

## 棒-板电极下缩比气隙辉光放电相似性的仿真研究\*

付洋洋 罗海云 邹晓兵 王强 王新新†

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

(2013年11月13日收到; 2014年1月16日收到修改稿)

建立了棒-板电极下氩气直流放电的流体模型, 利用有限元法对几何位形相似的两个气隙放电过程进行了数值求解. 两放电气隙外加电压相同, 气隙线性尺寸的比值为10:1, 气压分别为1 Torr 和10 Torr. 仿真得到了两相似气隙的放电的伏安特性曲线以及放电物理量(如电位、电场、电子密度、离子密度、电子温度等)的空间分布. 根据气体放电相似性的基本结论, 检验了气隙对应物理量之间的数值关系. 结果表明: 两相似气隙的放电类型为正常辉光放电, 对应放电物理量之间存在相似性理论指出的比例关系, 且在相同幅值的直流电压作用下, 气隙放电的工作点相同. 这将为利用气体放电相似性来外推相似气隙的放电特性提供一定的理论依据.

**关键词:** 放电相似性, 辉光放电, 棒-板电极, 缩比气隙

**PACS:** 52.80.Hc, 52.65.-y, 51.50.+v

**DOI:** 10.7498/aps.63.095206

## 1 引言

辉光放电是一种典型的非热平衡低温等离子体, 它在杀菌、刻蚀、表面处理等领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>. 尽管人们对辉光放电的研究已经进行一百多年了, 时至今日, 仍然有许多问题没有得到解决. 例如, 国际上正在进行的大型科学合作项目“国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)计划”, 就需要在较低气压下利用辉光放电产生等离子体对聚变腔体的真空壁进行处理, 以清除装置内壁的杂质(如碳、氧等), 从而保证聚变等离子体的纯度以及约束稳定性<sup>[4-6]</sup>.

国际上利用辉光放电来清洗受控核聚变装置内壁表面杂质已有几十年的历史, 其基本过程是放电产生的大量正离子在电场作用下向阴极(器壁)运动, 利用高能离子轰击阴极表面, 使得器壁吸附的杂质从器壁解析逸出并被真空机组抽出腔体, 这种清洗方式被称为辉光放电清洗(Glow Discharge

Cleaning, GDC)<sup>[7,8]</sup>. GDC系统是ITER装置的重要部件, 主要功能就是利用辉光放电清除装置因暴露在大气中所吸附的 $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ 以及其他碳氢化合物等杂质, 为高约束性能等离子体提供清洁的第一壁, 提高核聚变效率. 国内外一些大型装置(如EAST等)的研究表明, 利用辉光放电清洗聚变反应腔体可以取得良好效果, 杂质残余量可以得到大大改善<sup>[9,10]</sup>. 然而, 对于ITER装置中的GDC系统, 由于反应腔体的设计限制, 用于清洗的阳极只能使用几个面积有限的探头, 整个被清洗的腔体内壁作为放电阴极, 要在放电位形如此不对称的装置中实现大面积稳定的清洗效果, 很多问题还有待研究. 同时, 由于装置的惟一性以及其他同等装置的稀缺性, 直接在反应腔体上进行实验研究受到诸多限制. 总而言之, 在ITER这种巨型装置的内壁中实现可靠、稳定的大面积辉光放电清洗是一个难题.

本文提出一种间接的研究方法, 即根据气体放电相似性, 利用缩比气隙的放电特性来外推原型机的放电特性. 气体放电的相似性理论在推导中主要以电子碰撞电离为基础, 忽略一些如逐级电离等次

\* 国家自然科学基金(批准号: 51377095, 51107067)、全国优博论文专项资金(批准号: 201336)和霍英东教育基金会(批准号: 2142019)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangxx@mail.tsinghua.edu.cn

要的放电基本过程, 相似性放电结论的有效性在实际情况中还有待验证. 作为研究的初步, 本文采用气体放电的流体模型对一组相似气隙(几何位形相同, 大小成比例)的放电过程进行了数值模拟. 考虑GDC系统中的阳极面积远小于阴极表面积, 设定阳极为棒电极, 阴极为板电极. 仿真得到了原气隙与缩比气隙放电稳定时电位、电场、电子密度、离子密度、电子温度等放电物理量的空间分布, 并对缩比气隙与原气隙放电物理量之间的数值关系进行了检验.

## 2 理论模型

### 2.1 放电模型的结构

图1为本文所采用的放电系统结构. 其中,  $U_{DC}$  为直流电压源;  $R$  为可调电阻;  $I$  为放电电流; 虚线部分为放电空间的气体边界.

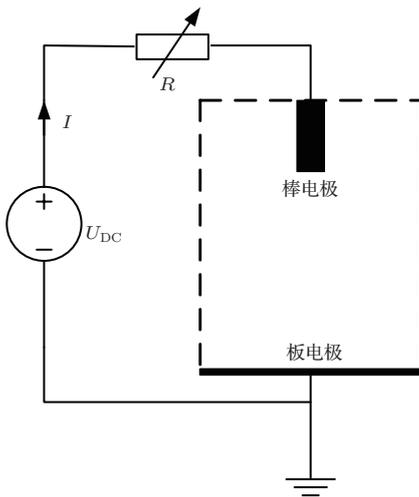


图1 气体放电系统结构

原气隙与缩比气隙的电极位形如图2所示. 其中, 棒电极为圆柱形, 半径为  $r_1$ , 电极长度为  $h_1$ ; 板电极为圆盘形, 半径为  $r_2$ , 不计板电极厚度. 原气隙与缩比气隙的几何尺寸比例关系为 10 : 1, 即在空间任一维度上, 缩比气隙的尺寸仅为原气隙的 1/10, 该缩比气隙的体积仅为原型机的 1/1000. 气隙的几何尺寸和气压  $p$  具体数值见表1. 定义相似气隙的几何线性尺寸的比值  $k$  为缩比系数, 故本文的缩比系数  $k$  等于 10. 根据气体放电相似性的基本理论, 相似放电时气隙对应的物理量(如电位、场强、电子密度等)之间应该满足表2的关系. 这些结论在推导过程中进行了一定的简化, 同时受不同条

件(如缩比系数  $k$ 、电极位形、气压范围等)的影响, 表2中的比例关系并不完全成立, 所以在利用相似性放电进行外推时有必要对其结论的有效性进行检验.

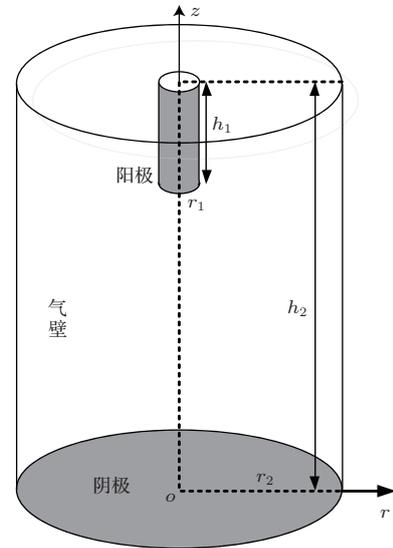


图2 气隙结构示意图

表1 放电气隙基本参量

| 原气隙                     | 缩比气隙                    |
|-------------------------|-------------------------|
| $r_1 = 2.5 \text{ cm}$  | $r_1 = 0.25 \text{ cm}$ |
| $h_1 = 12.5 \text{ cm}$ | $h_1 = 1.25 \text{ cm}$ |
| $r_2 = 20 \text{ cm}$   | $r_2 = 2 \text{ cm}$    |
| $h_2 = 50 \text{ cm}$   | $h_2 = 5 \text{ cm}$    |
| $p = 1 \text{ Torr}$    | $p = 10 \text{ Torr}$   |

$$1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa.}$$

表2 相似放电的物理量关系 [11,12]

| 序号              | 物理量    | 数量关系                  |
|-----------------|--------|-----------------------|
| SL <sub>1</sub> | 电位     | $U_1 = U_2$           |
| SL <sub>2</sub> | 电场     | $E_1 = E_2/k$         |
| SL <sub>3</sub> | 电子密度   | $N_{e1} = N_{e2}/k^2$ |
| SL <sub>4</sub> | 离子密度   | $N_{i1} = N_{i2}/k^2$ |
| SL <sub>5</sub> | 放电电流   | $I_1 = I_2$           |
| SL <sub>6</sub> | 带电粒子速度 | $V_1 = V_2$           |
| SL <sub>7</sub> | 电子温度   | $T_{e1} = T_{e2}$     |

### 2.2 模型的数学描述

气体放电是由电子、离子在电场作用下与分子相互作用而产生的一系列物理化学过程, 目前多采用流体模型对气体放电过程进行描述 [13,14]. 对于氩气直流放电模型, 主要考虑电子  $e$ 、正离子  $Ar^+$  和

激发态粒子 Ar\* 三种粒子参与的反应过程. 激发态粒子 Ar\* 包括亚稳态和共振态, 但二者的能级相近, 且容易相互转化, 因此将二者统一为亚稳态粒子 Ar\*[15]. 上述粒子的运动用连续性方程描述, 包括: 电子运输方程、电子能量运输方程和重离子运输方程 [16,17].

电子运输方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e, \quad (1)$$

$$\Gamma_e = -n_e(\mu_e \cdot \nabla U) - D_e \cdot \nabla n_e, \quad (2)$$

其中,  $n_e$  为电子密度,  $R_e$  为电子产生和消失的反应源项,  $\Gamma_e$  为电子通量,  $\mu_e$  为电子迁移率,  $U$  为空间电位,  $D_e$  为电子扩散率.

电子能量运输方程为

$$\frac{\partial n_\epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_\epsilon + e\Gamma_e \cdot \nabla U = R_\epsilon, \quad (3)$$

$$\Gamma_\epsilon = -n_\epsilon(\mu_\epsilon \cdot \nabla U) - D_\epsilon \cdot \nabla n_\epsilon, \quad (4)$$

其中,  $n_\epsilon$  为电子能量密度,  $R_\epsilon$  为电子由于非弹性碰撞引起的能量变化,  $e$  为元电荷,  $\Gamma_\epsilon$  为电子能量通

量,  $\mu_\epsilon$  为电子能量迁移率,  $D_\epsilon$  为电子能量扩散率.

放电气隙中, 除电子外还有离子、亚稳态原子等重粒子, 其运动过程可以用重粒子运输方程描述

$$\rho \frac{\partial w_k}{\partial t} + \nabla \cdot j_k = R_k, \quad (5)$$

$$j_k = \rho w_k v_k, \quad (6)$$

其中,  $\rho$  为混合气体密度,  $w_k$  为第  $k$  种粒子的质量分数,  $j_k$  为第  $k$  种粒子的扩散质量通量,  $R_k$  为第  $k$  种粒子的反应源项.

放电气隙的电位分布满足泊松方程 [18]

$$\epsilon_0 \epsilon_r \nabla^2 U = -e(n_i - n_e), \quad (7)$$

其中,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_r$  为气体相对介电常数,  $n_i$  为正离子密度.

表 3 为方程 (1)–(6) 所涉及的化学反应,  $e'$  为高能电子,  $e_s$  为慢电子.  $R_1$ – $R_5$  的粒子反应速率可由电子碰撞的截面数据  $\sigma_1$ – $\sigma_3$  和 Townsend 电离系数  $\alpha_1$ – $\alpha_2$  计算得到 [19].

表 3 放电模型的粒子反应

| 编号             | 反应方程                                    | 反应系数   | 参考文献 |
|----------------|---|--|------|
| R <sub>1</sub> | $e + Ar \rightarrow e + Ar$             | $\sigma_1$   | [20] |
| R <sub>2</sub> | $e + Ar^* \rightarrow e' + Ar$          | $\sigma_2$   | [20] |
| R <sub>3</sub> | $e + Ar \rightarrow e' + e_s + Ar^+$    | $\sigma_3$   | [20] |
| R <sub>4</sub> | $e + Ar \rightarrow e + Ar^*$           | $\alpha_1$   | [21] |
| R <sub>5</sub> | $e + Ar^* \rightarrow 2e + Ar^+$        | $\alpha_2$   | [21] |
| R <sub>6</sub> | $Ar^* + Ar^* \rightarrow e + Ar + Ar^+$ | $6.3 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | [22] |
| R <sub>7</sub> | $Ar^* + Ar \rightarrow Ar + Ar$         | $2.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | [22] |

### 2.3 边界条件

由于放电区域为三维轴对称空间, 考虑用二维  $r$ - $z$  圆柱坐标系进行求解, 放电求解区域如图 3 所示. 其中, 边界  $c$ - $d$ - $e$  为阳极,  $o$ - $a$  为阴极,  $a$ - $b$ - $c$  为气体边界,  $o$ - $e$  为中心轴. 对于阳极边界  $c$ - $d$ - $e$ , 其电位大小为  $U$ , 根据图 1 的电路可知  $U = U_{DC} - IR$ , 设定电子、离子、亚稳态粒子碰撞阳极后立即被表面吸附 [23]. 对于阴极边界  $o$ - $a$ , 设定其电位为 0, 正离子碰撞阴极板发射二次电子是维持辉光放电的重要过程, 二次电子发射系数为 0.1 [24]. 对于非电极边界  $a$ - $b$ - $c$ , 设定亚稳态和正离子与其碰撞后被全部吸收. 由于低气压下辉光放电气体温度接近室温, 设定气体温度为 300 K.

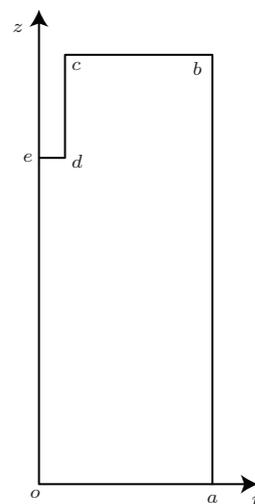


图 3 放电求解域

### 3 结果与讨论

本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对方程 (1)–(7) 进行了全耦合求解. 采用时间向后微分公式 (BDF) 对方程进行离散, 该方法可以实现自动变步长与误差预估. 由于方程离散结果为大量的稀疏线性方程, 选择适用于稀疏矩阵的求解器 MUMPS 进行求解. 放电模型中耦合了电子温度  $T_e$ , 并考虑了外电路参数对气隙放电的影响.

#### 3.1 相似气隙的伏安特性

为研究原气隙与缩比气隙放电的伏安特性, 设定一组不同的外加电压  $U_{DC}$  来调节气体放电的工作点,  $U_{DC}$  的取值分别为 200 V, 300 V, 400 V, 500 V, 600 V, 700 V, 800 V, 900 V, 1000 V, 电阻  $R$  等于 500 k $\Omega$ . 图 4 为仿真得到的原气隙与缩比气隙的伏安特性曲线. 可以发现, 随着放电电流的增加, 气隙电压基本保持不变. 尽管增加了电源电压, 但增加的电压主要负担在外电阻  $R$  上. 由辉光放电的伏安特性曲线可知, 该放电属于正常辉光放电范围. 根据仿真计算结果, 气隙放电电流的大小为毫安量级, 与文献 [25] 给出的辉光放电电流的量级一致. 同时, 在相同幅值的外加电压作用下, 原气隙与缩比气隙对应的放电电流大小相同, 且两气隙的伏安特性曲线基本相同.

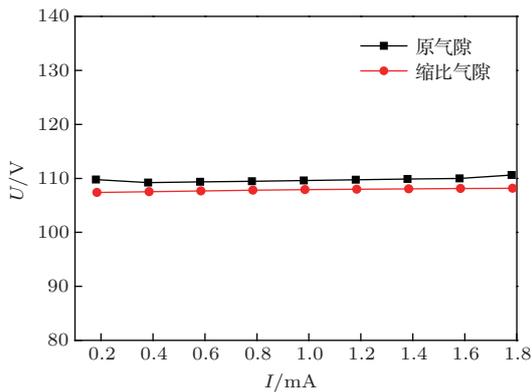


图 4 相似气隙的伏安特性曲线

图 5 所示为  $U_{DC}$  为 300 V, 500 V, 700 V, 900 V 时, 两气隙阴极表面电流密度沿径向的分布曲线. 缩比气隙电流密度大小比原气隙高两个数量级, 并且随着外加电压的增大, 电流密度的峰值基本保持不变, 电流密度的分布区域由中心向边界扩充,

这是正常辉光放电阴极表面电流密度分布的显著特征.

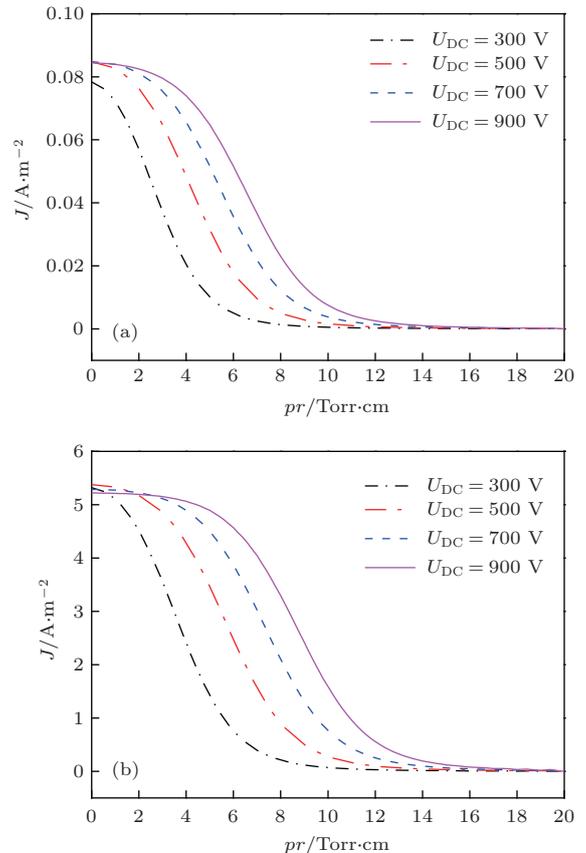


图 5 (网刊彩色) 不同外加电压下阴极表面电流密度分布 (a) 原气隙; (b) 缩比气隙

#### 3.2 放电参量数值关系的检验

为确定表 2 中的结论对于棒-板电极放电的有效性, 对外加电压  $U_{DC} = 300$  V 时两相似气隙放电物理量之间的数值关系进行了对比分析.

图 6 为原气隙与缩比气隙的空间电位的二维分布. 从电位分布位形上看, 主要的电位降处于阴极附近, 在阴极附近形成一个明显的阴极位降区, 这是辉光放电的典型特征. 由于考虑了粒子的径向运动以及棒-板电极位形下电场分布的不均匀性, 在不同径向位置  $r$  处电位沿轴向的分布并不相同. 阴极中心的阴极位降区  $d_c$  的长度最小, 电极边缘位置电位沿轴向变化较电极中心位置缓慢. 从二维电位分布的轮廓上看, 原气隙与缩比气隙的空间电位分布基本一致. 为进一步检验两气隙的空间电位分布的关系, 图 7 给出了棒-板电极沿轴向“空间位置  $pz$ ” (Torr·cm) 的电位分布. 根据辉光放电理论, 阴极位降区  $d_c$  的大小主要取决于气体种类和电极材料,  $pd_c$  的数值对应 Paschen 曲线的最低

点, 即  $pd_c = (pd)|_{V_b = V_{bmin}}$ . 可以发现, 原气隙与缩比气隙的阴极位降区对应的  $pd_c$  (约 2.6 Torr·cm) 数值近似相同, 这说明两气隙放电稳定时对应于 Paschen 曲线中的工作点相同. 仿真得到的相似气隙的电压分别为 109.22 V 和 107.52 V, 二者数值相近, 并且两气隙轴向的电位分布曲线基本重合, 所以电位分布满足相似性放电给出的结论.

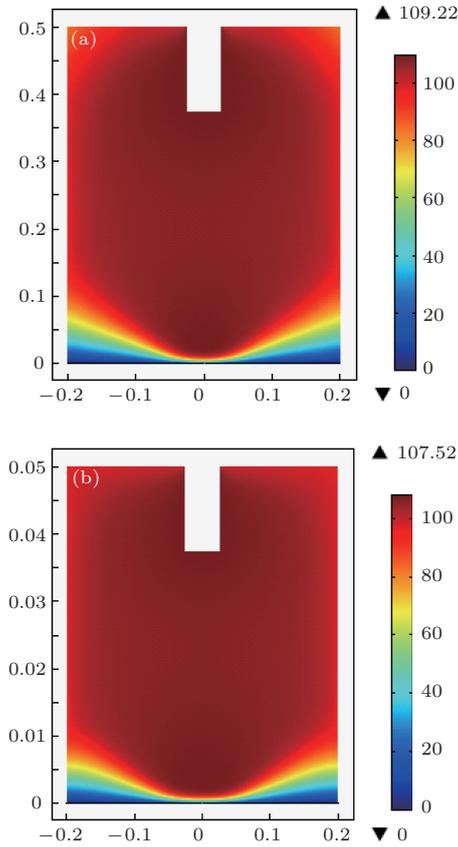


图6 (网刊彩色) 气隙的空间电位分布 (a) 原气隙(单位: V); (b) 缩比气隙(单位: V)

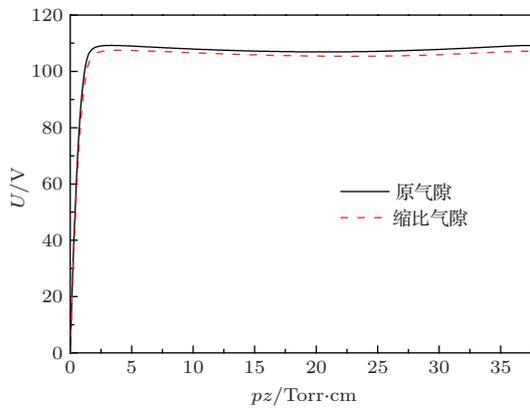


图7 相似气隙轴向电位分布

图8为两气隙的电场沿空间  $pz$  的分布曲线.

可以发现, 原气隙与缩比气隙在阴极附近均存在高场强区域, 并且该场强与  $pz$  呈现线性递减关系. 在  $pz \geq 2.6$  Torr·cm 处场强下降到很小的数值 (低于最值大小的 0.1%), 这与电位变化特征是一致的. 根据表 2, 缩比气隙的场强理论上是原气隙场强的  $k$  倍. 当在缩比系数  $k$  ( $k = 2$  或  $3$ ) 较小时, 计算结果与理论关系一致 [26]. 根据本文的计算结果, 原气隙的最大场强为  $144.98 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 缩比气隙的最大场强为  $1285.98 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 二者的比值为  $1 : 8.87$ . 该比值与表 2 中指出的  $1 : k$  ( $k = 10$ ) 的理论关系存在一定偏离, 这可能与表 3 中涉及的快中性粒子转化为离子电荷转移反应过程  $R_6$  相关. 根据放电相似性理论,  $R_6$  属于相似性放电不允许发生的基本过程, 当缩比系数  $k$  较大时, 这一反应过程对相似性的数值关系产生的影响更加明显.

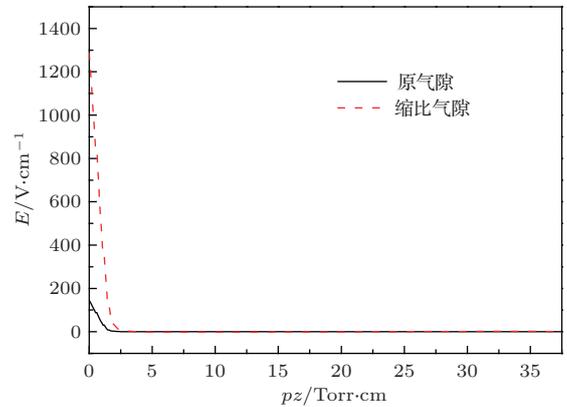


图8 相似气隙轴向电场分布

图 9 为原气隙与缩比气隙的电子密度分布, 两气隙的电子密度峰值均处于阴极中心附近, 这与上文中电流密度集中在阴极中心是一致的. 尽管两气隙的几何尺寸相差 10 倍, 但电子密度的空间分布位形相似. 图 10 为电子密度、离子密度的轴向分布, 可以发现, 在阴极附近处, 两气隙的离子密度均远大于电子密度, 形成一个正的空间电荷区, 这将导致阴极附近电场畸变从而形成高场强区. 在阳极的前端, 气隙中存在明显的等离子体正柱区, 即电子密度与离子密度相等且近似为常量, 从而形成一个准电中性的放电区域. 根据表 2, 缩比气隙的带电粒子密度应该为原气隙的  $k^2$  ( $k^2 = 100$ ) 倍. 在相同空间位置  $pz$  处, 缩比气隙中的电子密度与离子密度比原气隙中大两个数量级. 以正柱区 (取  $pz = 30$ ) 的电子密度为例, 缩比气隙正柱区的电子密度为  $1.64 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ , 原气隙正柱区的电子密度

为  $1.51 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ , 二者的比例关系为  $10.4^2 : 1$ . 就峰值而言, 缩比气隙的峰值为  $2.67 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ , 原气隙的峰值为  $2.67 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ , 电子密度均满足  $k^2$  的比例关系.

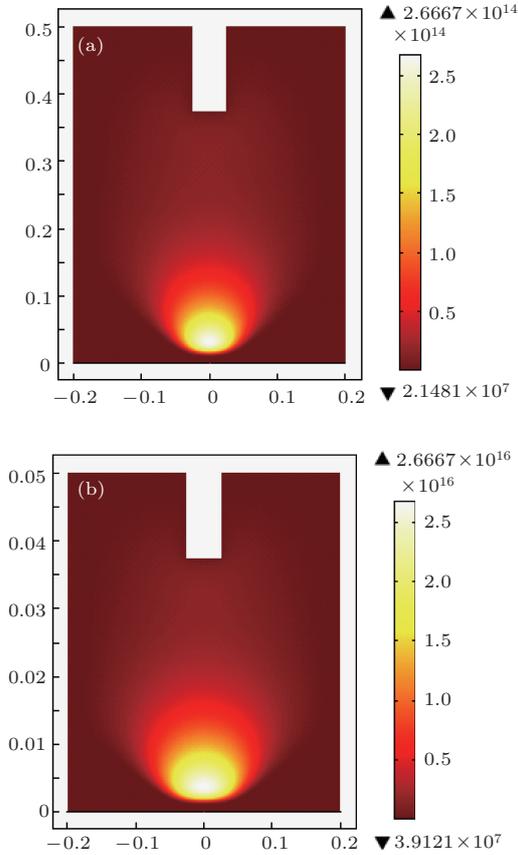


图9 (网刊彩色) 相似气隙电子密度空间分布 (a) 原气隙 (单位:  $\text{m}^{-3}$ ); (b) 缩比气隙 (单位:  $\text{m}^{-3}$ )

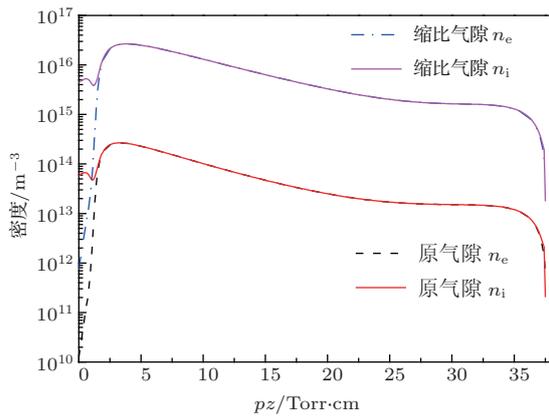


图10 相似气隙电子密度和离子密度沿轴向分布

由于辉光放电自持的主要机理是依靠正离子轰击阴极表面发射出二次电子, 阴极表面的离子电流占据了放电电流的主要部分, 因此阴极附近的离子运动对于放电至关重要. 图 11 为原气隙与缩

比气隙中阴极表面正离子速度沿径向位置  $pr$  的分布. 根据气体放电理论, 离子的加速效果很大程度上取决于气隙的折合电场  $E/p$ . 若原气隙与缩比气隙的  $E/p$  的空间分布相同, 气隙所对应的离子速度分布也应该是相同的. 由图 11 可以发现, 离子速度的峰值位于阴极中心处, 沿着电极中心到边缘位置离子速度递减. 两气隙对应的离子速度峰值分别为  $8379.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $7499.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最低值分别为  $802.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $1012.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 两气隙离子速度分布曲线相近, 可以认为两气隙的离子速度分布近似相同.

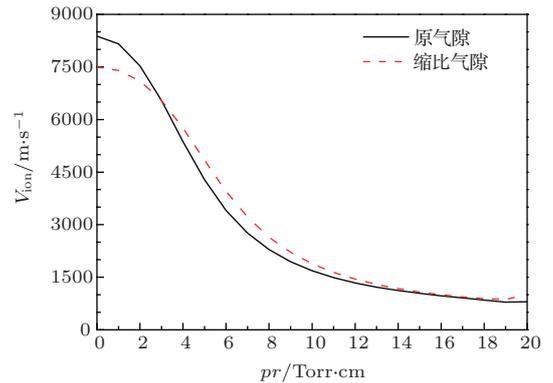


图11 阴极表面离子速度分布

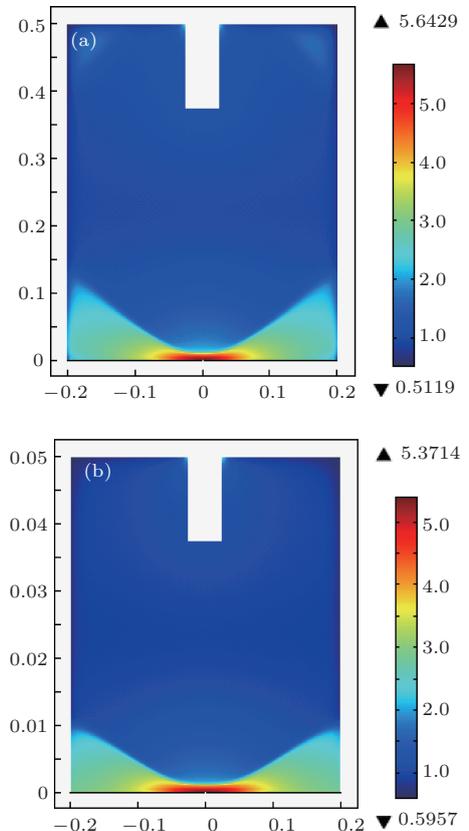


图12 (网刊彩色) 相似气隙的电子温度分布 (a) 原气隙 (单位: eV); (b) 缩比气隙 (单位: eV)

图 12 为原气隙与缩比气隙电子温度的空间分布. 两气隙电子能量较高的区域均集中在阴极中心附近, 这一区域为气隙的高场强区, 电子经过电场的加速, 在一个自由程内从电场中获得较高的能量  $E\lambda$ , 使得这些电子获得了足够的能量与气体原子发生碰撞电离. 图 13 为气隙电子温度沿轴  $pz$  的分布曲线, 原气隙与缩比气隙电子温度的峰值分别为 5.64 eV 和 5.37 eV, 而在正柱区中电子温度稳定在 1 eV 左右. 这是由于电子经过大量的非弹性碰撞后能量迅速减少, 且正柱区中场强较小, 电子从电场中获得的能量有限, 电子温度基本相同. 仿真得到的原气隙与缩比气隙的电子温度分布曲线基本重合, 与表 2 中指出的电子温度关系一致.

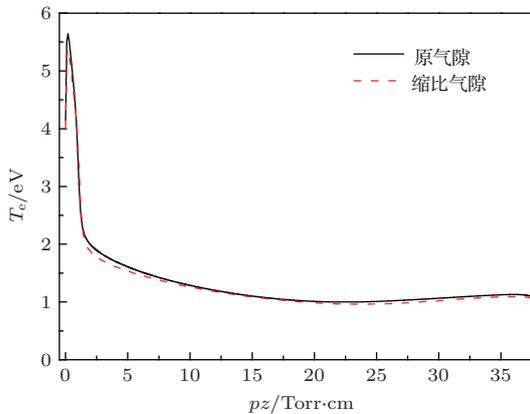


图 13 相似气隙电子温度沿轴向分布

## 4 结 论

本文建立了棒-板电极下氩气直流放电的流体模型, 利用有限元法对两个相似气隙的放电过程进行了数值求解. 两气隙的放电类型均为典型的辉光放电, 且放电工作点处于正常辉光放电区域. 原气隙与缩比气隙的放电物理量(如电位、场强、电子密度、离子密度、离子速度、电子温度)基本满足相似性放电给出的数值关系; 原气隙与缩比气隙存在相同的伏安特性, 与相似性放电的推导结果一致. 利用气体放电的相似性来外推大型装置放电特性将大大降低研究成本, 然而当缩比系数  $k$  较大时, 缩比气隙与原气隙的放电物理量之间的数值关系可能与理论存在偏差, 某些物理过程(如中性粒子的电荷转移过程)对相似性放电影响明显, 相似性基本结论的有效性及其适用范围还需要通过实验进行定量研究.

## 参考文献

- [1] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer-Verlag) pp76–239
- [2] Massines F, Gouda G 1998 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31** 3411
- [3] Roth J R 2001 *Industrial Plasma Engineering. Volume II—Applications to Non-Thermal Plasma Processing* (Bristol: Institute of Physics) pp1–2
- [4] Wang Z W, Yan D H, Wang E Y 2002 *Plasma Sci. Technol.* **4** 1165
- [5] Tomabechi K, Gilleland J R, Sokolov Y A, Toschi R, ITER Team 1991 *Nucl. Fusion* **31** 1135
- [6] Li J, Shimada M, Zhao Y, Hu J, Gong X, Yu Y W, Zhuo G Z 2011 *J. Nucl. Mater.* **415** S35
- [7] Shimada M, Pitts R A 2011 *J. Nucl. Mater.* **415** S1013
- [8] Antipenkov A B, Ladd P, Marrs R 2001 *Fusion Eng. Des.* **56** 233
- [9] Kim K M, Yang H L, Hong S H, Kim S T, Kim H T, Kim K P, Lee K S, Kim H K, Bak J S, Kstar Team 2009 *Fusion Eng. Des.* **84** 1026
- [10] Li J H, Hu J S, Wang X M, Yu Y W, Wu J H, Wang H Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 205203 (in Chinese)[李加宏, 胡建生, 王小明, 余耀伟, 吴金华, 陈跃, 王厚银 2012 物理学报 **61** 205203]
- [11] Xu X J, Zhu D C 1996 *Gas Discharge Physics* (Shanghai: Fudan University Press) pp75–80 (in Chinese) [徐学基, 诸定昌 1996 气体放电物理 (上海: 复旦大学出版社) 第75—80页]
- [12] Janasek D, Franzke J, Manz A 2006 *Nature* **442** p374
- [13] Lymberopoulos D P, Economou D J 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 3668
- [14] Passchier J D P, Goedheer W J 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 3744
- [15] Shao X J, Ma Y, Li Y X, Zhang G X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 045205 (in Chinese) [邵先军, 马跃, 李娅西, 张冠军 2012 物理学报 **61** 045205]
- [16] Sima W X, Peng Q J, Yang Q, Yuan T, Shi J 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat.* **19** 660
- [17] Liu X H, He W, Yang F, Wang H Y, Liao R J, Xiao H G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075201
- [18] Bogaerts A, Gijbels R 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 4124
- [19] Hagelaar G J M, Pitchford L C 2005 *Plasma Sources Sci. Technol.* **14** 722
- [20] Hyman H A 1979 *Phys. Rev. A* **20** 855
- [21] Fiala A, Pitchford L C, Boeuf J P 1994 *Phys. Rev. E* **49** 5607
- [22] Yamabe C, Buckman S J, Phelps A V 1983 *Phys. Rev. A* **27** 1345
- [23] Farouk T, Farouk B, Staack D, Gutsol A, Fridman A 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** 676
- [24] Bogaerts A, Gijbels R 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3743
- [25] Franzke J 2009 *Anal. Bioanal. Chem.* **395** 549
- [26] Fu Y Y, Luo H Y, Zou X B, Liu K, Wang X X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 205209 (in Chinese) [付洋洋, 罗海云, 邹晓兵, 刘凯, 王新新 2013 物理学报 **62** 205209]

# Simulation on similarity law of glow discharge in scale-down gaps of rod-plane electrode configuration\*

Fu Yang-Yang Luo Hai-Yun Zou Xiao-Bing Wang Qiang Wang Xin-Xin<sup>†</sup>

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

( Received 13 November 2013; revised manuscript received 16 January 2014 )

## Abstract

A fluid model of direct-current (DC) discharge in argon atmosphere between the gaps of rod-plane electrode configuration was established, and the discharge models of two geometrically similar gaps were solved using the finite-element method, respectively. The dimension ratio of the gaps was set as 10 : 1, and the gas pressure was  $\sim 133.3$  Pa for the prototype and  $\sim 13.3$  Pa for the scale-down gap; to the gaps the same DC voltages were applied. Voltage-current characteristics, as well as the physical discharge parameters (such as electric potential, electric field, electron density, ion density, and electron temperature) were obtained. Relations between parameters of the two gaps were investigated according to the theoretical relations derived by similarity law. Simulation results show that the discharge type in the two similar gaps is verified as a normal glow discharge; the parameter relations are in good agreement with the similarity law, and the working points of discharges are identical in similar gaps with the same applied DC voltage. This study could offer theoretical instruction in extrapolating the discharge properties for similar gaps.

**Keywords:** discharge similarity, glow discharge, rod-plate electrode, scale-down gap

**PACS:** 52.80.Hc, 52.65.-y, 51.50.+v

**DOI:** [10.7498/aps.63.095206](https://doi.org/10.7498/aps.63.095206)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51377095, 51107067), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No.201336), and the Fok Ying Tung Education Foundation (Grant No. 2142019).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wangxx@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:wangxx@mail.tsinghua.edu.cn)