

同轴介质阻挡放电发生器介质层等效电容和负载特性研究*

赵凯 牟宗信[†] 张家良

(三束材料改性教育部重点实验室(大连理工大学), 大连理工大学物理与光电工程学院, 大连 116024)

(2014年3月27日收到; 2014年5月6日收到修改稿)

大气压介质阻挡放电(DBD)可以在常压下产生非平衡等离子体, 已经成为热点研究领域. 通过脉冲或交变电源激发放电, 研究电源输出特性、电源与放电发生器负载间的匹配和外界条件对放电的影响对于理解放电现象和提高放电效率具有重要意义. 本文采用Lissajous图形法, 分别研究了驱动电压、气流速率等因素影响同轴DBD发生器介质层等效电容及负载幅频特性的规律. 结果表明, 气流速率和驱动电压等外界条件影响DBD发生器的负载特性: 介质层等效电容随气流速率增大而减小, 随驱动电压增大而增大; 幅频特性曲线均表现出RLC回路谐振现象, 谐振频率随气流速率增大而增大, 随驱动电压增大而减小. 通过对比发现, 介质层等效电容随频率的变化曲线与幅频特性曲线具有一致的特征, 介质层等效电容是影响电路谐振频率动态变化的主要因素. 提出了一种有关介质层等效电容的形成机制.

关键词: 介质阻挡放电, 负载特性, 阻抗匹配, 等离子体**PACS:** 52.80.Tn, 52.80.Mg, 52.25.Mq**DOI:** 10.7498/aps.63.185208

1 引言

大气压介质阻挡放电(DBD)是产生非热平衡等离子体的便捷手段, 已被广泛地用在臭氧发生器、CO₂激光器、准分子紫外光源、污染物控制与脱除及材料表面改性等领域^[1]. 为获取大面积均匀低温等离子体, 研究放电条件诸如驱动电压、驱动频率、气隙间距、介质成分与厚度、气流、工作压强等因素影响放电特性的机制成为近年来DBD领域的研究热点^[2-10].

外界条件能够显著影响DBD发生器的放电特性和放电模式, 对于其作用机制的研究已经得到学者的关注. Nersisyan和Graham^[11]发现, 在大气压DBD放电中控制He气流速在一定范围之内, 即可实现稳定的均匀放电模式, 其原因是载入的He气流量降低了击穿电压, 可同时达到最高放电效率及

He亚稳态数目. 根据不同气流速率条件下产生的下游区域等离子体射流长度的差异, Li等^[12]将其划分为层状模式、过渡模式与湍流模式. Akishev等^[13]指出, 快速气流抑制了放电过程中的热电离不稳定性, 使得空气环境中的辉光放电更加稳定. Luo等^[14]发现, 大气压氦气DBD放电电流随着流速的增加先减小后增大, 并指出这是由于氮分子对氦亚稳态的猝灭作用所致. 董丽芳等^[15]研究了氩气和空气混合气体介质阻挡放电中放电丝结构随外加电压及气压的变化过程, 提出了相变的概念. 江南等^[16]在氦等离子体射流研究中发现, 外加电压不同可呈现类streamer放电和类辉光放电模式. Liu等^[17]利用一维流体模型模拟了不同驱动频率下氩等离子体放电模式转变. 放电条件的改变导致放电模式的改变, 因而可影响放电电路的谐振特性. 将电源与DBD发生器构成的电路系统进行等效模型化, 是研究放电条件与等效电路电气特性之

* 国家自然科学基金(批准号: 21173110, 11375041)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: mzhongxin@dlut.edu.cn

间联系的有效方法.

为提高DBD发生器的放电效率,改善等离子体的均匀性,通常采用的措施是实现电源与负载之间的阻抗匹配^[18,19],使得电源输出的能量更多地耦合到发生器中,降低了发生器对电源的反射功率.但是研究发现,在DBD过程中,驱动电压、气流速率等外界条件可能导致放电系统的电气特性发生动态变化,影响阻抗匹配的效果.DBD通常采用方波脉冲电源或者正弦的脉冲电源,其过程中经历了等离子体点火、熄灭和亚稳态激发、复合过程,以及电荷在空间迁移和壁面吸附等复杂的宏观、微观过程;DBD的放电气体和放电方式也会影响电气特性.根据当前研究结果,为分析内在的影响机制,建立合理的电路模型对研究提高匹配效果非常重要.尽管目前文献报道了一些DBD放电系统的匹配方案,但未深入考虑气流等条件对系统电学参量及放电特性的影响.为了简化分析,本文集中研究介质层等效电容这一电学特征参量.该参量能够通过Lissajous图形法测量.本文利用实验测量参数,结合等效电路模型,分析了负载电阻、电抗与阻抗值随驱动电压和气流速率的变化规律,为实现电源与负载间的动态阻抗匹配提供技术手段.

Q - V Lissajous图形法^[20]是诊断DBD放电电气性能的最常用手段.本文利用放电电压与电流波形获得Lissajous图形,并对大气压同轴DBD发生器进行电学诊断,得到放电发生器等效介质层电容值随驱动电压和气流速率条件变化的动态变化规律,然后研究驱动电压和气流速率影响发生器负载幅频特性的规律.

2 实验装置

实验采用的DBD放电结构如图1所示,电极是同轴结构,介质层为石英管,构成了一种大气压同轴DBD发生器.石英管长为250 mm,内径为2.5 mm,外径为4.7 mm.中心电极采用直径为0.2 mm的钨丝.在石英管外面缠绕直径为0.8 mm的铜丝作为驱动电极,长度为110 mm,匝数为15.DBD电极置于一个内置气路的不锈钢基座上.本次实验在大气压环境中进行,以空气作为放电气体,通过LZB-10转子流量计控制气流速率,范围为 $0\text{--}1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

DBD电源采用型号为CTP-2000 K低温等离

子体实验电源(Coronalab公司生产),产生频率 $1\text{--}60\text{ kHz}$ 的准正弦高压,施加在DBD发生器的驱动电极上.采用Tektronix公司生产的P6015A型(带宽75 MHz,分压比 $1:1000$)高压探头和Pearson 6585型(可用上升沿时间1.5 ns)的电流探头对放电进行电学诊断.用Siglent公司生产的SD-S1022C型数字存储示波器采集电压、电流信号.

为测量DBD放电电极之间的迁移电荷 Q ,文献^[21]中大多采用一个积分电容与DBD模块串联以测量放电发生器中流过的电荷量 Q .但是这种方式会增加被测电路的容性和提高位移电流,也可能引入额外的噪音,影响测量精确度;还需要采取更有效的手段区分位移电流与传导电流,增加了数据处理的复杂性.本文用电流探头直接测量DBD电流信号,将电流信号对时间积分得到转移电荷量 Q ,最后得到 Q - V Lissajous图形.采用编制的Lissajous图形参数计算程序处理实验数据.

DBD时随时间演化的Lissajous图形多为平行四边形,其两组对边的斜率分别对应于放电和熄灭时电极结构的有效电容 C_{eff} ,其中放电阶段对应的有效电容为介质层等效电容,熄灭阶段对应的有效电容为介质层等效电容与气隙等效电容串联的总电容.由于放电阶段内电路性能主要取决于介质层等效电容,因此本文主要采用介质层等效电容作为联系放电特性的参量.实验发现,同轴DBD发生器的Lissajous图形几乎为平行四边形,在放电与熄灭的过渡阶段通过平滑的曲线连接,但并不影响等效电容的计算.图2给出了气流速率分别为 $0, 0.1$ 和 $0.6\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时的放电Lissajous图形,其中电源驱动频率为 40 kHz ,电压幅值为 7.7 kV .

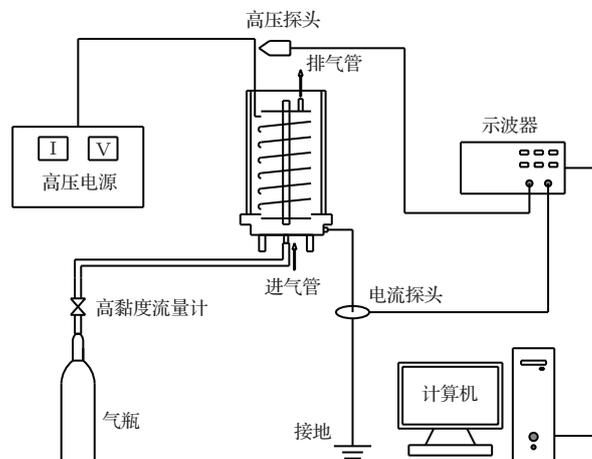


图1 DBD装置的结构简图

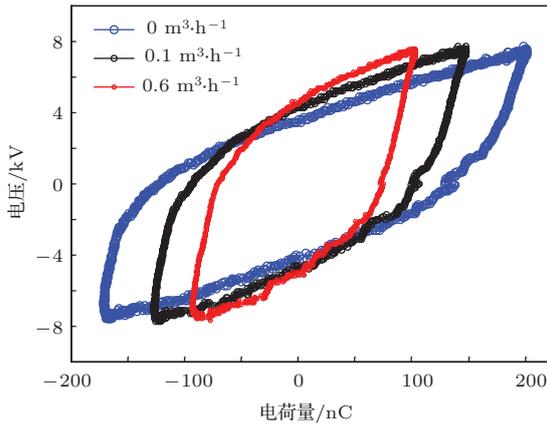


图2 DBD 放电 Lissajous 图形

3 负载特性

3.1 幅频特性

实验发现, 工作于不同驱动频率时, 发生器负载上的电压随气流速率变化的关系可表现出截然相反趋势. 如图3所示, 驱动电压幅值为7.25 kV, 当驱动频率为28 kHz时, 增加气流速率负载电压随之减小; 而当驱动频率为40 kHz时, 负载电压随气流速率的增大呈增大趋势.

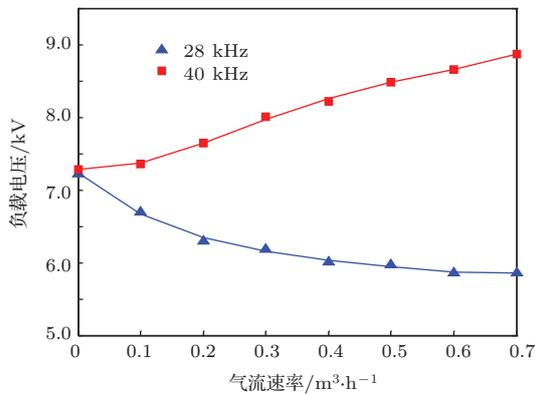


图3 驱动电压一定时不同驱动频率下负载电压随气流速率的变化

谐振特性是DBD发生器的重要特征之一. 发生器与电源输出之间的匹配状态决定了系统的放电效率, 工作于谐振频率时系统的功率效率最高. 但是受到放电条件的影响, 发生器的阻抗会发生变化, 放电谐振频率也会发生变化. 图4为电源输出电压固定, 气流速率影响DBD发生器幅频特性的规律. 如图所示, 增加气流速率, 谐振频率逐渐增大, 由气流速率为 $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时的32 kHz增加到气流速率为 $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时的33.6 kHz; 同时, 增大气流速率, 谐振负载电压也逐渐升高; 当驱动频率在

小于谐振频率的区域内变化时, 发生器负载电压变化率较大, 表现出明显的容性负载特征.

值得注意的是, 在驱动频率处于32 kHz附近, 不同气流速率对应的负载电压近似相等, 约7 kV. 也就是说, 工作于此频率的放电状态受气流的影响很小, 这对DBD应用中稳定放电状态具有一定的指导意义.

图5给出在无气流时不同电源输出电压条件下对应的发生器负载的幅频特性变化曲线, 四条曲线对应的幅频特性峰值电压分别为5.5, 5.8, 6.4和6.8 kV. 可以发现, 依次增加电源输出电压后, 放电发生器电路的固有谐振频率逐次降低, 从峰值电压为5.5 kV时的34 kHz减少到6.8 kV时的31.4 kHz, 即谐振频率随电源输出电压的增加而向左移动.

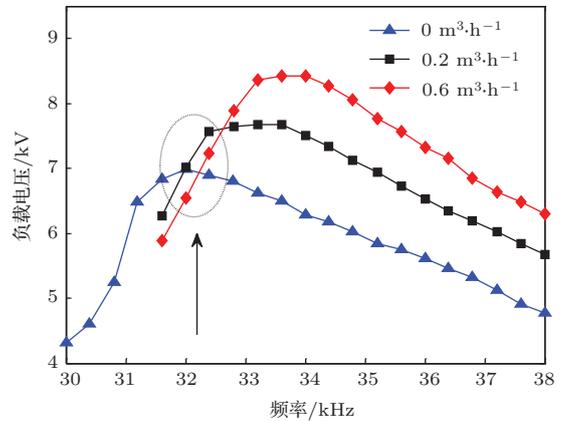


图4 气流速率对DBD发生器幅频特性的影响

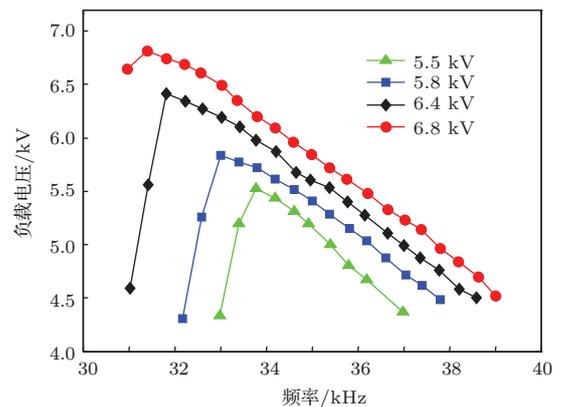


图5 无气流时电源输出电压对发生器负载幅频特性的影响

3.2 介质层等效电容

根据DBD放电的Lissajous图形可以计算发生器介质层在不同条件和不同放电状态的等效电容. 图6给出了发生器的介质层等效电容随气流速率的变化曲线, 驱动频率和驱动电压保持恒定,

三条曲线对应的放电参数分别为28 kHz和7 kV, 35 kHz和7.4 kV, 40 kHz和7.7 kV. 图7给出了发生器介质层等效电容随驱动电压的变化曲线, 其中三条曲线分别对应0, 0.2和0.6 m³·h⁻¹三种不同的气流速率, 驱动频率保持为38 kHz. 由图6可知, 在三种不同放电参数下, 随气流速率的增加, 发生器介质层等效电容呈减小趋势. 由图7可知, 介质层等效电容均随驱动电压的增大而增大, 且在驱动电压较低时介质层等效电容随之变化较快, 当驱动电压达到一定值后趋于稳定, 进入饱和区.

在DBD中, 放电功率与驱动电压、频率的关系符合幂次法则^[22]. 图6表明, 在不同电源参数下, 介质层等效电容随气流速率的变化率不同, 推测这个现象与放电功率有关: 在28 kHz, 7 kV条件下, 放电功率相对较小, 气流速率在0到0.2 m³·h⁻¹之间, 介质层等效电容降落最快; 在40 kHz, 7.7 kV条件下, 放电功率增大, 气流速率较小时, 介质层等效电容变化较缓慢; 在35 kHz, 7.4 kV条件下, 变化特性居于上述两种情况之间.

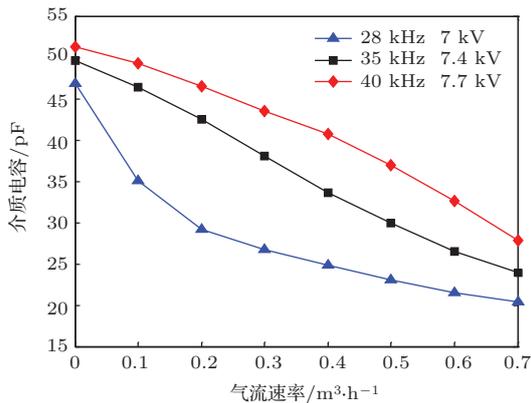


图6 发生器介质层等效电容随气流速率的变化

4 结果与讨论

为了深入了解气流速率等放电条件对于介质层等效电容的影响, 图8给出了与图4对应的三种气流速率下DBD发生器介质层等效电容随频率的变化规律. 对比图4可发现, 介质层等效电容随驱动频率的变化曲线与放电发生器的幅频特性规律曲线相似, 同一气流速率条件下介质层等效电容峰值对应的频率与其电路相应的谐振频率是一致的. 不同的是介质层等效电容曲线峰值区比较平缓, 这是由于在谐振频率附近介质层等效电容已达到饱和状态, 即介质层等效电容随负载电压变化的响应

变得迟缓. 此外, 在不同气流速率条件下, 随着气流速率的增大, 发生器介质层等效电容基本呈降低趋势, 与图6趋势一致.

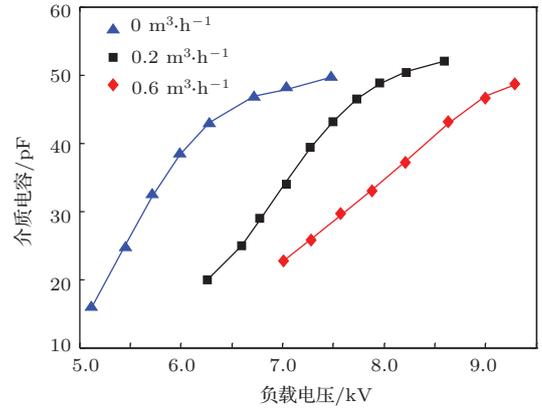


图7 发生器介质层等效电容随驱动电压的变化 (驱动频率保持为38 kHz)

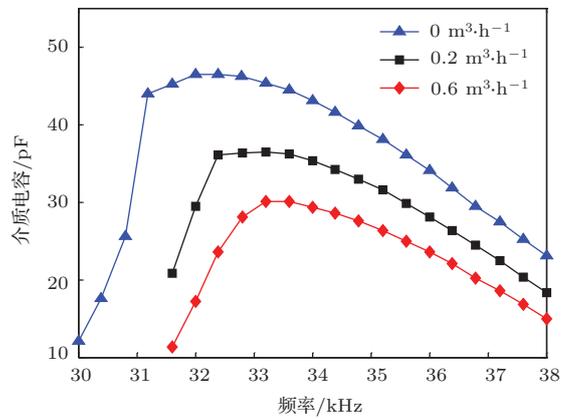


图8 不同气流速率时介质层等效电容随频率的变化 (条件与图4相同)

图9给出了与图5对应的四种电源输出电压下的DBD发生器介质层等效电容随频率的变化曲线. 由图可知, 不同电源输出电压条件下发生器介质层等效电容随驱动频率的变化曲线与放电发生器的幅频特性规律曲线也非常相似. 此外还可发现, 与幅频特性曲线相比, 介质层等效电容变化曲线的峰值略向右移动.

通常采用图10所示的电路作为DBD系统的等效电路, 电源输出变压器副边负载主要由副边漏感 L_s 、介质层等效电容 C_d 、气隙等效电容 C_g 、寄生电容 C_s 以及发生器支路端等效电阻 R (约等于稳压二极管阻值) 组成. 在气隙击穿之前, 电路等效于介质层等效电容 C_d 与气隙等效电容 C_g 串联; 而在放电阶段, 电路可等效为 C_d 与稳压二极管串联, V_g 表示气隙击穿电压. 由此可知, 在放电阶段等效电路中的负载电阻 R_s 值与电抗 X_s 值分别为

$$R_s = \frac{R(1/C - 1/C_d)/C_s}{R^2\omega^2 + 1/C^2}, \quad (1)$$

$$X_s = \frac{R^2L_s\omega^3 + L_s\omega/C^2 - R^2\omega/C_s - 1/CC_s/C_d\omega}{R^2\omega^2 + 1/C^2}, \quad (2)$$

其中, $C = 1/(1/C_s + 1/C_d)$, 负载阻抗值为 $Z_s = R_s + jX_s$. 而 DBD 发生器支路阻抗值为 $Z_r = R + 1/jC_d\omega$.

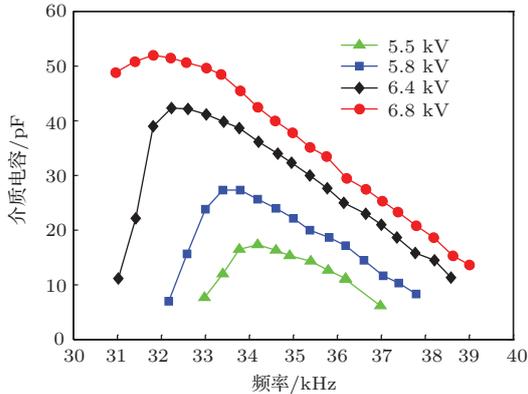


图9 不同电源输出电压下介质层等效电容随频率的变化(条件与图5相同)

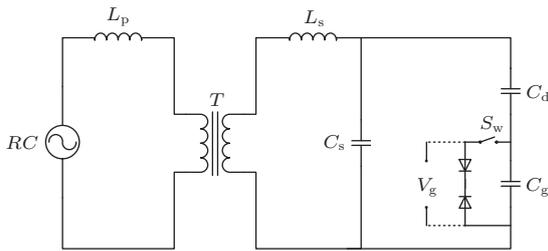


图10 DBD系统的等效电路图

根据实验测量得到的电学参数: $L_s = 0.165 \text{ H}$, $C_s = 115 \text{ pF}$, $R = 20 \text{ k}\Omega$, 根据电路理论计算给出了 DBD 发生器的动态负载特性规律, 如图 11 所示. 图中 (a), (b), (c) 和 (d) 分别对应 Z_r , R_s , X_s 和 Z_s 随频率的变化曲线, 其中三条曲线分别代表介质层等效电容为 20, 40 和 60 pF 的情形, 选择驱动频率变化范围为 10—50 kHz.

由图得知, X_s , Z_r 和 Z_s 均随频率发生了明显变化. 当频率较低时, X_s 为负值, 此时整个副边为容性负载, 随着频率的增大, X_s 逐渐减小, 直至为零; 当频率达到一定值后变为正值, 并随着频率进一步增加不断增大, 此时整个副边变为感性负载. 与电抗值相比, 副边电阻 R_s 值很小, 在实验范围内其大小在千欧数量级附近, 且随频率的改变其变化很小. 正是由于这个原因, 导致在放电过程中电抗构成阻抗的主要部分. 在图中亦可发现, 副边阻抗

Z_s 随着频率的改变先减小后增大, 最小阻抗值 $Z_{s\text{min}}$ 对应的频率即电路系统的谐振频率, 当发生器工作在此处时放电功率达到最大, 发生器负载电压最高, 更有利于气体击穿而产生放电. 发生器支路的阻抗值 Z_r 比其他参数数值大得多, 随着频率的增大呈现逐渐减小趋势.

当驱动频率一定时, 副边电阻 R_s 随介质层等效电容的增大而增大, 而副边电抗 X_s 、发生器支路的阻抗值 Z_r 均随介质层等效电容的增大而减小. 在不同的频率区间内, 副边阻抗 Z_s 随介质层等效电容的变化呈现出不同的变化趋势, 频率较低时 Z_s 随介质层等效电容的增大而减小, 而在频率较高时则表现为相反的趋势; 同时, 随着介质层等效电容的增大, 最小阻抗值 $Z_{s\text{min}}$ 对应的放电系统工作谐振频率逐渐降低, 根据电路模型得到的结果与前文实验结果相一致.

根据实验结果, DBD 充分表现出谐振特性: 在谐振频率处, 放电非常强烈. 根据模拟结果, 谐振时等效电路近似纯电阻电路, 其电抗很小, 因此阻抗值最低, 意味着较高的等离子体密度以及较高的等离子体导电性; 反之, 非谐振频率处放电弱, 电路阻抗值大, 仅表现在局部较小区域发生放电. 较大的气流速率能够提高谐振频率, 同时增加脉冲电压幅值, 这是因为增加气流速率导致电抗变化所致.

(1) 和 (2) 式给出了各电学参数和介质层等效电容之间的关系, 由此可知介质层等效电容对于描述放电回路电学特征的关键作用. 气流、驱动电压对 DBD 负载特性的作用机制主要是与介质层等效电容这一关键电学参量相关联的. 根据实验结果, 介质层等效电容的变化规律是气流速率增大, 导致介质层等效电容降低; 驱动电压升高, 导致介质层等效电容增加, 直至达到饱和值. 根据这一实验规律, 可以借助于模型电路的计算结果分析 DBD 发生器的动态阻抗变化特征, 进而找到实现发生器与电源之间的匹配和谐振的技术条件.

外界条件影响介质层等效电容的机制可以从电容的定义得到解释, 对于电介质层而言, 其电容可表示为

$$C_d = \varepsilon S / 4\pi k d, \quad (3)$$

其中 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_d$, ε_0 为真空介电常数, ε_d 为相对介电常数, S 为介质层两个表面的有效正对面积, k 为静电力常量, d 为介质层厚度.

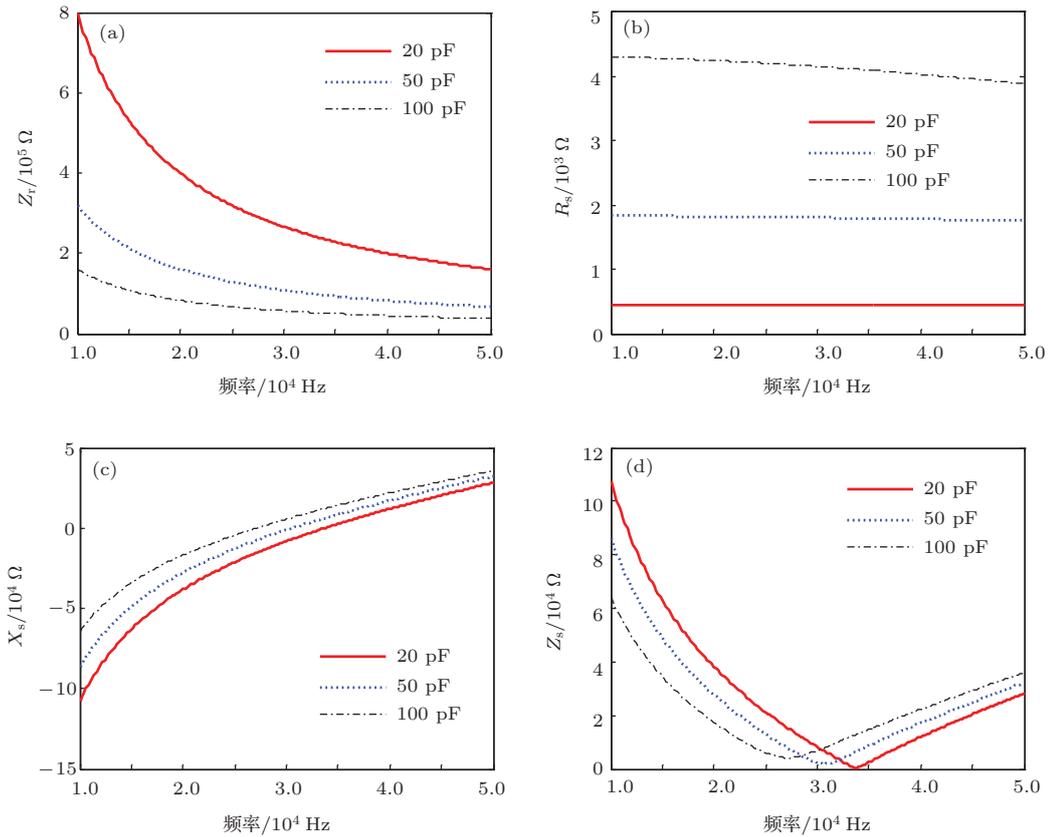


图 11 选择不同介质层等效电容条件时 (a) Z_r , (b) R_s , (c) X_s 和 (d) Z_s 随频率的变化 ($L_s = 0.165$ H, $C_s = 115$ pF, $R = 20$ k Ω)

对于本文中的 DBD 发生器而言,一方面,驱动电压的增大可以提高 DBD 发生器的有效放电功率,两极间丝状放电半径增大、放电通道增多,导致介质的有效正对面积增大,因而介质层等效电容增大;另一方面,通常介电常数是温度的函数,且其数值随着温度的增加而增大,增加驱动电压能够增强等离子体区域粒子碰撞,产生更多的焦耳热,导致介电常数随之增大.基于上述原因,增加驱动电压导致了发生器介质层等效电容增大;相对而言,快速气流通过带走的热能对放电空间起到冷却作用,减少丝状放电半径和放电通道数目,减弱放电强度,导致放电发生器的介质有效正对面积减少,导致发生器介质层等效电容的降低.根据气流影响电路谐振特性的规律,较高的气流速率导致了较高的谐振频率和较大的负载电压幅值,更有利于 DBD 放电实现大面积、均匀放电.图 12(a), (b) 分别为空气气流速率 $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 两种情况下 DBD 放电的图像,可发现后者的丝状放电结构明显少于前者.表 1 为这两种情况下对应的 DBD 放电参数.

由表 1 可以发现,随着气流速率和驱动电压的

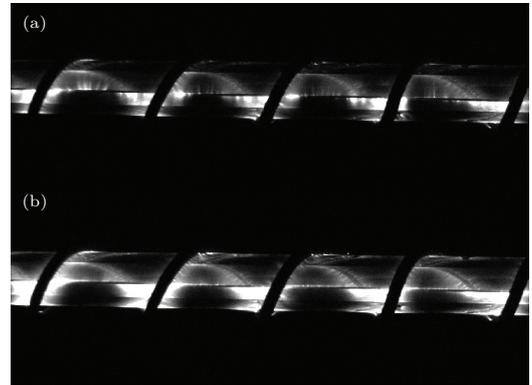


图 12 空气气流速率分别为 $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时的 DBD 放电图像

改变,对应的放电电学参量发生了变化.其中,介质层等效电容由 16.2 pF 增长为 19.6 pF ,介质温度由 435 K 降低为 330 K .根据石英玻璃介电常数随温度的变化规律^[23],由于温度降低引起介质层等效电容减少量约为 0.2 pF ,可见由于温度引起的电容值变化量很小.并由(3)式可推测此时引起等效电容值变化的主要原因为放电正对面积的增大,即放电区域的增大,估计放电区域扩大了约 1.2 倍.结合均方根电流值,可推算放电电流密度扩大了约

1.3倍. 因此, 放电区域的扩大是引起等效电容值变化的主要因素.

从电路模型角度来看, 谐振特性体现为电路内部容抗成分和感抗成分的平衡关系, 在谐振频率处两者达到平衡, 此时电路具有最大的电压传输系数, 发生器的功率利用效率最高. 而电路的谐振特性依赖于器件电学参量, 一旦器件的电学特征发生了变化, 谐振特性就要发生变化, 引起负载电压幅值变化和谐振频率的偏移. 为了使得电源输出的能量更多地耦合到放电发生器中, 降低放电发生器对电源的反射功率, 可在电源与发生器负载之间添加匹配网络, 或选择合适的驱动频率, 使副边电阻值与电源内阻值相等, 同时副边电抗值与电源内部电抗值共轭, 实现电源与负载间的阻抗匹配. 在DBD中, 气流、驱动电压还可能通过影响空间电荷分布、电荷密度、温度分布和电场分布等从而影响放电模式的转变, 这些问题将在后续工作中继续研究.

表1 空气的气流速率为 $0\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 两种情况下DBD放电参数

气流/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	0	1
脉冲频率/kHz	38	38
负载电压/kV	5.2	8.2
均方根电流/mA	12.8	20.0
有效功率/W	14.6	43.8
介质层等效电容/pF	16.2	19.6
介质温度/K	435	330

5 结 论

在同轴DBD发生器中, 随着驱动电压及气流速率的变化, DBD负载的电学参数表现出明显的动态特征. 其幅频特性为, 气流速率的增大导致发生器电路谐振频率右移, 电源输出电压增大导致发生器电路谐振频率左移, 这主要是由介质层等效电容的动态变化造成的. 为稳定其放电时的电学参数与工作性能, 应控制DBD发生器工作在介质层等效电容较稳定的饱和区内. DBD的工作频率与介质层等效电容共同决定副边电阻、电抗与阻抗大小. 准确估量介质层等效电容大小, 研究发生器负载动态变化规律, 对于实现电源与负载的阻抗匹配具有重要的意义.

参考文献

- [1] Kogelschatz U 2003 *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** 1
- [2] Massines F, Rabehi A, Decomps P, Gadri R R, Segur P, Mayoux C 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 2950
- [3] Gherardi N, Massines F 2001 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29** 536
- [4] Masoud N, Martus K, Figus M, Becker K 2005 *Contrib. Plasma Phys.* **45** 32
- [5] Rahel J, Sherman D M 2005 *Phys. D: Appl. Phys.* **38** 547
- [6] Gherardi N, Gouda G, Gat E, Ricard A E, Massines F 2000 *Plasma Sources Sci. Technol.* **9** 340
- [7] Popa S D 1996 *Phys. D: Appl. Phys.* **29** 411
- [8] Liang Z, Luo H Y, Wang X X, Guan Z C, Wang L M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8739 (in Chinese) [梁卓, 罗海云, 王新新, 关志成, 王黎明 2010 物理学报 **59** 8739]
- [9] Li X C, Niu D Y, Xu L F, Jia P Y, Chang Y Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075204
- [10] Dong L F, Mao Z G, Ran J X 2005 *Chin. Phys.* **14** 1618
- [11] Nersisyan G, Graham W G 2004 *Plasma Sources Sci. Technol.* **13** 582
- [12] Li Q, Li J T, Zhu W C, Zhu X M, Pu Y K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 141502
- [13] Akishev Y, Goossens O, Callebaut T, Leys C, Nartovitch A, Trushkin N 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 2875
- [14] Luo H Y, Liang Z, Wang X X, Guan Z C, Wang L M 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 205205
- [15] Dong L F, Yang Y J, Fan W L, Yue H, Wang S, Xiao H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1917 (in Chinese) [董丽芳, 杨玉杰, 范伟丽, 岳晗, 王帅, 肖红 2010 物理学报 **59** 1917]
- [16] Jiang N, Cao Z X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3324 (in Chinese) [江南, 曹则贤 2010 物理学报 **59** 3324]
- [17] Liu X M, Song Y H, Wang Y N 2011 *Chin. Phys. B* **20** 065205
- [18] Chen Z 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1922
- [19] Zhang Y, Shang Z X, Lü Y D, Gu B 2013 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **33** 342 (in Chinese) [张燕, 尚中选, 吕印定, 顾彪 2013 真空科学与技术学报 **33** 342]
- [20] Manley T C 1943 *Trans. Electrochem. Soc.* **84** 83
- [21] Pal U N, Gulati P, Kumar N, Kumar M, Tyagi M S, Meena B L, Sharma A K, Prakash R 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 1475
- [22] Kriegseis J, Möller B, Grundmann S, Tropea C 2011 *J. Electrostat.* **69** 302
- [23] Wang Y C, Wu M Q, Xu F Y, Zhang S R 2005 *J. Sichuan Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **42** 393 (in Chinese) [王仪财, 吴孟强, 许峰云, 张树人 2005 四川大学学报 (自然科学版) **42** 393]

Dielectric layer equivalent capacitance and loading performance of a coaxial dielectric barrier discharge reactor*

Zhao Kai Mu Zong-Xin[†] Zhang Jia-Liang

(Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams of Ministry of Education, School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 27 March 2014; revised manuscript received 6 May 2014)

Abstract

Dielectric barrier discharge (DBD) can produce non-equilibrium plasma at atmospheric pressure, and it has become a hot point in recent years. For the DBD excited by pulsed or alternated currents, the effects of the loading performance of power supply, the matching between supply and discharge reactor and the discharge phenomena on its discharge are interesting issues. The studies of these issues are of great importance for understanding the DBD processes and improving the power supply efficiency. In this paper, the Lissajous figures of a DBD reactor with coaxial electrode configuration are measured. The loading performance of the DBD reactor and the dependences of excitation voltage and air flow rate on the dielectric layer equivalent capacitance are studied in atmospheric air. According to the experimental data and circuit modeling analysis, it is proved that the dielectric layer capacitance decreases with the increase of air flow rate, but increases with the increase of excitation voltage. The amplitude-frequency performance of the reactor reveals significant RLC circuit resonance. The resonance frequency of the reactor has the same behavior as its dielectric layer capacitance. Therefore it shows that the dielectric layer capacitance is the main factor for the resonance frequency evolution. A possible mechanism responsible for the dielectric layer capacitance is also presented.

Keywords: dielectric barrier discharge, loading performance, impedance matching, plasma

PACS: 52.80.Tn, 52.80.Mg, 52.25.Mq

DOI: [10.7498/aps.63.185208](https://doi.org/10.7498/aps.63.185208)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 21173110, 11375041).

[†] Corresponding author. E-mail: mzongxin@dlut.edu.cn