可分别表示为式(13)和(14),

$$J_{Ar^+,n} = \gamma_{Ar^+ \rightarrow Ar} \sqrt{\frac{\kappa T_g}{2\pi m_{Ar^+}}} \quad (13)$$

$$J_{Ar^*,n} = \gamma_{Ar^* \rightarrow Ar} \sqrt{\frac{\kappa T_g}{2\pi m_{Ar^*}}} \quad (14)$$

其中  $\gamma_{Ar^+ \rightarrow Ar}$ ,  $\gamma_{Ar^* \rightarrow Ar}$  分别是 Ar<sup>+</sup>和 Ar\* 的粘附系数。本文选取  $\gamma_{Ar^+ \rightarrow Ar} = \gamma_{Ar^* \rightarrow Ar} = 1$ , 表示 Ar<sup>+</sup>和 Ar\* 以热速度撞向壁面后, 回到基态, 变成 Ar 原子。

此外，在绝缘层表面，静电势满足式(15)，

$$\frac{\rho_s}{-\epsilon_0 \epsilon_r} = \nabla \phi \cdot \vec{n} \quad (15)$$

其中，表面电荷密度  $\rho_s$  满足式(16)。

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = e \left[ \sum_i q_i \Gamma_{i,n} - \Gamma_{e,n} \right] \quad (16)$$

上述的物理模型及数值计算是基于商业化 CFD 软件 CFD-ACE+<sup>[13]</sup>。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 计算结果

首先比较重粒子和电子的温度分布，图 4 为重粒子的温度分布云图（一个周期内的平均值）和流线图，而图 5 则为平均电子温度的分布图。可以看出，在压力  $P=0.1\text{Torr}$  的低压情况下，由于电子和重粒子均较为稀薄，碰撞很不充分，电子温度远高于重粒子温度。但重粒子从电场获得了一些能量，在驱动电极附近温度有所提高，但并不显著。

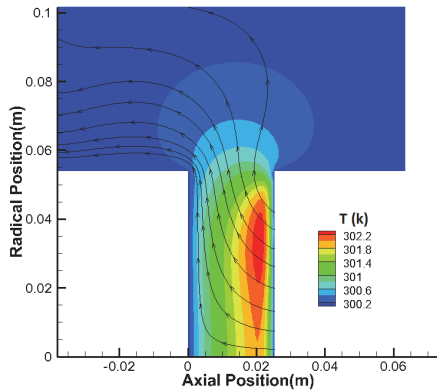


图 4 重粒子温度分布和流线图

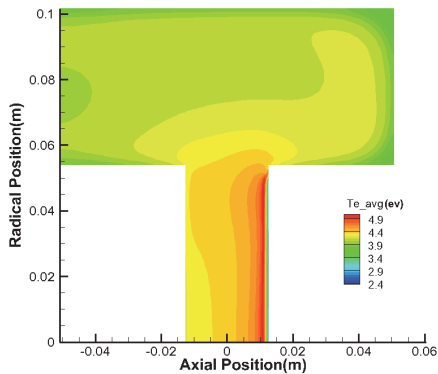


图 5 电子温度分布图

图 6 为电场对电子能量的平均功率输入。进一步对比图 5 和图 6，可以看出，平均电子温

度的最大值出现在鞘层附近。究其原因，在此处， $P_{joule} = \vec{j}_e \cdot \vec{E}$  达到最大，电子从电场获得大量能量。而在鞘层里，虽然  $\vec{E}$  达到最大值，但因鞘层对电子的阻碍作用， $\vec{j}_e$  反而较小。此外，壁面吸收了由穿过鞘层的电子所携带的能量，使得平均电子温度在鞘层内温度较低。

本文还对电子数密度的分布进行了研究，并与实验结果进行了对比。其中，图 7 为平均电子数密度（一个周期内的平均值）云图。如图所示，平均电子数密度的最大值出现在径向位置 Radical Position=0.04m 的位置，略小于电极的最大半径。

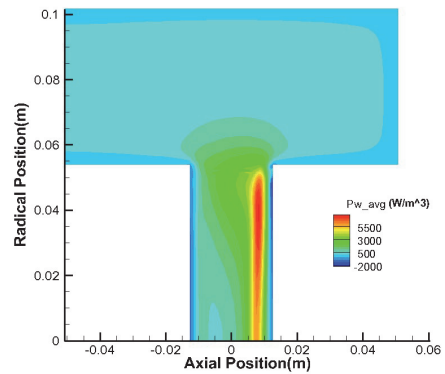


图 6 平均功率分布图

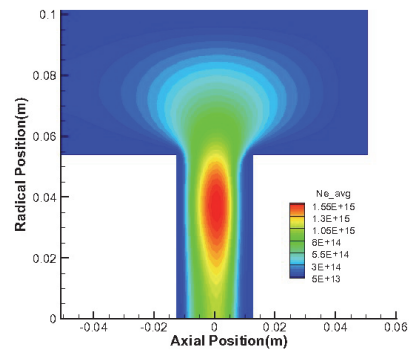


图 7 电子数密度

图 8 和图 9 分别对计算所得的平均电子数密度沿轴向(Axial Position=0m)和径向(Radical Position=0m)的变化趋势同实验结果<sup>[12]</sup>进行了比较。如图 8 所示，计算得到的平均电子数密度在径向的分布，不论是定性趋势还是定量数值，都与实验结果吻合较好。图 9 中则比较了平均电子数密度沿轴线分布的实验结果、Boeuf 的计算结果<sup>[3]</sup>及本文的计算结果。这里三组数据不同程度的表明电子数密度的最大处偏向于驱动电极，但计算结果在定量上小于实验结果。

究其原因，一方面，两个计算模型都只考虑  $\text{Ar}^+$  的直接电离，忽略了其他电离途径；另一方面，模型假设电子温度满足 Maxwell 分布，而实际电子温度偏离 Maxwell 分布，并且分布函数的高能部分对反应速率有显著影响。

图 10 为平均静电势(一个周期内的平均值)的分布。对比图 7 和图 10，可以发现，二者的变化趋势基本一致。同平均电子数密度一样，平均静电势的最大值出现电极边缘附近（高于轴线位置 2V 左右）。很多学者认为，平均电子数密度的最大值之所以偏离轴线，和电极边缘处电势分布不无联系。此外，计算得到的偏置电压（驱动电极的平均电势）为-58V,这与文献<sup>[3]</sup>的计算结果基本一致。

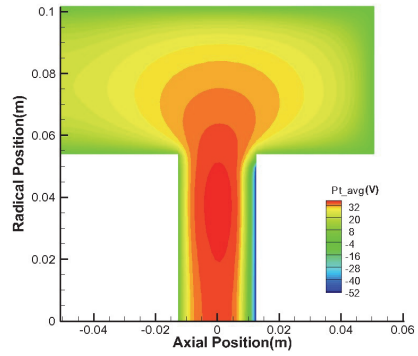


图 10 平均静电势

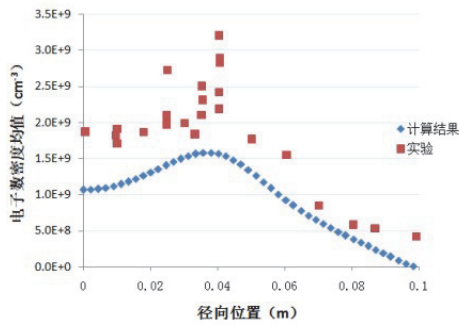


图 8 电子数密度径向分布比较

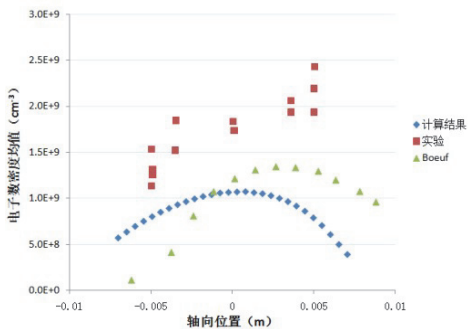


图 9 电子数密度轴向方向比较

此外，图 11 还比较了驱动电极附近电子和离子各自产生的平均电流密度。由图 11 可知，离子和电子的电流密度沿电极径向基本呈递增的趋势，并在绝缘层附近达到最大值。其中，离子电流密度在绝缘层附近迅速增加。同时，电子电流密度并不和离子电流密度保持完全一致。靠近轴线附近，离子电流密度大于电子电流密度；靠近绝缘层附近，电子电流密度大于离子电流密度。

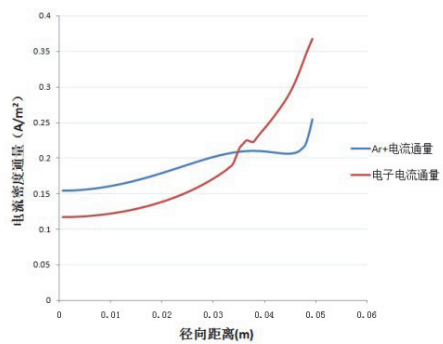


图 11 离子电流密度和电子电流密度

### 3.2 物性参数对电子数密度的影响

本文分别对  $\text{Ar}^+$  离子及电子的迁移率和扩散率的变化对平均电子数密度分布的影响进行了研究。

如图 12 所示，随着  $\text{Ar}^+$  离子迁移率的增大，平均电子数密度最大值逐渐减小，并且沿径向的分布趋势由双峰向单峰转变。观察驱动电极附近  $\text{Ar}^+$  粒子通量，可以发现，当迁移率增大时，电极附近电场强度的变化幅度远小于迁移率的变化幅度。这就导致  $\text{Ar}^+$  向电极的通量增大。同时，电子质量很小，对电场变化的响应快，从准中性假设可知，电子向电极的通量也会随之增大。从而电子数密度明显下降。图 13 则比较

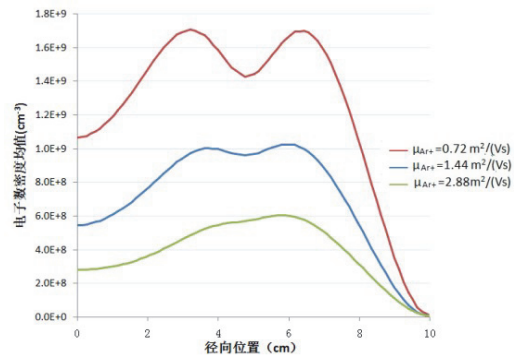


图 12 离子迁移率对平均电子数密度的影响



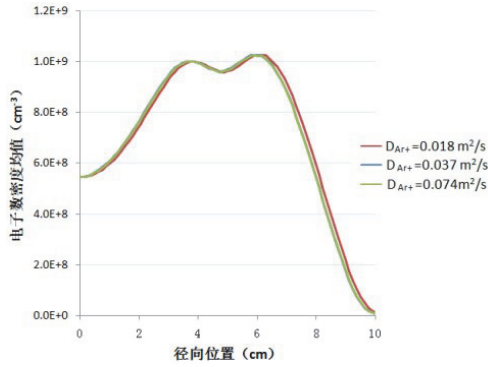


图 13 离子扩散率对平均电子数密度的影响

了  $\text{Ar}^+$  离子扩散率对平均电子数密度的影响。如图所示， $\text{Ar}^+$  离子扩散率对平均电子数密度的影响很小。这是因为在低速低气压情况下，带电粒子在电场作用下的迁移是其最主要的输运过程。相对于迁移，扩散对带电粒子输运的影响很小。

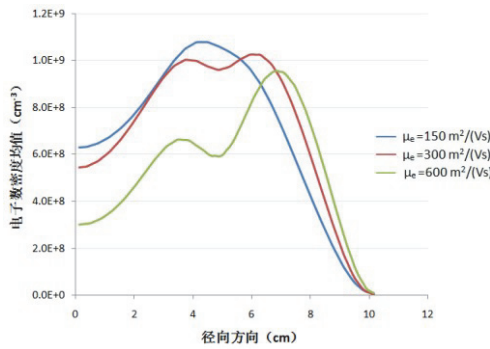


图 14 电子迁移率对平均电子数密度的影响

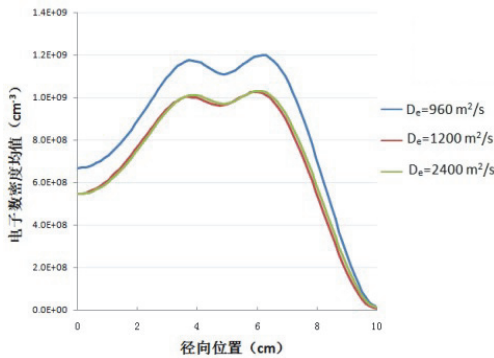


图 15 电子扩散率对平均电子数密度的影响

图 14 和图 15 分别比较了电子迁移率和电子扩散率对平均电子数密度的影响。由图 14 可知，随着电子迁移率的增加，电子数密度的分布趋势由单峰向双峰转变。同时，平均电子数密度的峰值减小。但电子迁移率对平均电子数密度的影响没有粒子迁移率那么明显。对于电

子扩散率的影响，由图 15 可知，虽然电子扩散率对平均电子数密度的影响也很有限，但相比粒子扩散过程，电子扩散已经开始在总的输运过程中起作用。这也可以从二者 Peclet 数的比较中给予解释。

### 3.3 化学反应机理对电子数密度的影响

化学反应机理同样对电子数密度有着相当的影响。

图 16 为反应  $\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^+ + 2e$  的平均反应速率，该反应是电子最主要的产生机制。由图可知， $\text{Ar}^+$  和电子主要在靠近驱动电极的一侧产生。图 17 比较了两种不同化学反应机理下驱动电极一侧电子数密度的分布情况。同仅考虑直接电离和激发两步化学反应相比，多步化学反应机理模拟得到的电子数密度分布更加均匀，且数值更大。这主要是因为  $\text{Ar}^*$  的两步电离和  $\text{Ar}^*$  之间的碰撞为电子的产生提供了更多途径。

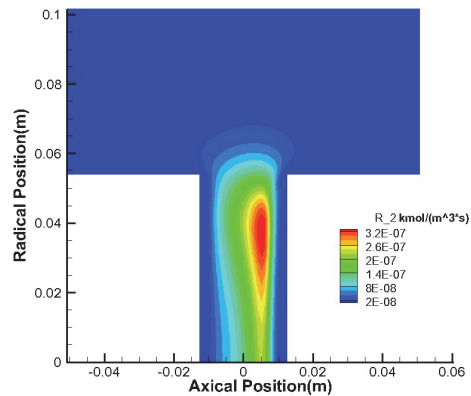


图 16 直接电离平均反应速率

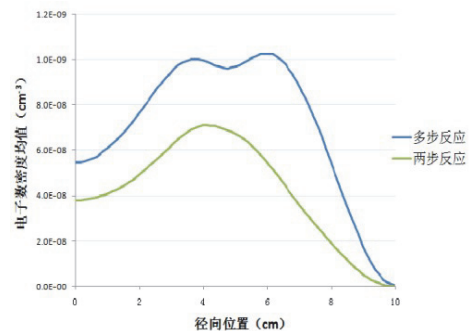


图 17 两种反应机理下电子数密度

## 4 结 论

本文采用两温度化学非平衡的流体模型对 GEC-CCP 发生器中 Ar 的放电及流动过程进行

了数值模拟，并与实验结果进行了比较，验证了计算结果的可靠性，得到的主要结论如下：

1) 在目前流量很小的情况下 (20sccm)，气体的整体流动对放电过程的影响很小。

2) 电子数密度的最大处是偏离轴线的，并且更接近驱动电极。

3) 电子在驱动电极的鞘层附近从电场获得大量能量。

4) 针对该算例，粒子迁移率对放电过程的影响较大。粒子迁移率的增加会导致电子数密度的明显下降。同时，电子数密度分布的趋势由双峰向单峰转变。

5) Ar 原子的直接电离是电子产生最主要的机制。但其他电离机制对氩气的电离也起到重要作用。

此外，因为假设电子能量满足 Maxwell 分布，计算得到的电子数密度比实验偏低。在未来的工作中，为了更好的模拟 GEC-CCP 中氩气的流动和放电过程，一方面需要更加准确合理的物性参数和反应机理，另一方面应考虑丰富和完善所涉及的物理过程。

#### 参考文献

1. V. Vahedi and M. Surendra, A Monte Carlo collision model for the Particle-in-cell method: applications to argon and oxygen discharges [J]. Computer Physics Communications (1995) 87: 179-198.

2. J.P. Verboncoeur, Particle simulation of plasmas: review and advances [J]. Plasma Phys. Control. Fusion (2005) 47: A231–A260.  
 3. J.P. Boeuf and L.C. Pitchford, Two-dimensional model of a capacitively coupled rf discharge and comparisons with experiments in the Gaseous Electronics Conference reference reactor [J]. Physical Review E, (1995) 51(2):1374-1390.  
 4. D.P. Lymberopoulos and D.J. Economou, Two-dimensional self-consistent radio frequency plasma simulations relevant to the Gaseous Electronics Conference rf reference cell [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. (1995) 100(4): 473-494.  
 5. M.J. Kushner, Modeling of microdischarge devices: pyramid structures [J]. Journal of Applied Physics, (2003)95(3): 846-859  
 6. H.C. Kim, F. Iza, S.S. Yang and J.K. Lee, Particle and fluid simulations of low-temperature plasma discharges: benchmarks and kinetic effects [J]. J. Phys. D: Appl. Phys. 38(2005) R283-R301  
 7. T.W. Megli, H. Krier and R.L. Burton, Plasmadynamics model for nonequilibrium process in N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> arcjet, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 10(4), 1996  
 8. Y-R Zhang, X. Xu, and Y-N Wang, Fluid simulation for influence of metastable atoms on the characteristics of capacitively argon plasmas [J]. Physics of Plasma (2010)17. 033507  
 9. H-X Wang, J-Y Geng, X Chen, W-X Pan, A.B. Murphy, Modeling study on the flow, heat transfer and energy conservation characteristics of low-power arc-heated hydrogen/nitrogen thruster, Plasma Chem Plasma Process(2010) 30: 707-731  
 10. 陈熙, 热等离子体传热与流动 [M], 清华大学, 2009  
 11. P.M. Meijier, W.J. Goedheer, and J.D.P. Passchier, Phys. Rev. A 45,1098(1992)  
 12. L.J. Overzet and M.B. Hopkins, J. Appl. Phys. 74, 4323(1993).  
 13. ESI Group, CFD-ACE+ Modules Manual (2009).

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE PLASMA FLOW IN THE GEC-CCP REACTOR

YANG Bijie<sup>1</sup>, ZHOU Ning<sup>2</sup>, SUN Quanhua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

<sup>2</sup> Advanced Micro-Fabrication Equipment Inc, Pudong district, Shanghai 201201, China

**Abstract** Argon discharge and flow in the GEC-CCP plasma generator is numerically investigated using a fluid model including thermal non-equilibrium and chemical non-equilibrium physics. The good agreement with experimental data shows the validity of the model. In addition, the effects of the transport parameters and chemical mechanisms on the flow details are investigated, which demonstrates the importance of these physical processes in the plasma flow.

**Key words** low-temperature plasma, non-equilibrium flow, fluid model, argon discharge