楔形介质层对大气压介质阻挡放电的影响研究

李建¹ 王坤^{1,2*} 王世庆² 金凡亚² 但敏² (1. 内江师范学院 内江 641100; 2. 核工业西南物理研究院 成都 610041)

Influence of Wedge-Shaped Dielectric Layer on Atmospheric Dielectric Barrier Discharge

LI Jian¹, WANG Kun^{1,2*}, WANG Shiqing², JIN Fanya², DAN Min² (1. Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China; 2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract Wedge-shaped quartz stone strips were added as an additional dielectric layer to study their influence on dielectric barrier discharge. The influence of wedge-shaped dielectric layer on dielectric barrier discharge was studied experimentally and simulated using simulation software. It is shown that the wedge-shaped dielectric layer has a great influence on the dielectric barrier discharge. The discharge breaks down near the tip of the wedge-shaped dielectric layer firstly and diffuses along the surface of the dielectric layer. A "low valley" of the electric field intensity appears inside the wedge-shaped dielectric layer, which increases the electric field intensity near the tip. The wedge-shaped dielectric layer changes the area of the dielectric layer. The accumulated charge on the dielectric surface changes the spatial electric field distribution, which has a great impact on the breakdown, the electron density, and the electron temperature. The discharge priority issue induced by the thickness of the dielectric layer provides more flexibility for related designation.

Keywords Dielectric barrier discharge, Plasma, Wedge-shaped dielectric layer, Discharge structure

摘要 为了研究楔形介质层对大气压介质阻挡放电的影响,加入楔形石英石作为附加介质层。通过实验和模拟分析的 方法研究了楔形介质层对大气压介质阻挡放电的影响。结果表明:楔形介质层对介质阻挡放电有很大影响,放电在楔形介质 层的尖端区域首先击穿,再沿介质层表面弥散。楔形介质层内部出现的场强"低谷区",提高了其尖端附近的电场强度;楔形 介质层提高了介质层表面积,介质表面积累的电荷改变了空间电场分布,对放电击穿、电子密度和电子温度有很大影响。介 质层厚度引起的放电优先性问题为相关设计提供了更多的灵活性。

关键词 介质阻挡放电 等离子体 楔形介质层 放电结构 中图分类号: O539 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202305001

大气压低温等离子体具有无需真空设备、操作 方便等优点^[1-2],在材料表面改性^[3,4]、薄膜沉积^[5-7]、 等离子体医学^[8]和等离子体光源^[9-11]等领域广泛应 用。在大气压等离子体实现方法中,介质阻挡放电 和电晕放电是最常见的方法。介质阻挡放电可以 实现在大气压、高功率密度条件下的稳定放电,是 实现大气压低温等离子体的最重要方法。

介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD),又称介质放电或无声放电,通常由一对电极、

一个或两个介质层和气体间隙组成。介质阻挡放 电通常由交流电源或脉冲电源驱动,频率从 50 Hz 到几十 MHz。在介质阻挡放电中,当气体间隙的电 场强度达到击穿阈值时,气体分子被电离,产生正、 负带电粒子。在每一个放电通道内,带电粒子在外 加电场的作用下向两极运动并在介质表面积累形 成表面电荷,产生与外加电场相反的场强。由于气 体间隙的净电场强度等于外加电场强度与反向电 场强度的差值,随着表面积累的电荷的增加,净电

收稿日期:2023-05-03

基金项目:内江师范学院校级重点项目(2020ZD010; X22B0105)

^{*}联系人:E-mail: wangkun6236@126.com

场强度降低,放电熄灭。在后半周期,外加电场与 表面积累的表面电荷产生的电场同向,放电更易于 发生。介质阻挡放电通过介质表面积累的电荷抑 制放电向电弧放电转化,同时也可以促进放电的 产生^[12]。

作为介质阻挡放电结构的重要组成部分,介质 层对介质阻挡放电的放电过程有很大影响。在介 质阻挡放电过程中,介质层结构和性质对于产生更 密、更强的放电有关键作用。董丽芳等^[12-14]研究了 不同电介质结构下介质阻挡放电的放电特性,他们 根据介质层的导电性的不同,提出零维、一维和三 维电荷输运模式,通过实验验证了三者的不同之处, 同时应用光谱测量了大气压下介质阻挡放电的电 子密度。王辉等^[15]研究了平板—平板、多针—平板 和筛网—平板三种电极结构下,介质阻挡放电的放 电特性,分析了三种电极结构对介质阻挡放电的影 响,指出针状电极尖端产生电晕效应,筛网电极可 实现大气压辉光放电。孙晶晶等[16]研究了不同电 极结构的介质阻挡放电中气、液两相条件下,不同 类型的电极结构(网—板、管—板、刃—板)对介质 阳挡放电的影响,计算了放电功率等主要放电参数。 卢洪伟等[17]研究了不同目数的铜网电极及铜片电 极对降解亚甲基蓝废水过程的影响。为了获得大 气压介质阻挡放电中更详尽的放电参数,应用计算 机模拟是一种好的方法[18-20]。

在以往的介质阻挡放电结构的研究中,研究者 们主要针对不同的电极结构进行了改进和研究,对 不同结构的介质层结构的研究还很少见。本文将 针对楔形介质阻挡放电对大气压介质阻挡放电的 影响进行研究,应用 COMSOL Multiphysics 6.0-Trial version 模拟其放电过程,进一步分析介质层形状对 介质阻挡放电的影响。

1 实验

图1给出了介质阻挡放电测试装置。装置由 放电发生器,高频、高压交流电源和连接线构成。 放电发生器由带有散热肋片的铝质上电极、下电极, 气体间隙和电极间的介质层构成:上电极连接于一 块聚四氟乙烯板上,由两侧的立柱支撑杆固定并调 节高度;下电极固定在底座上,同时实现机械固定 和接电连接;在两电极间采用石英(或陶瓷)隔开。 工作时,将上电极连接于高压电源的高压电极,下 电极与地相连。本实验中采用正弦交流电源,电源



图1 介质阻挡放电装置

Fig. 1 The apparatus of dielectric barrier discharges

频率取为 10 kHz, 电源电压可以从几百伏特连续调 节至上万伏特。

实验中,采用空气作为放电气体,压强为1 atm, 采用一侧涂覆 ITO 膜的石英玻璃作为放电装置的 上电极,放电间隙为1 mm。

图 2 给出了采用透明电极(上电极)的介质阻 挡放电中观测到的介质阻挡放电图片。从图 2 可以 看出:大气压下介质阻挡放电由一系列随机产生的 放电细丝构成,形成放电通道,离子和电子经放电 通道,在介质表面积累形成表面电荷。在电源的前 半周期中,介质表面积累的电荷导致的反向电场使 介质阻挡放电在转化为电弧放电前熄灭;在电源的 后半周期中,表面电荷与施加的外加电场同向,放 电更易发生。由于介质层的存在,介质阻挡放电可 以实现在有限的放电空间中施加更大的放电功率, 介质层对放电过程和放电稳定性有很大的影响。



图2 介质阻挡放电正面视图



为了研究楔形介质层对介质阻挡放电的影响, 本文设计了带有楔形介质层的放电结构。图 3 给出 了采用楔形介质层的介质阻挡放电结构示意图。 在两电极间,放置一层厚度为 2.0 mm 的石英玻璃板, 在石英玻璃板上放置三个楔形条状介质层(截面为 等边三角形、边长为 8.0 mm、长为 120 mm, 商用石 英石,主要成分是石英、相对介电常数为 3.58)。在 两电极上施加交流电压,放电频率为 10 kHz,逐渐 增大电压,观察放电过程。







从放电过程来看,放电细丝首先在石英石的尖端位置产生,之后放电细丝在介质表面扩散,在楔形介质尖端附近形成表面等离子体。图4给出了应用楔形介质的介质阻挡放电过程图,放电发生于楔形介质的尖端,放电呈丝状放电形态。随着电压继续升高,放电会沿着楔形介质表面继续向两边扩散, 形成表面等离子体,但是放电始终无法直接在楔形 介质底部与阳极间直接产生放电细丝,放电区域始 终出集中在楔形介质层尖端附近区域。





2 介质阻挡放电稳定性的模型建立

为了分析采用楔形介质层对介质阻挡放电过 程的影响,采用 COMSOL Multiphysics 6.0-Trial version 对上述放电过程进行模拟分析。在模拟过 程中,介质阻挡放电过程的主要参数如表1所示。 模拟中采用的放电气体为空气,气体压强取为1.0 atm。电源电压采用正弦交流电源,放电频率为10.0 kHz,电源电压为2.0 kV。

图 5 给出了应用楔形介质层的介质阻挡放电

表 1 DBD 樽	夏拟过程中的主要参数
-----------	------------

Tab. 1 Parameters in dielectric barrier discharge simulation

Name	Expression	Description
f	$10^4 \mathrm{Hz}$	Frequency
width	30.0 mm	Width of the model
height	8.0 mm	Height of the model
d_1	1.0 mm	Thickness of dielectric 1
$d_{ m g}$	7.0 mm	Gas gap distance
d_2	1.0 mm	Thickness of dielectric 2
d_{x}	5.0 mm	Edge length of Wedge dielectric
depth	20.0 mm	Depth of the model



图5 楔形介质层介质阻挡放电模拟模型

Fig. 5 Simulation model of DBD with wedge dielectric layer

的模型,上表面和下表面分别采用厚度为 1.0 mm 的 石英介质层(相对介电常数为 3.75)。在下表面上放 置截面为正三角形(边长为 5.0 mm)的楔形介质层, 中间区域为气体放电区。在楔形介质上方 0.1 mm 处选取一水平取值线,用于后续进一步分析放电 特性。

图 6 出了网格划分图,采用物理控制法构建网格,在等离子体与介质层边界处,采用更精细的网格,以便分析该区域的等离子体特性。





在模拟中,考虑的主要过程由以下方程确定。 式(1)和(2)描述了粒子的输运和电子的能量过程。 在式(3)和(4)中描述了电位移矢量与电荷的关系以 及电位移与电势的关系。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_e = R_e - \left(\vec{u} \cdot \nabla\right) n_e \tag{1}$$

$$\frac{\partial n_{\varepsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_{\varepsilon} + \vec{E} \cdot \vec{\Gamma}_{\varepsilon} = S_{en} - \left(\vec{u} \cdot \nabla\right) n_{\varepsilon} \qquad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_q \tag{3}$$

$$\vec{E} = -\nabla U \tag{4}$$

模拟中,以氮原子的相关反应放电作为主要反应过程。表2给出了模拟过程中的主要化学反应过程,反应主要发生在等离子体区域和边界。表中的 N、p、n和e分别代表氮原子、氮离子、氮负离子和 电子。

表 2 模拟过程中的主要化学反应

Tab. 2 Main chemical reactions of dielectric barrier discharges

Main Reactions	Reacton Zone
N+e=>p+2e	Domain
N+e =>n	Domain
N+N+e=>n+N	Domain
e+p=>N	Domain
n+p=>N+N	Domain
p=>N	Boundary
p=>N	Boundary
n = N	Boundary

3 结果与讨论

模拟过程中,计算时长取为 1×10⁻⁴ s,即一个放 电周期;计算分为等时间步长,共分为 200 步。通过 模拟计算,可以获得放电过程中的主要等离子体参 量和放电参量。放电过程中的初始电子密度为 10⁶ m⁻³,介质表面设置于为表面电荷积累属性。

3.1 电子密度和电子温度分布

电子密度和电子温度是介质阻挡放电过程中 的重要的等离子体参量。图7给出了应用楔形介质 层的介质阻挡放电的电子密度分布,时间分别为: *t*=8.75×10⁻⁵ s和*t*=9.90×10⁻⁵ s。如图7(a)所示,电子 密度峰值为整个放电过程中的最大值,电子密度的 最大值出现在楔形介质层尖端附近,在楔型介质之 间,电子密度更高。随着等离子体的进一步演化(如 图7(b)所示),等离子体中的电子密度在楔形介质 层之间优先发展,在楔形介质层的尖端附近,电子 密度依然最大,但两尖端之间出现明显的高电子密 度区,即:等离子体向该区域发展。

图 8 给出了应用楔形介质层的介质阻挡放电 的电子温度度分布,时间与电子密度分布相同: *t*=8.75×10⁻⁵ s 和 *t*=9.90×10⁻⁵ s。图 8(a) 给出的电子 温度为电子温度峰值,最高电子温度为 0.73 eV,分 布于楔形介质层尖端附近。图 8(b) 给出了放电的



- 图7 楔形介质层介质阻挡放电的电子密度分布:(a) t= 8.75×10⁻⁵ s;(b) t=9.90×10⁻⁵ s
- Fig. 7 Electron density distribution of DBD with wedge dielectric layer: (a) $t=8.75\times10^{-5}$ s; (b) $t=9.90\times10^{-5}$ s



图8 楔形介质层介质阻挡放电电子温度分布: (a) t=8.75× 10⁻⁵ s; (b) t=9.90×10⁻⁵ s

Fig. 8 Electron temperature distribution of DBD with wedge dielectric layer: (a) $t=8.75\times10^{-5}$ s; (b) $t=9.90\times10^{-5}$ s

进一步演化过程,放电区域从楔形介质层的尖端附近,进一步向其正上方的介质层发展。在楔形电极的中间区域,电子温度则远低于楔形介质层的尖端 附近区域。

3.2 电场强度和电势分布

介质阻挡放电中,电场强度和电势分布是放电 中的重要电学参量,直接决定了介质阻挡放电击穿 过程、电子密度分布和电子温度等。为了分析楔形 介质层对介质阻挡放电的影响,下面对介质阻挡放 电过程中的空间电场强度和电势分布进行分析。 放电时间分别为 t=8.75×10⁻⁵ s 和 t=9.90×10⁻⁵ s。

图 9 给出了应用楔形介质层的介质阻挡放电 过程中的电场强度分布。从图 9(a) 可看到,在楔形 介质层的尖端区域,最高电场强度为 3.92×10⁵ V/m。 场强分布与图 8(a) 的等离子体中的电子温度分布 一致。可见,电场强弱直接决定了电子温度分布。 图 9(b) 给出了电场继续演化后的场强分布。





Fig. 9 Electric field intensity distribution of DBD with wedge dielectric layer: (a) $t=8.75\times10^{-5}$ s; (b) $t=9.90\times10^{-5}$ s

在楔形介质层尖端与对面介质层之间区域的 电场强度明显高于其他区域,楔形介质层的内部偏 下部分,出现了显著的场强分布"低谷区"。这一区 域的出现,相当于减小了电极间距,使其尖端区域 的场强明显高于其他区域。

图 10 给出了应用楔形介质层的介质阻挡放电 过程中的电势分布。在楔介质层的尖端区域,电势 是显高于其他区域。楔形介质层的加入改变了空 间的电势分布。

楔形介质层使介质层表面积的增大,由于此处 的场强更高,更易于形成放电击穿,放电细丝中的 电荷在表面积累高于其他区域。在放电的后半周 期中,空间电荷与外加电场强度方向相同,电势相 应提高。

由图 9 和图 10 可知,电场强度分布与电势分布 不具有同步性。空间的电场强度分布除了与外加 电源有关以外,还与介质表面的电荷积累有关。楔 形介质层使介质内部产生一个场强"低谷区",大大



图10 楔形介质层介质阻挡放电的电势分布: (a) t=8.75× 10⁻⁵ s; (b) t=9.90×10⁻⁵ s

Fig. 10 Electric potential distribution of DBD with wedge dielectric layer: (a) $t=8.75\times10^{-5}$ s; (b) $t=9.90\times10^{-5}$ s

增强了其尖端区域的电场强度。同时,楔形介质层 大大改变了介质层的表面积,表面积累的电荷与外 加电场相叠加,共同提高了表面的电场强度分布。

3.3 取值线上楔形介质的介质阻挡放电特性

为了进一步分析楔形介质对介质阻挡放电的 影响,在等离子体放电区域的尖端上方 0.1 mm 水平 方向作一取值线(如图 5 所所示)。分析方取值线上 的数值变化可进一步分析等离子体性质的空间 变化。

图 11 给出了应用楔形介质层的介质阻挡放电 中取值线上的电子密度分布。放电时间选择为放 电过程中典型的放电阶段。从图中可以看出,楔形 介质层对介质阻挡放电中的电子密度分布有很大





Fig. 11 Electron density on the value line in DBD with wedge dielectric layer

影响。在楔形介质的尖端出现了电子密度的峰值, 在楔形介质之间区域,出现电子密度分布的波动, 波动的峰值出现在楔形介质层尖端中间位置。

图 12 给出了应用楔形介质的介质阻挡放电中 取值线上的电子温度分布。电子温度的峰值出现 在楔形介质层的尖端区域。在两介质尖端之间区 域,电子温度出现一个谷值。在尖端中相间的区域, 电子密度与电子温度分布不同步变化:电子密度出 现峰值,而电子温度出现谷值。这说明该区域的等 离子体产生是由从尖端产生并扩散至此的电子碰 撞电离产生的。





Fig. 12 Electron temperature on the value line in DBD with wedge dielectric layer

图 13 给出了应用楔形介质的介质阻挡放电中 取值线上的电场强度分布。电场强度峰值出现在 楔形介质的尖端区域,电场强度的整体分布与电子 温度分布对应。





Fig. 13 Electric field intensity on the value line in DBD with wedge dielectric layer

图 14 给出了应用楔形介质的介质阻挡放电中 取值线上的电势分布。在楔形介质层的尖端附近 区域,电势值明显高于楔形介质层尖端之间区域。 在尖端最近区域,电势出现一个类似于"火山口"谷 值,这是由于在楔形介质层尖端最近区域的积累的 电荷所引起的电势与外加电势相反所致。



图14 楔形介质阻挡放电中取值线上电势

Fig. 14 Electron potential on the value line in DBD with wedge dielectric layer

4 结论与展望

本文应用实验和数值模拟方法,研究了楔形介 质层对介质阻挡放电的影响。在介质阻挡放电中 加入楔形石英石作为附加介质层,进行介质阻挡放 电的研究。应用模拟软件,模拟分析了楔形介质层 对介质阻挡放电的影响。实验证明,楔形介质层对 介质阻挡放电有很大影响,放电首先在楔形介质层 的尖端区域发生,再沿介质层表面进行弥散。模拟 结果表明:楔形介质层改变了空间电子密度和电子 温度分布,电子密度和电子温度峰值都出现在楔形 介质层的尖端区域;楔形介质层大大改变了空间的 电场强度和电势分布,在介质层内部出现的场强 "低谷区"提高了楔形介质层尖端的电场强度;楔形 介质层改变了介质层的表面积,介质表面积累的电 荷改变了空间电场分布,进而影响放电击穿、电子 密度和电子温度分布。本文研究内容对于稳定大 气压介质阻挡放电装置的设计有借鉴作用,相关设 备在材料表面改性、等离子体化学反应和等离子体 医学等领域有应用前景。

参考文献

[1] Fridman A, Chirokov A, Gutsol A. Non-thermal atmospheric pressure discharges[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2005, 38(2): R1–R24

- [2] Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1–46
- [3] Wang K, Li J, Ren C S, et al. Surface modification of polyethylene (PE) films using dielectric barrier discharge plasma at atmospheric pressure[J]. Plasma Science and Technology, 2008, 10(4): 433–437
- [4] Wang K, Li J. Surface modification of polyethylene membrane with air dielectric barrier discharge plasma[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(4): 337–341 (王坤, 李建. 空气介质阻挡放电对聚乙烯表面吸湿性的改性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(4): 337–341(in chinese))
- [5] Liu Y H, Li J, Liu D P, et al. Properties and deposition processes of a-C: H films from CH₄/Ar dielectric barrier discharge plasmas[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(20-21): 5819–5822
- [6] Liu Y H, Zhang J L, Wang W G, et al. Deposition of diamond-like carbon and analysis of ion energy in CH₄ or CH₄+Ar dielectric barrier discharge plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(3): 1458–1463 (刘艳红, 张家良, 王卫国, 等. CH₄或CH₄+Ar介质阻挡放电中的离子能量和 类 金 刚 石 膜 制 备[J]. 物 理 学 报, 2006, 55(3): 1458–1463(in chinese))
- Liu D P, Yu S J, Liu Y H, et al. Deposition of diamond-like carbon films by barrier discharge plasma with 1.4 and 20 kHz power sources[J]. Thin Solid Films, 2002, 414(2): 163–169
- [8] Weltmann K D, Polak M, Masur K, et al. Plasma processes and plasma sources in medicine[J]. Contributions to Plasma Physics, 2012, 52(7): 644–654
- [9] Wang K, Wang S Q, Li J, et al. Design of flat-Panel lamp generated by coplanar dielectric barrier discharge plasma[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(12): 1119–1123 (王坤, 王世庆, 李建, 等. 共面介质阻挡放电等离子体平板光源设计与研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(12): 1119–1123(in chinese))
- [10] Li J, Wang K. Radiation efficiency of flat panel plasma ultraviolet lamps[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(12): 1219–1222 (李建, 王坤. 平板等离子体紫外光源紫外光辐射效率研究[J]. 真空 科学与技术学报, 2013, 33(12): 1219–1222(in chinese))
- [11] Li J, Wang K, Wang S Q, et al. Research in luminous efficacy of the mercury free plasma flat panel lamps[J]. Nuclear fusion and Plasma Physics, 2012, 32(1): 92–96 (李 建, 王坤, 王世庆, 等. 无汞等离子体平板光源发光效率 的研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2012, 32(1):

92-96(in chinese))

- [12] Dong L F, Yang Y J, Liu W Y, et al. Characteristics of dielectric barrier discharge with different dielectric layer structures[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(2): 025216 (董丽芳,杨玉杰,刘为远,等. 不同电介质结构下介质 阻 挡 放 电 特 性 研 究[J]. 物 理 学 报, 2011, 60(2): 025216(in chinese))
- [13] Dong L F, Ran J X, Mao Z G. Direct measurement of electron density in microdischarge at atmospheric pressure by Stark broadening[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(16): 161501
- [14] Dong L F, Qi Y Y, Zhao Z C, et al. Electron density of an individual microdischarge channel in patterns in a dielectric barrier discharge at atmospheric pressure[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2008, 17(1): 015015
- [15] Wang H, Sun Y Z, Fang Z, et al. Study on the characteristics of dielectric barrier discharge of different electrode configuration[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 25–27 (王辉, 孙岩洲, 方志, 等. 不同电极结构下介质阻 挡放电的特性研究[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 25–27(in chinese))
- [16] Sun J J, Xu N, Xiong H B, et al. Comparison on discharge characteristics of gas-liquid two-phase dielectric barrier discharge with different electrode structures[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 79-85(孙晶晶, 徐楠, 熊海波, 等. 不同电极结构气液两相介质阻挡放电特性比较[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 79-85(in chinese))
- [17] Lu H W, Ni Z J, Zha X J. Effect of different electrode structures on degradation of methylene blue wastewater by DBD plasma[J]. High voltage Apparatus, 2023, 59(4): 62-69(卢洪伟, 倪志娇, 查学军. 不同电极结构对DBD 降解亚甲基蓝废水的影响[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 62-69(in chinese))
- [18] Fan W L, Sheng Z M, Zhong X X, et al. Particle simulation of filamentary structure formation in dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(9): 094103
- [19] Abidat R, Rebiai S, Benterrouche L. Numerical simulation of atmospheric dielectric barrier discharge in Helium gas using COMSOL Multiphysics[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control. Algiers: IEEE, 2013: 134-139
- [20] Jovanović A P, Stankov M N, Loffhagen D, et al. Automated fluid model generation and numerical analysis of dielectric barrier discharges using Comsol[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(11): 3710–3718