

doi: 10.3969/j.issn.1007-2691.2021.06.02

直流电压下 Ar 气中微空心阴极类辉光放电特性

黄世龙¹, 朱雷², 刘云鹏¹, CORMAC Corr³

(1. 华北电力大学 河北省输变电设备安全防护重点实验室, 河北 保定 071003; 2. 国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司, 江苏 南京 220000; 3. Australian National University, Canberra ACT 2601)

摘要: 为研究微空心阴极放电类辉光现象, 在气压 100 Torr、空心半径 100 μm 和阴极表面施加电压 -600 V 条件下, 建立了二维轴对称流体计算模型, 包括控制方程、边界条件及化学反应, 并进行了数值模拟。结果表明, 在类辉光放电模式下, 放电电压约为 -95 V, 在空心内阴极附近出现一个清晰的环形鞘层结构, 鞘层厚度沿阴极外表面随着半径的增加而增加; 带电粒子数密度约为 10^{19}m^{-3} , 阴极鞘层和等离子体区域内电子温度近似约为 10.2 eV 和 1.5 eV; 基态电离和彭宁电离反应速率峰值约分别为 1.2×10^3 、 $2.7 \times 10^3 \text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; 电子的整体净体积产生率约为 $2.4 \times 10^{27} \text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 主要产生在空心阴极区, 同时在阴极侧孔外和平坦的外阴极区域鞘层边缘也有少量电子产生。

关键词: 微空心阴极; 直流电压; 类辉光放电; 二维轴对称模型

中图分类号: TM41 文献标识码: A 文章编号: 1007-2691 (2021) 06-0009-05

Discharge Characteristics in Glow-like Mode of Micro Hollow Cathode in Ar under DC Voltage

HUANG Shilong¹, ZHU Lei², LIU Yunpeng¹, CORMAC Corr³

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 220000, China; 3. Australian National University, Canberra ACT 2601, Australia)

Abstract: In order to study the glow-like discharge in MHCD, we established a two-dimensional axis-symmetric fluid model, which consists of control equations, boundary conditions and chemical reactions under the conditions of air pressure of 100 Torr, the hollow radius of 100 μm and cathode voltage of -600 V and performed numerical simulation. The results show that in the mode of glow-like discharge, the discharge voltage is about -95 V. Near the hollow inner cathode appears a clear annular sheath structure and it extends to the flat cathode surface outside the hollow with the increase of the radial distance from the outer surface of the cathode. The density of charged particles number is about 10^{19}m^{-3} , and the electron temperature in the cathode sheath and plasma region is about 10.2 eV and 1.5 eV. The results show that the peak values of ground-state and Penning ionization reaction rate are about 1.2×10^3 and $2.7 \times 10^3 \text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, respectively. The overall net volume rate of electron generation is about $2.4 \times 10^{27} \text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$. Electrons are mainly produced in the hollow cathode region while a small amount are outside the cathode side hole and the sheath edge region.

Key words: micro hollow cathode; DC voltage; glow-like discharge; 2-D axis-symmetric model

0 引言

微空心阴极放电 (MHCD) 是一种在电极-介质-电极夹层结构上钻孔的微等离子体, 该设计由 Schoenbach 在 1996 年提出^[1], 且发现由其组成的

收稿日期: 2021-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52007063); 中央高校基本科研业务费项目 (2020MS092); 电力规划总院项目 (K201909-D).

微等离子体阵列可稳定运行。由于在表面处理^[2,3]、杀菌^[4,5]、光源^[6]、微推^[7]等领域应用潜力巨大,近十年已引起广泛关注。放电电极几何形状特征尺寸为几十至几百 μm ,在压强(数十至数百 Torr)可实现稳定的微放电。与其他直流放电一样,当驱动参数范围不确定时,放电电压和电流会受很大的弛豫影响。目前对该电极不同模式下放电特性认识仍然有限,部分原因是其体积小,使得传统诊断方法变得困难。

Lazzaroni 等人建立了三明治结构微空心阴极放电零维模型,并对 Ar 气中自脉冲放电模式下的放电特性进行了研究^[8];何寿杰等人建立了圆筒形结构微空心阴极放电模型,对 Ar 气中放电动力学特征进行了研究^[9];王新新等人试验研究了“U”形结构阴极孔径 300/100/50 μm 下 HCD 的工作范围为 0.8~4 Torr·cm^[10]。

对于图 1 中三明治微空心阴极放电结构:在非常低的电流下(<0.1 mA),放电具有高阻特性,电压几乎与电流呈线性增加,放电被限制在孔隙内,为典型汤逊放电模式;随着电流增加,放电在阴极背面膨胀,放电电流频率为数 kHz,幅值 ≈ 0.5 mA,为自脉冲放电模式,在单个循环周期内,放电长时间维持在孔隙内,在短(通常为 μs)电流脉冲期间,放电在阴极背面瞬时膨胀;随着电流的进一步增大,放电表现为类辉光模式,放电特性具有极大的稳定性,表现出良好的应用前景。

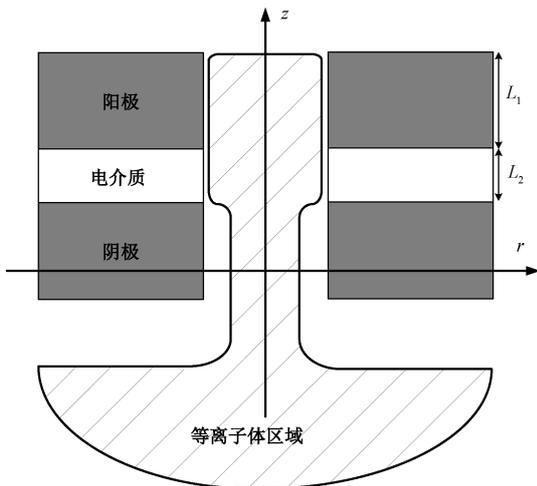


图 1 三明治微空心阴极放电结构

Fig. 1 Sandwich structure of MHCD

本文建立了自洽非平衡等离子体放电模型,二次发射系数近似为阴极表面约化电场函数。在 Ar 气中,对气压 100 Torr、阴极孔隙半径为 100 μm

下类辉光放电模式放电特性开展数值计算,对放电电压,电子、激发态 Ar^* 原子、 Ar^+ 离子数密度,电子温度,基态电离、彭宁电离、二次电离反应速率及电子净生成速率进行了研究分析。

1 模型建立

建立了二维轴对称流体模型,包括控制方程、边界条件及典型化学反应,具体见 1.1~1.3 节。

1.1 控制方程

利用泊松方程确定自洽电势^[13]:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e}{\epsilon_0} \sum_{k=1}^{k_g} Z_k n_k \quad (1)$$

式中: ϕ 为电势; e 为单位电荷; ϵ_0 为自由空间介电常数; Z_k 为第 k 种粒子电荷数(如电子为-1)。

由粒子连续性方程可以得到单一放电粒子数密度(n_k):

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_k = G_k \quad k = 1, \dots, k_g (k \neq k_b) \quad (2)$$

式中: k 为粒子标号; Γ_k 为粒子扩散漂移通量; G_k 为放电化学反应生成气相粒子的速率; k_g 为气相粒子种类数。以主要的中性粒子作为背景粒子,其标号为 k_b ,背景粒子密度由理想气体定律确定:

$$p = n_{k_b} k_B T_g + n_e k_B T_e + \sum_{k \neq e, k \neq k_b} n_k k_B T_g \quad (3)$$

式中: p 为气体放电总压强; k_B 为玻尔兹曼常数; T_e 为电子温度; T_g 为重粒子(离子和中性粒子)温度。

在模型中,假定电子输运系数和电子碰撞反应速率系数为局域电子温度(T_e)的函数。电子能量方程用于确定放电中的电子能量密度 $\check{E}_e = 3/2 k_B T_e n_e$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \check{E}_e}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{5\Gamma_e E_e}{3n_e} \right) - \nabla \cdot (\eta_e \nabla T_e) = e\Gamma_e \cdot \\ \nabla \phi - \frac{3}{2} k_B n_e \frac{2m_e}{m_{k_b}} (T_e - T_g) v_{e,k_b} - e \sum_{j=1}^{I_g} \Delta E_j^e r_j \end{aligned} \quad (4)$$

式中: η_e 为电子热导率; m_e 和 m_{k_b} 分别为电子和主要背景气体分子质量; v_{e,k_b} 为电子与背景气体的动量转移碰撞频率; ΔE_j^e 为在由气相非弹性碰撞反应 j 中每个电子损失的能量(单位:eV); r_j 为反应 j 反应速率; I_g 为气相反应的总数。

采用漂移扩散近似计算粒子数通量密度:

$$\Gamma_k = -\mu_k n_k \nabla \phi - D_k \nabla n_k \quad (5)$$

式中: μ_k 为粒子迁移率(中性粒子为0); D_k 为粒子

扩散系数。通过求解零维电子玻尔兹曼方程的独立解获得电子输运参数,并以电子温度形式表示。离子迁移率由实验迁移率数据导出,并使用爱因斯坦关系计算其扩散系数:

$$D_k = \frac{\mu_k k_B T_g}{eZ_k} \quad (6)$$

1.2 边界条件

对于电子,主要由离子轰击阴极壁面产生二次发射,阴极表面电子通量表达式为:

$$\Gamma_e \cdot \tilde{n} = \frac{1}{4} n_e \left(\frac{8k_B T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} - \gamma_{\text{eff}} \Gamma_{\text{ion}} \cdot \tilde{n} \quad (7)$$

式中: \tilde{n} 为壁面法向矢量。式(7)中第一项为电子抵达壁面的麦克斯韦通量,第二项为来自表面的二次电子发射通量。该模型将表面二次电子发射总量与影响表面离子的净离子通量 $\Gamma_{\text{ion}} \tilde{n}$ 联系起来。二次发射系数 γ_{eff} 为阴极表面约化电场(E/N)_c的函数:

$$\gamma_{\text{eff}} = 0.01 \left(\frac{E}{N} \right)_c^{0.6} \quad (8)$$

式中:约化电场单位为 kT_d。

离子在固体壁面的扩散通量为

$$\Gamma_i \cdot \tilde{n} = -\mu_i n_i \nabla \varphi \cdot \tilde{n} \quad (9)$$

对于中性粒子,麦克斯韦通量条件为

$$\Gamma_n \cdot \tilde{n} = \frac{1}{4} n_n \left(\frac{8k_B T_g}{\pi m_n} \right)^{1/2} \quad (10)$$

电介质表面电势由表面累积的总表面电荷密度确定。净表面电荷密度的演化方程为

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \sum_{k=1}^{k_g} eZ_k \Gamma_k \cdot \tilde{n} \quad (11)$$

式中: ρ_s 为表面电荷密度,根据表面电荷密度,可用高斯定律计算电介质表面电势。阳极接地,阴极表面电位-600 V,放电电流约为 1.1 mA。

对于电子能量方程,在固体壁上施加以下能量通量:

$$Q_e^w = \frac{5}{2} k_B T_e \Gamma_e^w \quad (12)$$

式中: Γ_e^w 为壁电子数通量。

1.3 化学反应

采用纯 Ar 气体化学反应,包括 4 种物质:电子(e)、氩离子(Ar⁺)、Ar 原子激发态(Ar*)、背景氩原子(Ar)。模型中的反应式见表 1,包括电子碰撞电离、激发、彭宁电离,离子形成、猝灭和退激。电子碰撞反应速率系数通过求解在一定约化

电场(E/N)范围内合适的电子能量依赖的反应截面零维电子 Boltzmann 方程得到,电子平均能量为约化电场 E/N 的函数由玻尔兹曼解算器得到。

表 1 等离子体气相化学反应^[11,12]

反应序号	反应式	反应速率
G1	e+Ar→e+Ar	采用 BOLSIG+ ^[11]
G2	e+Ar→e+Ar*	采用 BOLSIG+ ^[11]
G3	e+Ar→2e+Ar ⁺	采用 BOLSIG+ ^[11]
G4	e+Ar*→2e+Ar ⁺	采用 BOLSIG+ ^[11]
G5	e+Ar*→e+Ar	采用 BOLSIG+ ^[11]
G6	e+Ar ⁺ →Ar*	4.0×10 ⁻¹³ T _e ^{-0.5} cm ³ s ⁻¹ ^[12]
G7	2e+Ar ⁺ →e+Ar*	5.0×10 ⁻²⁷ T _e ^{-4.5} cm ⁶ s ⁻¹ ^[12]
G8	2Ar*→Ar ⁺ +Ar+e	5×10 ⁻¹⁰ cm ³ s ⁻¹ ^[12]

2 数值模拟

本文中采用 MHCD 电极为三明治结构,为简化计算,建立了轴对称模型,空心阴极孔半径 100 μm,金属电极厚 100 μm,介电层厚度 50 μm,且 $\epsilon = 8\epsilon_0$,气压为 100 Torr。该数值模型基于非结构化网格,采用半隐式方法对控制方程进行时间差分。在空间中,粒子连续性和电子能量方程中的对流扩散项采用与 Scharfetter-Gummel 指数等效格式进行离散化,采用 matlab 商业软件编程求解。

图 2 给出了辉光模式下的放电电位等值线,在空心内阴极附近出现一个清晰的环形鞘层结构,阴极鞘层在空心内的厚度约为 100 μm,鞘层厚度为阴极表面附近高场强区域,鞘层厚度沿阴极外表面随着半径的增加而增加。

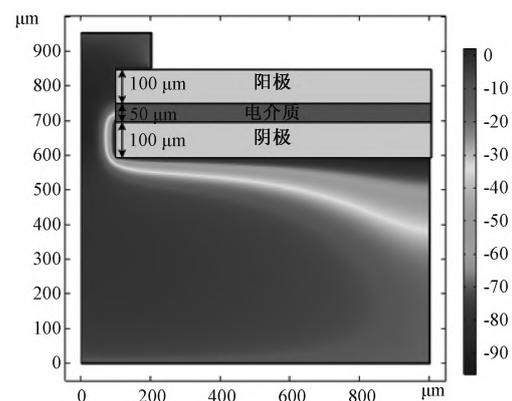


图 2 放电电位等值线(单位:V)

Fig. 2 Contour of discharge potential (Unit: V)

电子 e、激发态原子 Ar* 和离子 Ar⁺ 数密度分布如图 3,可以看出,三种粒子数密度峰值都出现在空心阴极区域内的等离子体中心线上。对于电

子和离子 Ar^+ 第二个数密度峰值出现在空心阴极区域之外,且峰值密度约为 10^{19} m^{-3} ,Lazzaroni 在与本文仿真参数一致的试验条件下实验测得辉光区电子密度约为 7.25×10^{19} ,与本文仿真结果吻合较好,验证了本文建立二维轴对称放电数值模型的准确性^[8]。并且空心外等离子体体积明显大于空心内等离子体体积。激发态原子 Ar^* 数密度最大约为 10^{21} m^{-3} ,比电子和离子 Ar^+ 高约两个数量级。

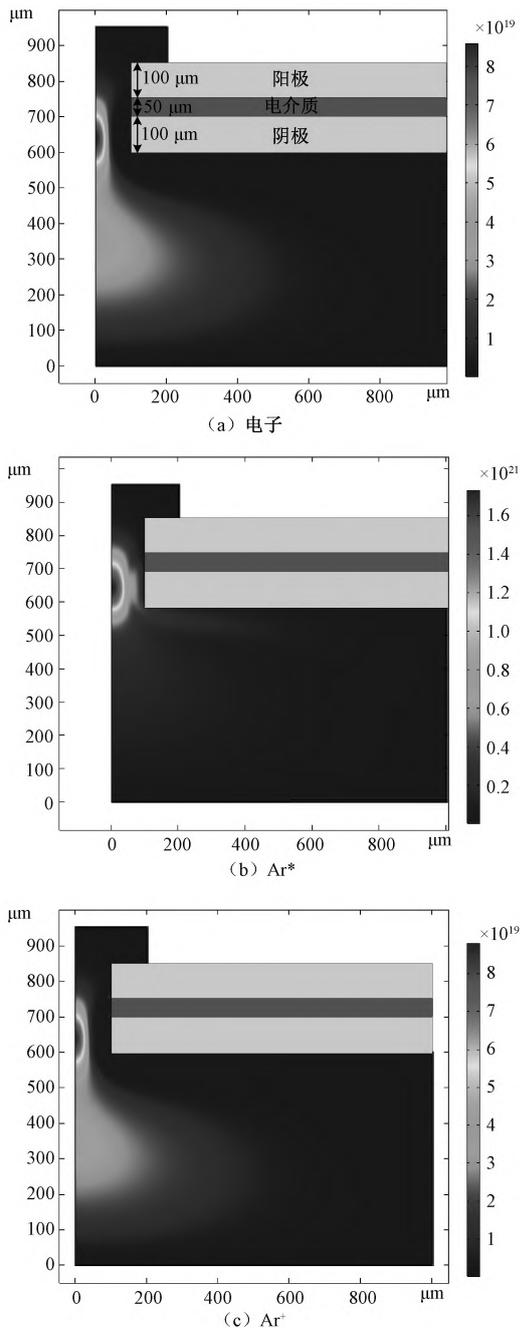


图3 粒子数密度(单位: L/m^3)

Fig. 3 Particle number density (Unit: L/m^3)

电子温度等值线见图4,可以看出,MHCD空心阴极鞘层区的电子温度最高,峰值温度约为 10.2 eV 。通过对比图3中具有显著电子数密度的区域,发现等离子体区域内电子温度约为 1.5 eV 。

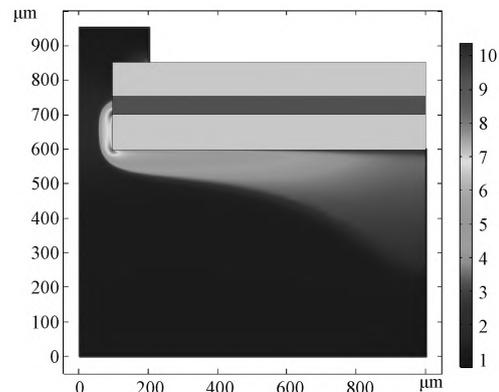
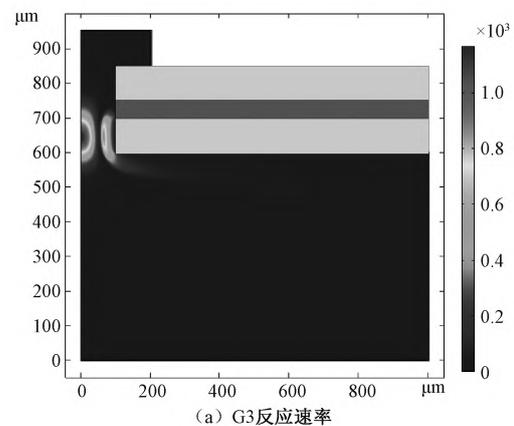


图4 电子温度特性(单位:eV)

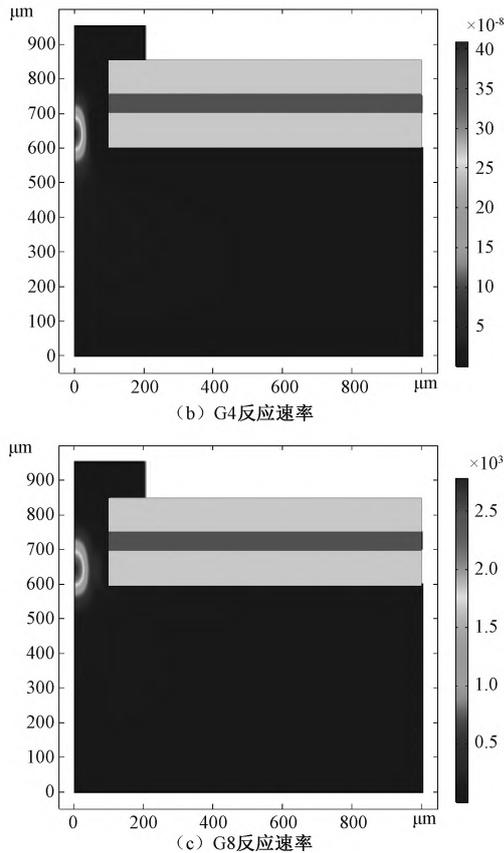
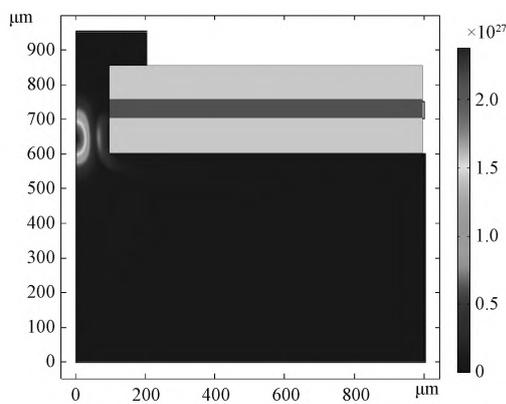
Fig. 4 Electron temperature characteristics (Unit: eV)

基态电离 G3、彭宁电离 G8 和二次电离 G4 的反应速率等值线见图5。可以看出,基态电离和彭宁电离反应速率要远高于二次电离反应速率。基态电离主要发生在阴极鞘层区域附近和等离子体中心线区域,反应速率峰值约为 $1.2 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,彭宁电离和二次电离主要发生在等离子体中心线区域,反应速率峰值约分别为 $2.7 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 、 $41 \times 10^{-8} \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。彭宁电离反应速率约为基态电离速率的两倍。

等离子体反应的电子净体积产生率的等值线见图6。可以看出,电子的产生主要在空心阴极区,且有部分放电活动延伸到空心外,在阴极侧的孔外和平坦的外阴极区域的鞘层边缘,可以看到有少量放电电子产生,电子的整体净体积产生率约为 $2.4 \times 10^{27} \text{ L}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。



(a) G3反应速率

图 5 电离反应速率(单位: $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)Fig. 5 Rate of ionization reaction (Unit: $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)图 6 电子净生成速率(单位: $\text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)Fig. 6 Net generation rate of electron (Unit: $\text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)

3 结 论

(1) 在类辉光放电模式下,等离子体很大一部分位于空心结构之外,等离子体占据了平坦阴极表面上方几个空心直径的区域。在阴极电压为 -600 V 时,金属电极厚 $100 \mu\text{m}$,介电层厚度 $50 \mu\text{m}$,且 $\varepsilon = 8\varepsilon_0$ 条件下,类辉光模式下放电电压约为 -95 V ,在空心内阴极附近出现一个清晰的环形

鞘层结构,鞘层厚度沿阴极外表面随着半径的增加而增加。

(2) 电子密度和离子数密度约为 10^{19} m^{-3} ,激发态原子 Ar^* 数密度约为 10^{21} m^{-3} ,阴极鞘层中电子温度近似约为 10.2 eV 和等离子体区域内电子温度约为 1.5 eV 。反应中以基态电离和彭宁电离为主,彭宁电离和二次电离主要发生在等离子体中心线区域,反应速率峰值约分别为 $2.7 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 、 $41 \times 10^{-8} \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,且彭宁电离反应速率约为基态电离速率的两倍。电子的整体净体积产生率约为 $2.4 \times 10^{27} \text{ L}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,主要产生在空心阴极区,同时在阴极侧的孔外和平坦的外阴极区域的鞘层边缘也有少量电子产生。

参考文献:

- [1] SCHOENBACH K H, VERHAPPEN R, TESSNOW T. Microhollow cathode discharges [J]. Applied Physics Letters, 1996, 68 (1): 13-15.
- [2] STOFFELS E, FLIKWEERT A J, STOFFELS W W. Plasma needle: a non-destructive atmospheric plasma source for fine surface treatment of biomaterials [J]. Plasma Sources Science & Technology, 2002, 11 (4): 383-388.
- [3] EVJU J K, HOWELL P B, LOCASCIO L E. Atmospheric pressure microplasmas for modifying sealed microfluidic devices [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84 (10): 1668-1670.
- [4] RAHUL R, STAN O, RAHMAN A. Optical and RF electrical characteristics of atmospheric pressure open-air hollow slot microplasmas and application to bacterial inactivation [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2005, 38 (11): 1750-1759.
- [5] PEREZ J A, PENA R, LOPEZ R. An RF microplasma facility development for medical applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201 (9/11): 5684-5687.
- [6] HIGASHIGUCHI T, TERAUCHI H, YUGAMI N. Characteristics of extreme ultraviolet emission from a discharge-produced potassium plasma for surface morphology application [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96 (13): 1-3.
- [7] KOTHNUR P S, RAJA L L. Simulation of Direct - Current microdischarges for application in Electro - Thermal class of small satellite propulsion devices [J]. Contributions to Plasma Physics, 2010, 47: 1-2.

(下转第 23 页)

- [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (8): 3482-3494.
- [18] PEREZ-BASANTE A, CEBALLOS S, KONSTANTINO G, et al. Circulating current control for modular multilevel converters with (N+1) selective harmonic elimination—PWM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35 (8): 8712-8725.
- [19] DENG Y, WANG Y, TEO K H, et al. A simplified space vector modulation scheme for multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (3): 1873-1886.
- [20] WANG Y, HU C, DING R, et al. A nearest level PWM method for the MMC in DC distribution grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (11): 9209-9218.
- [21] KIM S M, JEONG M G, KIM J, et al. Hybrid modulation scheme for switching loss reduction in a modular multilevel high-voltage direct current converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (4): 3178-3191.
- [22] 管敏渊, 徐政, 潘伟勇, 等. 最近电平逼近调制的基波谐波特性解析计算 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (5): 1327-1332.
- GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Weiyong, et al. Analytical calculation of fundamental wave and harmonic characteristics for nearest level modulation [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36 (5): 1327-1332 (in Chinese).
- [23] LI B, YANG R, XU D, et al. Analysis of the phase-shifted carrier modulation for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (1): 297-310.

作者简介:

许仪勋 (1969-), 男, 讲师, 研究方向为微电网规划、智能用电, E-mail: xu_yixun@sina.com;

冯紫妍 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网配置运行优化、储能运行优化, E-mail: fengziyan_fzy@163.com;

张建浩 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源优化调度, E-mail: 905103327@qq.com;

汪凯琳 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网混合储能优化配置, E-mail: 3349301040@qq.com;

王桂莲 (1981-), 女, 助理工程师, 研究方向为柔性直流输电技术, E-mail: 15930923628@163.com.

(上接第 13 页)

- [8] LAZZARONI C, CHABERT P, ROUSSEAU A, et al. Sheath and electron density dynamics in the normal and self-pulsing regime of a micro hollow cathode discharge in argon gas [J]. The European Physical Journal D, 2010, 60 (3): 555-563.
- [9] 何寿杰, 周佳, 渠宇霄, 等. 氩气空心阴极放电复杂动力学过程的模拟研究 [J]. 物理学报, 2019, 68 (21): 215-224.
- HE S J, ZHOU J, QU Y X. Simulation on complex dynamics of hollow cathode discharge in argon [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68 (21): 215-224 (in Chinese).
- [10] HOU X Y, ZOU X B, LI Y T, et al. Range and similarity of hollow cathode discharge in argon [J]. High Voltage, 2019, 4 (3): 217-220.
- [11] HAGELAAR G J M, PITCHFORD L C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models [J]. Plasma Sources Science & Technology, 2005, 14 (4): 722-733.
- [12] LAY B, MOSS R S, RAUF S. Breakdown processes in metal halide lamps [J]. Plasma Sources Science & Technology, 2002, 12: 8-21.
- [13] LAZZARONI C, CHABERT P. A global model of micro-hollow cathode discharges in the stationary regime [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2011, 44 (44): 1-12.

作者简介:

黄世龙 (1992-), 男, 讲师, 研究方向为复杂环境下输电线路电晕放电与电磁环境效应、等离子体建模诊断、电磁场数值计算, E-mail: shilong.huang@ncepu.edu.cn.

朱雷 (1986-), 男, 高级工程师, 研究方向变电检修、电气试验技术及相关管理。

刘云鹏 (1976-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为特高压输电技术、电气设备在线检测和绝缘。

CORMAC Corr (1977-), 男, 副教授, 博士生导师, 澳洲国立大学等离子体中心主任, 研究方向为仿星器核聚变、特种材料界面放电特性。