

缩比间隙中辉光放电相似性的初步研究*

付洋洋 罗海云 邹晓兵 刘凯 王新新†

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

(2013年5月7日收到; 2013年6月14日收到修改稿)

为了研究缩比实验在气体放电中的有效性, 对缩比间隙中的低气压氩气放电进行了数值模拟. 根据气体放电相似性的猜想, 如果间隙气压 p 和间隙距离 d 的乘积为常量, 即 $p_1 d_1 = p_2 d_2$, 并且约化电场 E/p 在两个间隙中的空间分布相同, 那么这两个放电间隙的放电特性存在相似性. 数值模拟中设置三个缩比间隙: 间隙 A 的长度为 30 mm, 气压为 1 Torr (1 Torr = 133.322 Pa); 间隙 B 的长度为 15 mm, 气压为 2 Torr; 间隙 C 的长度为 10 mm, 气压为 3 Torr. 仿真结果表明, 三个间隙均为辉光放电, 并存在明显的阴极位降区. 间隙 A, B, C 的阴极位降区的厚度 d_C 分别为 2.71, 1.35 和 0.87 mm, 相对应的 pd 值几乎相同, 即 $pd_C \approx 2.70$ Torr·mm. 这与氩气辉光放电 Paschen 曲线最低点 ($pd \approx 2.86$ Torr·mm) 相近. 缩比间隙的放电参数的特性 (如工作电压、电场、电流密度、电子密度和离子密度的沿“空间” px 的分布) 的数值计算结果与放电相似性猜想所预计的结果一致. 所以, 可以认为放电相似性猜想适用于低气压氩气缩比间隙的辉光放电.

关键词: 放电相似性, 辉光放电, 缩比间隙

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

DOI: 10.7498/aps.62.205209

1 引言

辉光放电是低气压下最常见的一种气体放电形式, 其典型的外观特征是: 放电发出柔和的光, 并充满两个电极之间的气体空间^[1]. 人们对辉光放电的研究已经进行了一百多年, 对其放电特性有了比较充分的了解. 时至今日, 辉光放电仍然有许多应用^[2], 并且随着这些应用的进行, 又出现了许多和辉光放电特性相关的问题需要进一步研究. 例如, 在受控核聚变研究装置托克马克 (Tokamak) 运行一段时间后, 人们必须将装置停下来, 然后用辉光放电对放电室气壁表面进行清洗, 即所谓的 GDC (glow discharge cleaning), 以减小放电等离子体中杂质的含量, 达到提高聚变产额的目的^[3-5]. 目前, 最大的国际科学研究合作项目 ITER (International Thermal Nuclear Reactor)^[6] 正在筹建巨形的托克马克装置, 其中的问题之一就是面积有限的几个辉光放电电极 (阳极) 产生的辉光放电能否覆盖轮胎状

(大半径 6.2 m, 小半径 2.0 m)^[7] 的放电室内壁表面. 人们考虑是否可能用一个按比例缩小尺寸的装置 (即所谓的缩比装置), 来模拟 ITER 装置清洗时的辉光放电情况.

针对这个问题, 本文基于气体放电理论中放电相似性的猜想^[8,9], 采用气体放电中的一维流体模型, 对三个相似性间隙的辉光放电进行了数值模拟. 根据计算结果对辉光放电相似性问题进行了初步探讨, 并提出了需要进一步研究的问题.

2 放电相似性的理论基础简介

气体放电的放电特性与放电气隙的尺寸 d , 气压 p , 空间电场 E 等参量密切相关, 其中 pd 和 E/p 往往作为组合参量来影响放电的物理过程, 其原因是: 若放电过程中气体温度基本保持不变 (即放电通道为非热平衡的低温等离子体), 电子在气体中的平均自由行程 λ 反比于 p , 约化电场 (reduced field) E/p 正比于两次碰撞之间电子从电场中获得的平

* 国家自然科学基金 (批准号: 51377095, 51107067) 资助的课题.

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

均能量 $E\lambda$, 表征了空间中电子的平均动能; pd 正比于电子跨越气隙所发生的平均的碰撞次数.

1915 年, Townsend^[10] 首先发现气体放电的存在相似性特征, 后来 Paschen^[11] 通过在空气、 CO_2 和 H_2 的实验中总结出气隙击穿电压是 pd 的函数, Holm^[12] 又对这一理论进行了推广. 此后, 人们对脉冲、射频放电等多种放电形式进行了研究总结, 并提出了相似性放电的基本规律^[13-15].

对于两个几何位形相似的放电间隙, 如果参数满足一定比例关系 ($p_1d_1 = p_2d_2$), 并且 E/p 沿“空间” px (x 为放电空间位置) 的分布是相同的, 人们猜测它们的放电应该具有相似性, 并且将满足上述放电条件的间隙称为放电相似性间隙. 这种放电相似性猜测的依据是, 对于相似性间隙, 在不同的“空间”位置 px 上电子经历的碰撞次数是相同的, 并且取决于电子平均动能的电子碰撞效果也是相近的, 若一个气体放电模式是由电子碰撞的物理过程主导的, 它们的放电发展过程也应该是相似的.

定义两个相似性间隙的尺寸比例关系为“缩比系数”($k = d_1/d_2 = p_2/p_1, k \geq 1$), 若两个相似性间隙满足放电相似性, 则它们的主要放电参数应该满足表 1 的关系^[16].

表 1 相同 px 处放电物理量的相似性关系

物理参量	数量关系
电位分布	$U_1 = U_2$
电子温度	$T_{e1} = T_{e2}$
电场强度	$E_1 = kE_2$
带电粒子密度	$N_{i1} = k^2N_{i2}, N_{e1} = k^2N_{e2}$
电流密度	$J_1 = k^2J_2$, 其中: $J_{i1} = k^2J_{i2}, J_{e1} = k^2J_{e2}$

表 1 中: $N_{i1}, N_{i2}, N_{e1}, N_{e2}$ 分别为两个间隙的离子和电子密度; J_1, J_2 为两个间隙的总电流密度, $J_{i1}, J_{i2}, J_{e1}, J_{e2}$ 分别为离子电流密度和电子电流密度, 并且 $J = J_i + J_e$; T_{e1}, T_{e2} 为两个间隙的电子能量.

3 数值仿真模型

3.1 放电模型

作为辉光放电相似性研究探索的第一步, 为简单起见, 本文选择一维放电模型, 即认为放电电极远大于间隙距离. 虽然这种一维数值模拟得到的是近似解, 但它可为我们今后将要进行的复杂的二维

和三维放电模拟打下基础. 由于氩气放电等离子体涉及的粒子反应过程相对较少^[17], 易于建模, 本文选择氩气作为工作气体.

气体放电包括碰撞电离、碰撞激发、激发电离等复杂的物理过程, 而低气压下的辉光放电中很多物理过程 (如三体碰撞、解激发等) 从反应速率上来看对放电的发展并不占主导作用^[18]. 为突出放电的主要物理过程, 本文考虑以下反应类型: a) 弹性碰撞 ($e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}$); b) 超弹性碰撞 ($e + \text{Ar}^* \rightarrow e + \text{Ar}^*$); c) 碰撞电离 ($e + \text{Ar} \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$); d) 碰撞激发 ($e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^*$); e) 激发电离 ($e + \text{Ar}^* \rightarrow e + \text{Ar}^+$); f) 彭宁电离 ($\text{Ar}^* + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar} + \text{Ar}^+$); g) 亚稳态熄灭 ($\text{Ar}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}$). 其中: a), b), c) 的反应速率利用反应截面数据 σ 计算, 反应 d) 和 e) 利用 Townsend 碰撞电离系数 α 计算; f) 和 g) 的化学动力学系数计算, 反应系数^[19] 分别为 $6.3 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $3.0 \times 10^{-21} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 气体放电的很多物理参量都是电子平均动能 T_e (T_e 正比于 E/p) 的函数, 本文使用的 σ 和 α 与电子能量 T_e 的关系如图 1 所示.

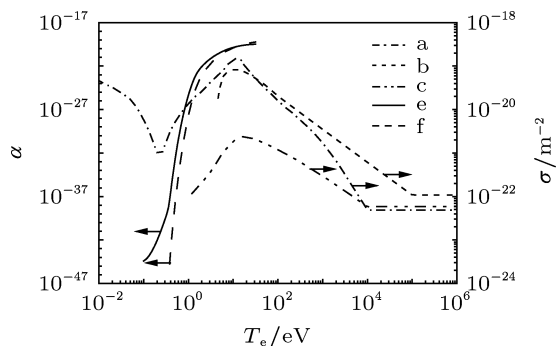


图 1 α 系数、截面数据 σ 与 T_e 的关系^[20,21]

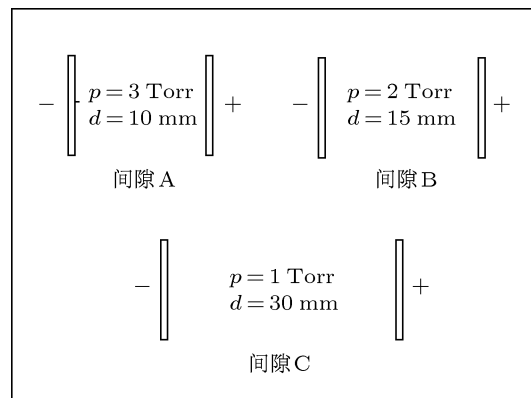


图 2 相似性间隙几何模型

为研究相似性间隙放电物理量的一般规律, 对 A, B, C 三个相似性间隙进行了仿真模拟, 如图 2 所示, 保证 $p_1d_1 = p_2d_2 = p_3d_3 = 30 \text{ Torr}\cdot\text{mm}$ ($1 \text{ Torr} = 133.322 \text{ Pa}$). 在此基础上对放电的初始条件和边界条件进行了合理的设定. 选择放电常用的铝作为电极材料, 其对应的电子逸出功为 3.95 eV . 辉光放电的典型特点是具有一个阴极位降区, 其工作电压略大于阴极位降, 对于氩气辉光放电而言, 当使用铝电极作为阴极时其阴极位降大约为 100 V ^[22], 本文选择外加电压 150 V . 气体放电一般是由间隙中初始电子在外加电场作用下运动碰撞电离开始的, 而初始电子密度主要取决于天然本底辐射导致的气体电离^[23]. 中国辐射防护研究院对天然本底辐射的电离产生率进行了测量, 根据他们给出的数据, 计算得到的天然本底辐射产生的初始电子密度为 10^7 m^{-3} ^[24]. 由于辉光放电产生的是非热平衡的低温等离子体, 其气体温度接近室温, 故设定气体温度为 293 K . 在阴极边界, 考虑离子碰撞阴极材料发射出二次电子, 这是维持放电的重要因素, 二次电子发射系数根据气体、阴极材料、温度等条件的不同一般取值为 $0.01\text{—}0.12$, 本文设定二次电子发射系数为 0.1 ^[25]; 对于阳极边界, 设定电子进入电极后全部吸收^[26].

3.2 计算软件

本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件来求解气体放电的物理模型. 该软件最初源于 MATLAB 编程开发语言中强有效的软件包 FEM-LAB, 后来由 COMSOL 公司开发为专业的有限元求解软件, 并在物理、化学、电子、生物医学等领域得到了广泛的应用. 该软件的建模方式基于偏微分方程计算引擎, 它将实际的物理模型抽象成数学物理方程, 通过求解偏微分方程组来描述物理量的变化规律. COMSOL Multiphysics 可以求解单物理场模型、多物理场弱耦合模型和间接耦合分析, 其最大特点是还可以进行多物理场强耦合仿真与全耦合分析. 软件预置了多种物理应用模式, 其中 PLASMA 模块可以用来求解多种不同模式的气体放电等离子模型. 利用 PLASMA 模块建模需要正确合理地设置物理参数, 用户可以将电离系数、反应截面数据按照软件指定格式编写成文档直接导入到程序中, 同时也可以通过图像化接口对模型的

初值和边界条件进行设定. 在对求解域进行网格剖分后, 可以利用计算机在后台运行求解程序. 目前, 利用该软件求解气体放电的流体模型已经得到了学术界的认可^[27–29].

4 结果与讨论

4.1 辉光放电的确定

低气压下辉光放电的特征是在靠近放电阴极的一个小区域存在一个强电场区, 与此相对应的是间隙中的主要电压降也落在这个区域, 人们通常称其为阴极位降区, 阴极位降区的存在是判断放电为辉光放电的重要定性依据之一. 除此之外, 阴极位降区的厚度 d_C 也是判断放电是否为辉光放电的定量依据. 正常辉光放电可以自动地把它的工作点 pd_C 调节到 Paschen 曲线最低点 (即击穿电压的最小值 V_{bmin}) 对应的 pd 值, 即 $pd_C = (pd)|_{V_b=V_{bmin}}$, 此时 E/p 位于 Stoletov 点^[30], 电子碰撞电离的能量效率最高.

本文计算得到了气隙的电位分布、电场分布、离子密度分布、电子密度分布、放电电流密度分布等. 从电场分布和电位分布来看, 阴极附近存在明显的阴极位降区, 并且阴极位降区的长度也满足 $pd_C = (pd)|_{V_b=V_{bmin}}$. 以间隙 A 的结果为例, 图 3 是它的间隙空间电场分布和电位分布曲线, 电场在阴极处达到 $1.15 \times 10^5 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 并随 d 的增大而急剧下降, 在 $x = 2.71 \text{ mm}$ 接近于 0, 这一段区域就是所谓的阴极位降区, 2.71 mm 就是对应阴极位降区的厚度, 即 $d_C = 2.71 \text{ mm}$. 与之对应的电位在 $x = d_C$ 处电位上升到 150 V , 基本上等于外加电压. 由于放电空间产生等离子体电位 (plasma potential)^[31], 对于低气压短间隙辉光放电而言, 放电空间的电位峰值一般略高于外加电压, 本文计算结果也呈现出这一现象, 这与 Bogaerts 等^[32]的计算结果一致. 考虑到间隙 A 的气压为 1 Torr , 其放电的工作点在 $pd_C = 2.71 \text{ Torr}\cdot\text{mm}$, Paschen 曲线最低点的 pd 值等于 $2.86 \text{ Torr}\cdot\text{mm}$, 仿真计算结果与该数值非常接近. 这也证明了该放电确实为辉光放电, 它可以自动地将工作点调节到 Paschen 放电最低点. 间隙 B, C 的情况和 A 非常相似, 它们的 d_C 分别为 $1.35, 0.87 \text{ mm}$, 对应的 $pd_C \approx 0.270 \text{ Torr}\cdot\text{mm}$. 由此, 我们可以得到这三个间隙都是辉光放电的结论.

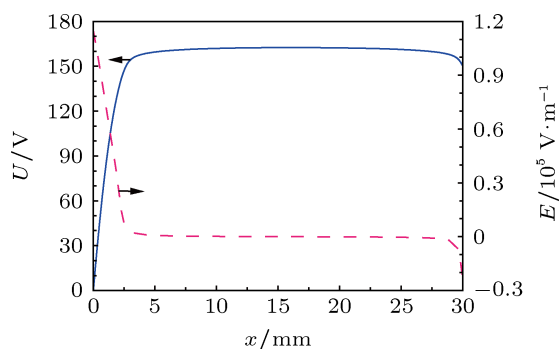
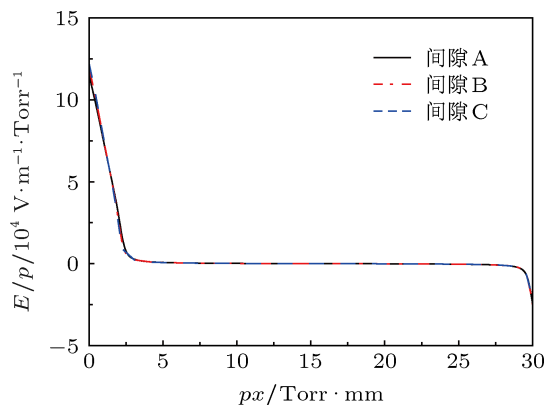


图3 间隙A的电位与电场空间分布

4.2 放电相似性的检验

对于放电相似性间隙来说,不仅要满足 $p_1 d_1 = p_2 d_2 = p_3 d_3$, 其约化电场 E/p 沿“空间” px 的分布还必须大致相同, 因此, 还需要检验这三个间隙 E/p 沿“空间” px 分布. 如图4所示, 三条曲线基本重合, 说明它们满足放电相似性间隙的必要条件. 下面我们分别检验其他的放电物理量 (工作电压, 电流密度, 电子、离子密度) 是否满足表1所示的比例关系.

图4 E/p 沿“空间” px 分布

首先检验间隙A, B, C的电位分布. 根据气体放电相似性猜想, 由表1可知, 不同间隙的电位随 px 的分布应相同, 即 $U_A = U_B = U_C$. 当间隙A, B, C的外加工作电压均为150 V时, 空间电位分布如图5所示. 由图5可以发现, 三个间隙的电位空间变化规律相同, 很好地验证了放电相似性的空间电位分布特征.

其次, 分析了间隙A, B, C的放电电流密度空间分布. 图6—8分别为A, B, C三个间隙放电离子电流密度 J_i , 电子电流密度 J_e 和总电流密度 J 的

空间分布. 根据图6和图7, 以间隙A为例, 在阴极 ($px = 0$) 放电电流密度主要是正离子的贡献, 为 $21.78 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 这是由于辉光放电在阴极处主要靠正离子轰击阴极材料发射出二次电子来维持的, 离子电流密度沿“空间” px 先减小后反向增大, 并在阳极 ($px = 30$) 处达到 $-7.35 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. 随着 px 的增大, 其电子电流密度由阴极处 $2.13 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到阳极 $31.17 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 并成为放电电流的主要部分. 间隙A的放电总电流密度沿“空间” px 保持定值, 即 $23.91 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. 根据气体放电相似相的猜想, 放电的电流密度应该与“缩比系数” k 的平方成正比, 就间隙A, B, C而言, 分别有 $k_A = 1, k_B = 2, k_C = 3$. 根据表1可知, 间隙的离子电流密度、电子电流密度以及总电流密度均应该满足 $k_A^2 : k_B^2 : k_C^2 = 1^2 : 2^2 : 3^2$. 为检验这一数量关系是否成立, 分别取空间中 $px = 0$ (阴极), $px = 10, px = 20, px = 30$ (阳极) 四个位置的电流密度数值, 见表2, 来对比它们的数量关系. 可以发现, 在一定范围内, 在空间任一点放电电流密度基本满足 $k_A^2 : k_B^2 : k_C^2$ 的数量关系.

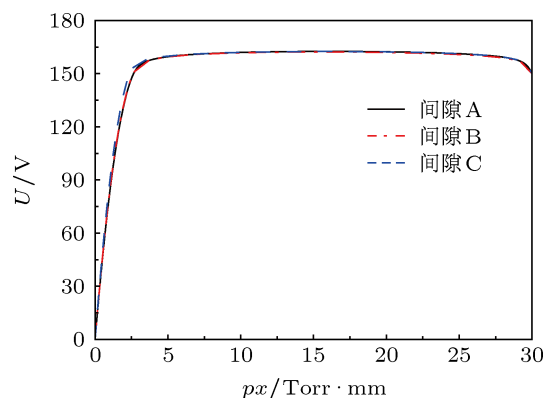


图5 间隙A, B, C电位空间分布

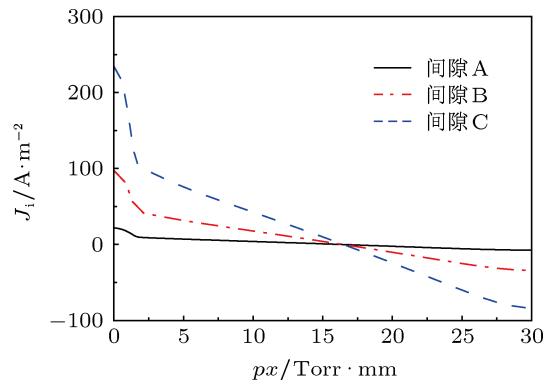


图6 间隙A, B, C离子电流密度空间分布

表2 间隙A, B, C 电流密度数值对比

物理量	$px/\text{Torr}\cdot\text{mm}$	间隙 A	间隙 B	间隙 C	$J_A : J_B : J_C$
$J_i/\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	0	21.78	97.44	234.4	$0.93^2 : 1.96^2 : 3.04^2$
	10	3.92	17.38	41.64	$0.93^2 : 1.97^2 : 3.04^2$
	20	-2.34	-10.23	-24.34	$0.94^2 : 1.97^2 : 3.04^2$
	30	-7.35	-34.10	-83.56	$0.91^2 : 1.95^2 : 3.06^2$
$J_e/\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	0	2.13	9.54	22.95	$0.93^2 : 1.97^2 : 3.05^2$
	10	20.00	89.62	215.72	$0.93^2 : 1.96^2 : 3.05^2$
	20	26.34	117.59	282.59	$0.93^2 : 1.96^2 : 3.05^2$
	30	31.17	140.53	339.38	$0.93^2 : 1.96^2 : 3.04^2$
$J/\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	0—30	23.91	106.98	257.3	$0.93^2 : 1.96^2 : 3.04^2$

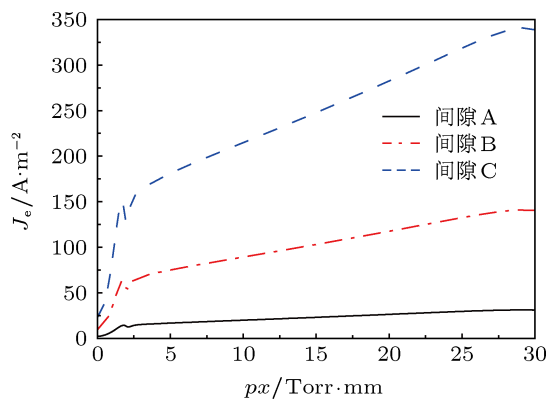


图7 间隙A, B, C 电子电流密度空间分布

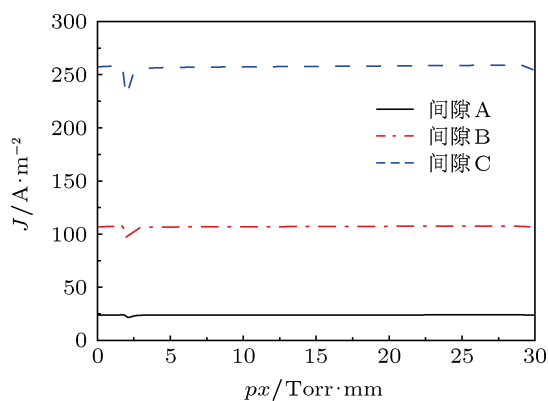


图8 间隙A, B, C 电子电流密度空间分布

然后, 检验间隙A, B, C 的带电粒子密度的空间分布. 图9和图10分别为间隙A, B, C 的离子密度分布和电子密度分布, 可以发现, 在阴极区离子密度远大于电子密度, 这与电流密度的关系是一致的. 带电离子密度沿“空间” px 的分布均呈现先增大后减小的特征, 并在间隙中心部分达到峰值. 根

据相似性放电猜想, 由表1可知, 空间带电离度与“缩比系数” k 平方成正比. 同样, 选择 $px=0$ (阴极), $px=10$, $px=20$, $px=30$ (阳极) 四个位置的电子密度、离子密度值来对比数量关系, 数值如表3所示. 可以发现, 间隙A, B, C 的电子密度、离子密度基本满足 $k_A^2 : k_B^2 : k_C^2$ 的数值关系.

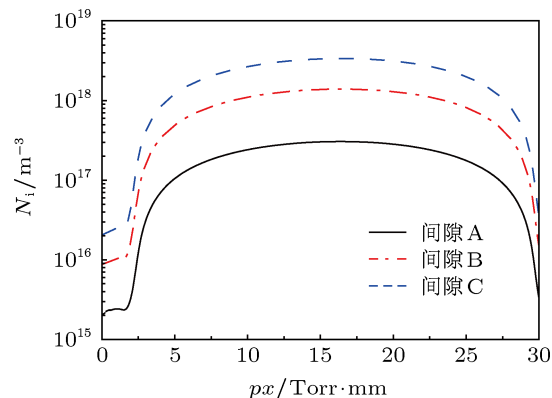


图9 间隙A, B, C 离子密度空间分布

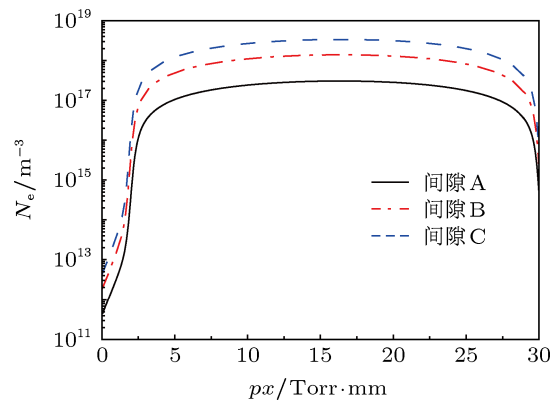


图10 间隙A, B, C 电子密度空间分布

表3 间隙 A, B, C 带电粒子密度数值对比

物理量	$px/\text{Torr}\cdot\text{mm}$	间隙 A	间隙 B	间隙 C	$N_A : N_B : N_C$
$N_i/\text{ion}\cdot\text{m}^{-3}$	0	2.03×10^{15}	8.75×10^{15}	2.06×10^{16}	$0.95^2 : 1.98^2 : 3.03^2$
	10	2.44×10^{17}	1.12×10^{18}	2.70×10^{18}	$0.92^2 : 1.97^2 : 3.05^2$
	20	2.83×10^{17}	1.29×10^{18}	3.16×10^{18}	$0.92^2 : 1.95^2 : 3.06^2$
	30	3.31×10^{15}	1.47×10^{16}	3.51×10^{16}	$0.93^2 : 1.97^2 : 3.04^2$
$N_e/\text{electron}\cdot\text{m}^{-3}$	0	4.17×10^{11}	1.78×10^{12}	4.23×10^{12}	$0.95^2 : 1.96^2 : 3.04^2$
	10	2.41×10^{17}	1.10×10^{18}	2.67×10^{18}	$0.92^2 : 1.96^2 : 3.05^2$
	20	2.80×10^{17}	1.29×10^{18}	3.14×10^{18}	$0.91^2 : 1.96^2 : 3.06^2$
	30	4.31×10^{14}	1.95×10^{15}	4.72×10^{15}	$0.92^2 : 1.96^2 : 3.05^2$

最后, 验证间隙 A, B, C 中的平均电子能量的关系. 由气体放电理论可知, 平均电子能量 T_e 主要取决于电子在相邻两次碰撞过程中从电场中获得的能量 $E\lambda$, 该数值是正比于 E/p 的. 由图 4 可知, 间隙的约化电场沿“空间” px 的分布几乎相同, 所以电子能量分布也应该相同, 即 $T_{e1} = T_{e2} = T_{e3}$. 图 11 为间隙 A, B, C 的电子平均能量沿空间分布曲线, 可以发现, 相似性放电关于电子能量分布的结论是成立的.

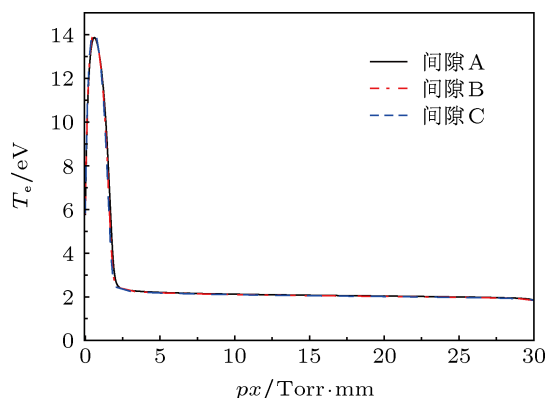


图 11 相似放电系统平均电子能量分布

5 结论

本文基于无限大平板一维流体放电模型, 建立了 A, B, C 三个不同尺寸的相似放电间隙, 利用 COMSOL 软件分别对间隙 A, B, C 的放电过程进行了数值模拟. 仿真得到了电位、电场、电流密度、电子密度、离子密度、电子能量等物理量沿“空间” px 的分布, 验证了放电相似性的基本结论, 即相似性间隙在保证 pd 相同, 且约化电场 E/p 沿“空间” px 分布相同时, 放电特征具有相似性. 同时, 对不同放电间隙的各放电物理量在相同“空间” px 处的数值进行了对比分析, 结果表明: 相似性放电时, 放电空间的电位分布、电子能量分布相同; 带电粒子密度 (电子密度、离子密度)、放电电流 (电子电流、离子电流) 分布与“缩比系数” k 的平方成正比, 从而验证了放电相似性猜想物理量的数量关系. 然而, 本文仅是对于放电相似性的初步研究, 由于一维仿真模型没有考虑粒子沿径向扩散过程, 所以仿真结果存在一定误差. 后续将进行二维仿真, 并通过实验对放电相似性规律进行更加深入的研究.

[1] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer-Verlag) pp76–239
 [2] Roth J R 2001 *Industrial Plasma Engineering Volume II: Applications to Non-Thermal Plasma Processing* (Bristol: Institute of Physics) pp1–2
 [3] 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
 [4] Bucalossi J, Brosset C, Garnier D, Grisolia C, Grosman A, Martin G, Laurent F S 2003 *J. Nucl. Mater.* **313–316** 263
 [5] Wang Z W, Yan D H, Wang E Y 2002 *Plasma Sci. Technol.* **4** 1165
 [6] Tomabechi K, Gilleland J R, Sokolov Y A, Toschi R, ITER Team 1991 *Nucl. Fusion* **31** 1135

[7] R Aymar, Barabaschi P, Shimomura Y 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** 519
 [8] Osmokrovic P, Zivic T, Loncar B, Vasic A 2007 *IEEE Trans. on Plasma Science* **35** 100
 [9] Dekic S, Osmokrovic P, Vujisic M, Stankovic K 2010 *IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insulat.* **17** 1185
 [10] Townsend J S 1915 *Electricity in Gases* (Oxford: Clarendon Press) p365
 [11] Paschen F 1889 *Wiedemann Annalen der Physik und Chemie* **37** 69
 [12] Holm R 1924 *Phys. Z.* **25** 497
 [13] Margenau H 1948 *Phys. Rev.* **73** 197
 [14] Jones F L, Morgan G D 1951 *Proc. Phys. Soc. Lond. B* **64** 560
 [15] Janasek D, Franzke J, Manz A 2006 *Nature* **442** 374

- [16] 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]
- [17] Jong W S, Mark J K 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 1883
- [18] Bogaerts A, Gijbels R 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 4124
- [19] Kolokolov N B, Blagoev A B 1993 *Phys. Usp.* **36** 152
- [20] Yamabe C, Buckman S J, Phelps A V 1983 *Phys. Rev. A* **27** 1345
- [21] Pitchford L C, Phelps A V 1982 *Phys. Rev. A* **25** 540
- [22] Lieberman M A, Lichtenberg A J (Translated by Pu Y K) 2007 *Principles of Plasma Discharge and Materials Processing* (Beijing: Science Press) p421 (in Chinese) [迈克尔·A·力伯曼, 阿伦·J·里登伯格著, 蒲以康译 2007 等离子体放电原理与材料处理 (北京: 科学出版社) 第 421 页]
- [23] Yue Q Y, Jin H 1988 *Radiation Protection* **8** 401 (in Chinese) [岳清宇, 金花 1988 辐射防护 **8** 401]
- [24] Lü B, Wang X X, Luo H Y, Liang Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 646
- [25] Brown S B 1959 *Basic Data of Plasma Physics* (New York: John Wiley and Sons, Inc.) pp275–301
- [26] Shao X J, Ma Y, Li Y X, Zhang G J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8747 [邵先军, 马跃, 李娅西, 张冠军 2010 物理学报 **59** 8747]
- [27] Sima W X, Peng Q J, Yang Q, Yuan T, Shi J 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat.* **19** 660
- [28] Liu X H, He W, Yang F, Wang H Y, Liao R J, Xiao H G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075201
- [29] Zhuang Y, Chen G, Rotaru M 2011 *J. Phys: Conference Series* **310** 012011
- [30] Montie T C, Wintenberg K K, Roth J R 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 41
- [31] Bogaerts A, Neyts E, Gijbels R, van der Mullen J 2002 *Spectrochim. Acta B* **57** 609
- [32] Bogaerts A, Gijbels R, Goedheer W J 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 2233

Preliminary study on similarity of glow discharges in scale-down gaps*

Fu Yang-Yang Luo Hai-Yun Zou Xiao-Bing Liu Kai Wang Xin-Xin[†]

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

(Received 7 May 2013; revised manuscript received 14 June 2013)

Abstract

In order to investigate the validity of the scale-down experiment on gas discharge, the discharge in argon at low pressure is numerically simulated with scale-down discharge gap based on the conjecture of discharge similarity that if the product of gas pressure p and gap length d is kept constant, $p_1 d_1 = p_2 d_2$, and the spatial distributions of the reduced field E/p along these two gaps are the same, the gas discharges in these two discharge gaps would be similar. In the simulation, three scale-down discharge gaps are used. Gap A is 30 mm long and works at a pressure of 1 Torr (1 Torr = 133.322 Pa). Gap B is 15 mm long at 2 Torr and gap C 10 mm long at 3 Torr. The results show that the discharges in these three gaps are glow discharges with a cathode fall layer. The values of thickness of the cathode fall layer, d_c , for gaps A, B and C are 2.71 mm, 1.35 mm and 0.87 mm, respectively, which corresponds to more or less the same value of $p d_c \approx 2.70$ Torr·mm that is close to the lowest point of Paschen curve of argon where $p d \approx 2.86$ Torr·mm. The proportionalities of the parameters (working voltage, electric field, current density, electron density and ion density) between the discharges in the scale-down gaps are found to be in good agreement with those determined by the discharge similarity. It is concluded that the conjecture of discharge similarity is correct for the glow discharge in argon in the scale-down gap.

Keywords: discharge similarity, glow discharge, scale-down gap

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

DOI: 10.7498/aps.62.205209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51377095, 51107067).

[†] Corresponding author. E-mail: wangxx@mail.tsinghua.edu.cn