评述

大气压低功率微波等离子体源的研究进展及其应用展望

陈兆权^{1*}, 张煌¹, 涂一焱¹, Kudryavtsev A. A.²

1. 安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山 243032;

2. Faculty of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg 198504, Russia

*联系人, E-mail: qq66168@163.com

收稿日期: 2018-04-28; 接受日期: 2018-06-26; 网络出版日期: 2018-09-18

国家自然科学基金(批准号: 11575003, 11105002, 51607003)资助项目

摘要 相比于低气压微波等离子体, 大气压下微波放电具有密度大、活性高及产生设备简单等优异特征. 但由于大气压下微波放电常呈现为流注形式, 激发此环境下的微波放电需要很高的入射功率. 因此, 大气压微波放电的实现代价较高, 实际应用较困难. 针对大气压低功率微波放电难于实现的科学技术难题, 本文重点陈述了大气压低功率微波等离子体源的研究现状及其应用展望. 首先综述了国际上4类典型大气压低功率微波等离子体源的研究开发现状, 接着介绍了该领域数值计算方面的研究进展, 然后探讨了大气压低功率微波放电的物理机制, 最后给出几个工程应用实例, 并对潜在的应用前景进行了展望.

关键词 微波放电, 表面波等离子体, 数值模拟, 电磁模式, 电离波

PACS: 52.50.Sw, 52.40.Fd, 52.35.Mw, 52.25.Os

1 引言

近年来, 大气压微波等离子体的研究获得了足够重视, 原因在于微波等离子体具有潜在的应用价值. 例如, 有害汽车尾气源于火花塞电弧放电点燃速度慢、温度高, 而新型微波点火技术, 具有燃烧充分、效率高及有害尾气少等优良性能; 再如, 航空航天发动机(超燃冲压发动机)中的点火难题, 其燃料高马赫数喷射, 传统的点火技术很难点燃, 微波放电点燃高速燃流的研究可以解决此困难; 另外, 大气压微波放

电产生的冷等离子体射流, 可以用来杀菌消毒等生物医学应用, 操作安全, 效果很好; 还有, 大气压微波等离子体已在微等离子体激光源、微量元素的光谱检测等方面展示了应用优势; 等等. 相比于低频电源激励放电等离子体而言, 以上这些应用都是源于微波放电等离子体具有密度高、活性强及温度低等优异品性, 可是微波放电等离子体源的系统构建比较复杂.

再者, 由于大气压及超大气压下激发微波放电需要很高的入射功率(kW级), 为了节能而需要使用高功率脉冲调制微波源, 控制困难及代价较高, 实用化较

引用格式: 陈兆权, 张煌, 涂一焱, 等. 大气压低功率微波等离子体源的研究进展及其应用展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 125201
Chen Z Q, Zhang H, Tu Y L, et al. Research progress on atmospheric pressure lower-power microwave plasma sources and their application prospects (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 125201, doi: [10.1360/SSPMA2018-00150](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00150)

难. 能否通过创新, 实现低功率微波激励大气压气体放电并调制出适合特定用途的放电形貌, 是个亟需克服的科技难题. 对于高气压(等于或大于1个大气压)微波放电研究, 美国和俄罗斯科学家^[1,2]通过高功率(1000 kW级)微波束聚焦照射, 在大气压下实现了流注型微波气体放电, 发现在大气压甚至10个大气压下都可以实现微波流注表面波等离子体(SWP)放电; 清华大学张贵新等人^[3-7]报道了一种采用对称开槽天线的微波放电装置, 实现了10 kW级大气压微波放电; 文献^[8,9]分别报道了两种大气压微波放电源的设计与实现, 只是放电功率一般需要1 kW左右; 德国和日本研究人员^[10,11]分别报告了大气压氩气微波射流的实验工作(kW级), 并报道了该射流的周期性丝状放电特性; 最近清华大学王强等人^[12]研究了3 kW毫秒脉冲微波共振放电及点燃燃料的工作. 简述以上这些大气压微波等离子体源的发展动态, 虽然均需要较高的微波功率激励才能实现放电, 但是其激发功率值呈下降趋势. 就低功率(小于100 W)微波等离子体而言, 国际上目前主要存在4种典型装置: 同轴线谐振器^[13]、微带线共振器^[14]、发卡型激励器^[15]和表面波共鸣器^[16-19]. 这类装置均可以工作于大气压环境下, 性能各异且能满足不同应用需求, 如同轴共振器适合生物医学应用、微带共振器适用于微等离子体离子源, 而冲浪谐振器和SWP射流可满足点火助燃应用需求. 近期, 我们报道了3种大气压低功率微波等离子体射流, 即连续微波激励的表面波型射流装置和脉冲调制微波共振的同轴型射流装置及发卡型单极射流装置, 只是微波等离子体射流的放电机理至今尚未彻底明晰.

与实验研究相比, 数值模拟辅助设计微波等离子体源的方法开始随着计算机处理能力的增强而得到发展. 大气压微波等离子体的数值模拟大多采用流体模型, 这些流体模型大多以实验数据为输入参数, 模拟得出物理参数, 并与实验结果进行比较, 可为装置优化改造提供设施方案, 同时也能显露一些新的物理现象^[20-23]. 综述文献^[20-28]发现, 大气压微波放电的流体模拟, 主要以110 GHz高频微波等离子体为研究对象^[20-23], 对于2.45 GHz微波放电的流体模拟, 主要模拟了低气压SWP源^[24-28]. 关于微波放电的粒子模拟(PIC/MCC), 之前研究主要是对ECR低气压等离子体的模拟^[29,30]. 近期, 陈兆权等人^[31,32]使用PIC/MCC法分别对大气压和低气压微波SWP的电离发展过程进行

了粒子模拟. 这些模拟研究结果表明, 微波放电产生的等离子体与维持放电的微波具有很强的时空相互作用, 也即数值模拟能够揭示微波等离子体的放电机理.

综上所述, 微波放电的研究, 最早起始于低气压气体放电, 许多实验装置和放电机制研究让人们逐渐掌握其特性, 并在半导体器件加工工艺中得到充分应用. 而大气压微波放电的研究历史较短(在最近二十年左右), 尽管其优点显著, 但是由于大气压微波放电的复杂性和研究样本的鲜有, 大气压微波放电的电离机制尚未明晰. 同时, 应用研究也在摸索中推进, 特别是大气压低功率微波放电等离子体源的应用研究, 亟需加强. 鉴于此, 本文重点探讨大气压低功率微波放电等离子体源的研究, 具体内容安排如下: 第2节, 首先介绍国际上4类大气压低功率微波等离子体源的研究开发现状; 第3节, 综述该领域数值计算方面的研究进展; 第4节, 对大气压低功率微波放电的物理机制进行探讨; 第5节, 最后给出几个工程应用实例, 并对潜在的应用前景进行了展望.

2 典型装置概述

2.1 表面波共鸣器

表面波放电装置应该说是大气压微波放电研究的最充分部分, 也是最初实现的微波放电装置, 如文献^[33]综述了Moisan等人在1974年发明的放电装置. 首先是在低气压放电管中得以实现, 后来由于高功率雷达设备时常发生微波放电短路故障, 迫使研究者探讨大气压微波放电的触发因素, 开展针对性设计而避免或减少故障率^[14]. 直到近二十年来, 大气压等离子体射流研究才成为热点, 研究者发现微波等离子体射流装置相比于低频射流装置具有潜在应用优势. 典型的装置是将石英玻璃管穿过波导管, 当波导管有微波功率时, 微波电场激励气体氛围电离产生等离子体射流. 当然, 为了迎合不同的应用目的, 在激发装置的结构上做了许多改变. 例如, 为了大体积放电, 采用较粗直径的玻璃桶作为放电管; 为了大面积均匀放电, 设置波模转换器把微波功率分配到放电激发区域; 为了高效激励放电, 低功率表面波射流装置得以设计; 等等. 不管其形状如何变化, 这些放电设备均是基于表面波激励放电产生等离子体射流的^[16,17,31-41].

表面波是一种沿着介质表面传播的电磁波, 存在

于两种具有不同介电常数的介质分界面. 这种电磁波的纵向电场在分界面附近存在局域增强效应, 正是利用增强电场激励气体放电产生了等离子体. 利用表面波放电产生的大气压微波等离子体射流装置主要有3种构型, 如图1所示. 图1(a)将石英玻璃管横穿矩形波导管, 一般几百瓦的微波功率可以激发石英管内的惰性气体放电; 图1(b)在石英管内放置一段金属体, 可以明显提高放电的能效, 降低输入微波功率; 这是因为置于微波中导体(金属或导电非金属)会表现得像天线一样, 导体表面激发高频电流; 感生电流在导体表面与入射微波发生共振耦合, 在导体尖端处产生局域增强电场, 致使尖端周围介质(气体或液体)高效电离并放电; 图1(c)采用同轴圆柱谐振腔, 气体从中心轴线穿过, 同轴开口处存在强耦合区, 等离子体射流从开口处射出. 对比3种构型装置的优缺点, 图1(b)所示的装置比图1(a)所示的装置效率高, 但是图1(b)所示的装置内部有金属体而存在电极烧蚀和等离子体杂质污染问题; 图1(a)所示的装置比图1(c)所示的装置的等离子体尺度大, 而图1(c)所示的装置紧凑一些, 易于小型化. 产生的等离子体具有非平衡特性, 电子平均温度在数个 eV, 而气体温度仅有2000 K左右. 等离子体密度与激发气体放电的电磁模式有关, 如果是行波, 电子密度约在 10^{20} m^{-3} 附近; 如果是共振驻波, 电子密度高于 10^{21} m^{-3} . 微波入射功率的大小, 对等离子体密度改变不明显, 可以显著改变等离子体射流的体积和气体温度分布.

2.2 微带线共振器

微带线是一种高频电磁波传输线, 根据传输线理论, 合理地设置开路 and 短路节点位置, 可以使得传输线的开口端呈现电压极大值点. 微带线共振器正是利用此效应, 实现局域电场增强并激励气体放电的. 微带线共振器的输入功率一般仅有几瓦的微波功率, 电极开口处的最大电压处于几十伏至几百伏之间^[42-60]. 能够实现气体放电, 必须使得开口间隙距离小于1 mm, 才能使得局域电场极值达到电离阈值. 因此, 微带线共振器属于微等离子体发生器. 当然, 可以采用微带线共振器阵列实现大尺度的等离子体.

根据微带线共振器的结构不同(微波频率、能量馈入点、短路点、开口位置和微带线的长度), 典型的装置主要有3种构型, 如图2所示. 其中, 最简单的一种

图1 (网络版彩图)大气压表面波共鸣器等离子体射流装置
Figure 1 (Color online) Atmospheric pressure plasma jet devices based on surface wave resonator.

图2 (网络版彩图)大气压微带线共振器微等离子体装置
Figure 2 (Color online) Atmospheric pressure microplasma devices based on microstrip line resonator.

如图2(a)所示, 在介质板两侧表面镶嵌1/4微波波长奇数倍金属微带, 微波功率从一端直接馈入, 另一端开口间隙处实现放电. 比如输入1 W功率, 微带线上传输10 V电压波, 如果考虑波传输到末端开口处存在反射效应, 开口处的电压具有20 V的电压峰值. 此时放电产生微等离子体, 这将改变微带线的输入阻抗, 阻抗的不匹配致使馈入功率减小, 进而使得放电熄灭. 因此, 这种放电具有自激脉冲特性, 等离子体密度约为 10^{21} m^{-3} , 气体温度同表面波共鸣器一样约2000 K. 另一种更高效的放电器如图2(b)所示, 其具有“T”字构型. 微波能量由同轴接口馈入, 一端短路, 一端开口. 为了使得开口端具有极大电压, 一般按短路端至开口间距为1/4微波波长奇数倍设置. 持续馈入1 W功率, 微波会在短路端和开口端之间多次折反射, 使得开口端的电压峰值达到100 V, 致使放电激励相对高效些. 当然, 放电产生等离子体负载后, 同样由于阻抗匹配问题, 迫使馈入功率减小, 避免了放电向微波电弧的转

变. 此种微等离子体的密度在 10^{20} m^{-3} 左右, 温度由输入功率决定(500–1200 K). 第三种共振器如图2(c)所示, 是一种环形结构. 需要注意的是, 环的半径、微波输入位置及开口位置需要根据微波共振耦合理论做特殊设置才能实现最好效果. 其工作原理与第二种放电器一样, 只是开口两端, 一端具有负电压极值, 而另一端具有正电压极值. 因此, 放电产生的等离子体参数与第二种共振器一致, 同等输入功率时, 效率是第二种共振器的2倍.

2.3 同轴线谐振器

同轴传输线谐振器的工作原理与微带线共振器一致, 一般采用同轴线长度为 $1/4$ 微波波长奇数倍, 一端短路, 另一端开路. 微波馈入位置点在同轴线中间(偏向短路端), 如此设置, 较好地满足微波阻抗匹配, 实现最大耦合效率. 典型的实验装置如韩国的Lee课题组^[13,61–68]开发的微波射流装置. 在2009年, 文献^[61]报道了一种同轴线射流装置, 它由 $1/4$ (900 MHz微波频率)或 $3/4$ (2.45 GHz微波频率)波长同轴线为主体. 为了实现小功率放电, 在开路端两电极间的间隙保持 $100 \mu\text{m}$ 左右和使用氩气作为工作载气. 在大气压下, 数瓦的输入功率, 产生的等离子体密度大于 10^{20} m^{-3} 、电子温度小于 0.5 eV 和射流温度 400 K 以下. 直到2015年, 文献^[65]报道了一种便携式的空气微波放电等离子体射流装置, 如图3所示(载气流量 3.0 slm 以下是层流射流, 而载气流量 3.0 slm 以上属于湍流射流). 这是一种很有竞争性的实用装置, 可以在等离子体射流杀菌消毒领域发挥作用.

相比于射频电压激励的等离子体射流, 微波等离子体射流的温度较高, 这限制了其对温度敏感领域的应用. 为了克服这个缺点, 陈兆权等人^[69–72]采用脉冲调制微波激励气体放电以降低射流温度. 另外, 将同轴线之间以石英玻璃管隔离, 避免了内外电极间的电弧击穿缺点. 2.45 GHz 微波输入, 5 W 的峰值功率, 10 kHz 的脉冲调制频率和 0.1 的占空比, 产生的等离子体射流的温度约 300 K . 人体可以直接接触等离子体羽翼, 没有热和电击的感觉, 放电实验如图4所示. 射流的形貌呈现流注树枝状, 当金属体靠近射流时, 射流强度明显加强^[70], 这些特性都是同类装置所不具有的. 此外, 实验发现射流的放电模式与气体流速、输入功率峰值、脉冲调制频率及占空比, 甚至与电极间介入材

图3 (网络版彩图)便携式同轴线谐振器大气压等离子体射流装置. (a) 装置照片; (b) 射流长度随空气流速的变化^[65]

Figure 3 (Color online) Portable atmospheric pressure plasma jet device based on coaxial resonator. (a) Device photo; (b) jet length varying with air flow rate ^[65].

图4 (网络版彩图)脉冲微波同轴线谐振器的放电照片, 放电参数: 5 W , 2.45 GHz 微波, 10 kHz 调制脉冲频率, 0.1 占空比和氩气流速 1.8 slm ^[70]

Figure 4 (Color online) Discharge photos of pulsed microwave coaxial line resonator, discharge parameters: 5 W , 2.45 GHz microwave, 10 kHz modulated pulse frequency, 0.1 duty cycle ratio and argon flow rate of 1.8 slm ^[70].

料的亲水性和被接触的材料等有关. 控制输入参数, 可以优化得到所需要的等离子体射流参数.

2.4 发卡型激励器

发卡型共振器也是利用共振原理工作的微波器件, 起先发明这种共振器是用来测量低气压等离子体参数的. 在20世纪70年代中期, Stenzel等人^[73–75]最先

构建, 由于其形状像字母‘U’的发卡, 命名为发卡探针. 它在“U”底连接激励信号, 平行两臂长度为1/4微波波长, “U”字开口处具有电压极大值. 局域增强的电场与周围的等离子体相互作用, 分析反射信号能反映出等离子体的参数及其变化. 大气压等离子体的鞘层往往复杂, 使得这种探针大多用来测量低气压的等离子体参数. 直到2009年, 徐金洲等人^[76]发明了能够检测大气压等离子体参数的发卡探针, 发卡探针的适用范围得以大大拓展.

根据发卡探针的微波共振原理, 可以用来产生大气压等离子体射流. 2011年Lee课题组^[77]采用平行板“U”形微波共振器激励产生了20 mm的狭缝线型等离子体, 证明了发卡型激励器可以激励产生大气压等离子体. 2015年陈兆权等人^[15]发明了大气压低功率发卡型微波等离子体射流装置, 如图5所示. 2.45 GHz微波由同轴线直接馈电给发卡的一臂, 发卡的两臂总长度为3/4微波波长, 在发卡开口端获得局域增强电场. 通入氩气作为工作气体, 2 W的入射功率和10 kHz的脉冲调制频率及10%的占空比, 可以获得2 mm直径的圆环等离子体羽翼. 使用高速相机拍照, 可获得脉冲放电的动态演化过程, 如图6所示(绿色线和紫色线分别指示2和4 kHz调制频率时放电形貌的演化过程). 动态过程揭示, 等离子体放电同步发生于发卡的两臂尖端, 然后逐渐向前增长, 最后相互吸引合二为一. 因此我们猜想, 等离子体射流是由分离的等离子体子弹组成的. 采用连续波驱动发卡型激励器, 产生的等离子体密度峰值达到 10^{21} m^{-3} 和等离子体羽翼温度500 K左右. 而采用数千赫兹脉冲频率调制激励, 等离子体射流羽翼温度最低可降至室温, 得到了不同参数的等离子体羽翼.

3 数值计算进展

3.1 电磁解析

基于电磁理论分析微波放电装置的主要目的有两个: (1) 分析装置工作机制和控制参量, 以便优化装置性能; (2) 深入解析微波放电的电离发展过程, 理解放电参数的微观机制. 此外, 还可以为实验操作指明方向, 可检验模拟仿真的真伪性. 电磁解析大气压微波放电的数学物理模型有两种, 分别是电磁模型和电路模型. 电磁模型的数学物理方程组由麦克斯韦方程和等离子体物态方程组成, 而电路模型的数学物理方程

图5 (网络版彩图)大气压发卡激励器等离子体射流装置^[15]

Figure 5 (Color online) Atmospheric pressure plasma jet device based on hairpin exciter ^[15].

图6 (网络版彩图)脉冲微波发卡激励器的放电照片, 放电参数: 3 W, 2.45 GHz微波, 调制脉冲占空比0.1和氩气流速0.3 slm, 曝光时间: (a) 100 ms; (b)–(l) 0.125 ms^[15]

Figure 6 (Color online) Discharge images of pulse microwave hairpin exciter, discharge parameters: 3 W, 2.45 GHz microwave, modulated duty pulse duty ratio of 0.1 and argon flow rate of 0.3 slm, exposure time (a) 100 ms and (b)–(l) 0.125 ms ^[15].

组主要由传输线等效电路方程和等离子体与电磁波之间的能量耦合方程构成^[78–82].

电磁模型直接考虑电磁场与等离子体射流之间的相互作用, 但是实际的放电装置往往形状复杂, 致使复杂边界条件下难于解析求解. 实际使用时, 一般只关注所要明晰的物理参量, 其他细节均作简化处理. 使用电磁模型, 时常将等离子体部分看作非各向同性的介质, 此介质的相对介电常数隐含了等离子体密度和粒子碰撞频率的时空分布, 也即电磁模型分析了带电粒子在电磁场中的运动状态或者电磁场与带电粒子之间的相

互作用. 使用电磁模型解析表面波共鸣器, 分析结果揭示了局域增强的表面波与电子等离子体波之间存在高效耦合, 这是其放电能量耦合机制的关键所在, 如图7所示^[41].

电路模型常用于分析微带谐振器和同轴谐振器两类装置的放电机制, 分析思路是先分析放电前的电路, 然后再考虑等离子体负载对时空能量平衡的影响^[70]. 使用电路模型时, 探究的是电压波在传输线上的时空分布和等效阻抗之间的匹配耦合问题. 如图8所示, 使用电路模型分析同轴谐振器^[70]和微带线谐振器^[14], 结果表明, 开路端存在局域电压极大值, 致使了局域增强电场产生, 这是共振激励放电的根本原因. 综合两种模型的共同分析结果, 可见大气压低功率微波放电产生于局域增强电场共振激励气体放电.

3.2 流体仿真

将包含等离子体的空间网格化, 视等离子体的带电粒子为流体, 数值模拟电子流、离子流和电磁场的时空分布的方法, 我们称之为等离子体的流体仿真(或流体模拟). 流体模拟的模型由麦克斯韦方程组、带电粒子流连续方程、流体动量平衡方程和流体能量平衡方程组成. 麦克斯韦方程组只需考虑两个旋度方程, 带入电流项, 结合边界条件和初始条件, 就可以迭代求解^[83-92]. 麦克斯韦方程和动量平衡方程可用时域有限差分法(FDTD)求解, 而带电粒子流连续方程和流体能量平衡方程可用高斯-赛德尔(G-S)迭代法求解. 同时联立求解上述流体方程的数值模型, 我们称之为自洽流体仿真模型, 此时求解需要较多的计算资源. 特别是三维的模型, 待求解的计算任务巨大, 单台计算机难于胜任, 实际应用时常常要做简化处理. 空间上, 一般利用对称性将模型简化, 常用两维空间算例以减少计算任务. 时间上, 采用不同时间步长分别处理FDTD和G-S两个子模块. 微波电磁场的FDTD推进时间步长一般设定 10^{-12} s, 可以获得较好的计算收敛性. 流体平衡方程的G-S推进步长要远远大于FDTD的时间步长, 设定 10^{-9} s即可.

法国Chaudhury等人^[87-89]使用流体计算模型对110 GHz大气压空气放电进行了仿真, 模拟结果与实验测定一致, 并揭示了微波流注丝状放电的物理机制. 美国塔夫茨大学的Hoskinson等人^[90,91]使用一维流体模拟程序对微带线谐振器进行了流体仿真, 模拟结果

图7 (网络版彩图) (a) 表面波共鸣器的电场空间分布; (b) 放电管内的计算电场分布^[41]

Figure 7 (Color online) (a) The spatial distribution of the electric fields of surface wave resonator and (b) the calculated electric field distribution in the discharge tube ^[41].

图8 (网络版彩图) (a) 同轴谐振器的等效电路简化过程; (b) 微带谐振器的电压分布

Figure 8 (Color online) (a) The equivalent circuit simplification of coaxial resonators and (b) the voltage distribution of microstrip resonators.

表明, 随着微波频率变大等离子体密度增大而电子温度降低(电极表面局域电场降低). 德国Baeva等人^[92]使用二维轴对称流体模型对同轴亚大气压微波等离子体做了数值仿真, 仿真结果与实验参数吻合较好. 2014年陈兆权等人^[69]设计二维轴对称流体模型, 对大气压脉冲调制同轴线谐振器等离子体射流进行了流体模拟; 采用FDTD和G-S分别各自计算, 然后往复100个循环(准自洽流体模拟流程如图9所示); 计算结果再现了同轴线谐振器的电离发展过程. 2015年陈兆权等人^[15]构建了三维流体模型, 对发卡型激励器等离子体射流做

图 9 准自洽流体模拟流程图^[69]

Figure 9 Flow chart of quasi self consistent fluid simulation [69].

了准自洽流体模拟, 模拟结果揭示了弧形等离子体羽翼的电离形成过程, 如图10所示。

3.3 粒子模拟

大气压微波放电的粒子模拟很不成熟, 主要原因在于: (1) 大气压下, 放电等离子体氛围粒子密度高, 各粒子间相对运动差异大, 导致模拟计算任务繁重; (2) 微波放电装置结构相对复杂, 放电参数可控因素多变, 模拟难度十分巨大。但是, 随着实用模型的简化处理和计算机运算性能的提高, 粒子模拟大气压微波等离子体的电离发展过程已成为可能。粒子模拟气体放电包括两个主要子模块: 粒子推动(Particle-in-Cell, PIC)和蒙特卡罗碰撞(Monte Carlo Collide, MCC)。结合PIC/MCC模拟特点, 根据实际电离过程, 粒子模拟模型的理论分析部分主要包括Maxwell方程组的求解、源项的求解、粒子的集体运动、粒子间的相互作用、带电粒子与边界的作用处理以及归一化等6个部分^[14,30-32,93-97]。模拟流程如图11所示, 首先初始化电磁场、初始电流密度和初始带电粒子位置及运动方向, 再由云方程计算出空间网格的电流密度。接着求解Maxwell方程组进而计算出网格上的自洽电磁场, 结合PIC方法处理等离子体集体运动和MCC方法处理粒子碰撞, 得出带电粒子新的坐标和新的速度; 之后判断粒子是否到达边界, 若处于边界, 按粒子与边界相互作用处理; 最后, 判断计算是否收敛, 或做下一个循环, 或做数值诊断。这样形成不断循环的过程, 直到带电粒子分布与表面波场分布达到收敛, 则认为模拟满足收敛条件, 计算任务完成^[93,94]。

鉴于粒子模拟的计算特点, 研究人员大多采用一维粒子模拟程序计算大气压微波放电的电离特性。模

图 10 (网络版彩图)模拟的(a)电子密度和(b)电子温度的时空分布^[15]

Figure 10 (Color online) Spatio-temporal distributions of the simulated (a) electron density and (b) electron temperature [15].

图 11 PIC/MCC模拟流程图^[32]

Figure 11 Flow chart of PIC/MCC simulation [32].

拟对象的空间尺度在1 mm以下, 以便节省计算资源。一维粒子模拟(1D3V)大气压低功率微波放电的研究, 主要有3个课题组: 韩国浦项工业大学的Kwon等人^[98]、美国塔夫茨大学的Hopwood等人^[14]及田纳西大学的Levko和Raja^[96,97]。粒子模拟的模型尺寸均针对1 mm以下的微等离子体进行。Lee和Hopwood两个课

题组均借用美国伯克利大学PTSG公开的粒子模拟程序XDPD1. Kwon等人^[98]利用粒子模拟了脉冲调制微波微等离子体, 发现了脉冲调制微波激励放电存在反常模电子加热机制. Hopwood等人^[14]对10 GHz微波激励100 μm 间隙的微等离子体做了PIC/MCC模拟, 结果揭示大气压微波放电的加热机制是电子碰撞电离引起. Levko和Raja^[96,97]主要粒子模拟了不同微波频率和不同微间隙下等离子体参数的变化趋势, 模拟结果与实验结论一致, 并解释了电离机制. 陈兆权等人^[31]采用2D3V粒子模拟模型, 对大气压表面波共鸣器等离子体射流进行了PIC/MCC研究, 计算的射流参数与实验放电形貌基本一致, 并揭示了局域增强表面波电场是微波流注放电等离子体射流得以形成的根本因素, 电子和离子的电离发展过程如图12所示. 以上这些研究表明, 粒子模拟大气压低功率微波等离子体射流, 不仅能揭示其放电机制, 还可以对优化装置提供理论指导.

4 放电机制探究

4.1 电磁模式分析

大气压低功率微波共振放电的电磁模式直接决定等离子体射流的电离过程, 不同电磁模式激励产生的等离子体射流参数差别较大. 电磁模式的探讨的主要问题是: (1) 微波共振放电的电磁波激发模式是驻波还是行波(或者是行驻波)? (2) 电磁模式的转变过程, 即入射微波的能量如何转变为能被等离子体吸收的静电电能? 前一个问题是宏观的, 行波激发的等离子体密度较高, 而驻波激发的等离子体密度相对低一个数量级. 后一个问题是微观的, 主要从因果关系的衔接上讨论微波能量的耦合过程. 系统的微波共振放电的物理过程及其电离机制分析, 详见文献^[41,70].

根据4类典型装置的等离子体参数, 目前对电磁波激发模式已经比较清晰了. 对于表面波共鸣器, 等离子体密度在 10^{21} m^{-3} 、等离子体羽翼温度大于1000 K(取决于入射微波功率和气体种类), 其电磁波激发模式属于形驻波, 如图7所示; 对于微带线共振器, 直接馈入微波的微等离子体发生器工作于行波激励, “T”形馈入的微等离子体由驻波激励, 如图8(b)所示; 对于同轴线谐振器, 如果地电极完全包覆功率电极则电磁波模式为行驻波, 如果不是则为驻波激励, 如图13所示^[70]; 对于发卡型激励器, 电磁波模式与同轴线谐振器的情况一

图12 (网络版彩图)PIC/MCC模拟大气压表面波共鸣器等离子体射流的电离发展过程^[31]

Figure 12 (Color online) PIC/MCC simulation on ionizing development of atmospheric pressure surface wave resonator plasma jet ^[31].

图13 (网络版彩图)同轴线谐振器在放电前后的电场分布^[70]

Figure 13 (Color online) Electric field distribution of coaxial resonator before and after discharge ^[70].

致, 只是发卡两臂之间存在电磁模式耦合, 致使其电磁波模式一定是行驻波激发. 理解清楚第一个问题后, 后一个问题也就能探究明了. 不管是哪一种电磁波模式激发, 大气压低功率微波等离子体射流均由局域增强电场激励气体放电产生. 入射微波经放电电极引导, 形成一种电磁波模式, 这种电磁波模式对于电极和等离子体的分界面来说, 一定是横磁(TM)波. 由于电极表面附近存在等离子体密度梯度层, 导致电场在空间上局域增强, 解析计算结果如图14所示^[41]. 局域增强电场方向与电子等离子体静电波的电场方向一致, 直接通过电场加速电子得以碰撞电离发展, 把微波的能量高效率地耦合给了等离子体射流羽翼.

就大气压微波放电的电子吸收微波能量的方式而

图 14 (网络版彩图)等离子体密度梯度层上的局域增强电场及其波模转换^[41]

Figure 14 (Color online) Local enhanced electric field and wave mode transformation on the plasma density gradient layer [41].

言,目前主流观点是高频鞘层的共振加热机制.高频振荡鞘层随所加的微波电压信号而快速交变,电子密度在鞘层内梯度分布.高频放电的等离子体区域的等离子体密度一般在 10^{18} m^{-3} 以上,对应的电子静电波的频率大于入射微波频率,鞘层内必然存在波模转换共振点.如图14所示,共振点区域狭窄但法向电场局域增强显著.波模转换的结果是局域增强电场减弱,高能电子向低密度区域迁移并碰撞电离,致使共振点向低密度区域拓展,展宽的共振点区域,有利于提高电子能量吸收效率.因此,电子吸收微波能量主要发生在鞘层内,通过共振加热机制实现.但是,这只是连续稳态的情况,如果采用脉冲调制微波放电,脉冲前沿时刻,鞘层还没有稳态成型,此时瞬态变化的预鞘层之内的电子能量吸收机制将会更复杂.实验和模拟研究均发现脉冲调制微波激励气体放电的微波能量吸收在脉冲上升沿存在增强吸收现象.一维粒子模拟结果很好地展示了此现象,如图15所示^[98].进一步,在一个周期内抽样电子能量分布函数(EEDF),也能呈现出脉冲调制微波放电存在二次高能电子,重演了反常模电子加热机制的作用过程,如图16所示^[98].

4.2 电离机制探讨

局域增强电场的方向周期性变化,电子随着电场做周期性的往复运动.积累起能够引起气体电离的能量的电子与气体原子发生碰撞,即可发生碰撞电离.

图 15 (网络版彩图)归一化时间分辨((a), (b))和电子消耗功率密度((c), (d))的时空分布. 连续的((a), (c))和脉冲((b), (d))调制的1.45 GHz微波. 大气压He微等离子体的展示时间为激励开始后的前两个周期^[98]

Figure 15 (Color online) (a), (b) Time-resolved normalized and (c), (d) time evolution of spatial profiles of the electron-dissipated power density with (a), (c) continuous and (b), (d) pulse modulated 1.45 GHz microwave for He atmospheric microplasmas during each first two periods of the ignition phase [98].

图 16 (网络版彩图)EEPFs的时间演化((a), (b))和归一化时间分辨的EEDFs((c), (d)). 连续的((a), (c))和脉冲调((b), (d))制的1.45 GHz微波. 大气压He微等离子体的展示时间为激励开始后的前两个周期^[98]

Figure 16 (Color online) (a), (b) Time evolution of EEPFs and (c), (d) time-resolved normalized EEDFs with (a), (c) continuous and (b), (d) pulse modulated 1.45 GHz microwave for He atmospheric microplasmas during each first two periods of the ignition phase [98].

再者,有些激发态原子的寿命较长,其电离能较小,与电子碰撞发生电离的概率增加,也即分级电离也是微波放电的一种重要方式.或许还存在光电离(流注放电)、电极表面的热电子发射、二次电子产生、场致发射等多种电子激发方式,这些效应还需要深入研究

确定. 特别是潘宁效应对等离子体射流形貌的影响研究, 目前国际上争议很大, 几乎形成两派, 彼此说服不了对方, 亟需深入研究^[71]. 关于大气压低功率微波放电的电离机制探讨, 主要研究论点有: (1) 微波等离子体的维持是由碰撞电离(欧姆加热)还是随机加热(朗道阻尼)是其主要作用机制? 或者是由两种加热效应的协同作用引起? (2) 脉冲调制低频(小于100 MHz)电压激励气体放电主要以空间电离波的形式发展, 等离子体射流表现为等离子体子弹形式分离呈现. 如图17所示, 大气压微波放电射流一般是连续的. 即使采用脉冲调制微波激励放电, 等离子体随着脉冲信号呈现时间上的间歇, 但是射流发展在空间上是从激发电极开始发展的, 即空间上是连续的. 这种等离子体射流的电离过程, 到底是局域电离波, 还是不属于电离波? 是一个需要明确的问题.

气压低于1 mTorr的微波放电, 朗道阻尼效应是维持等离子体的主要加热机制; 随着气体压强增高, 电子碰撞电离开始占据主要因素. 对于大气压微波放电, 数值模拟结果表明欧姆加热是等离子体加热的主要方面. 但是, 考虑到局域增强电场激励气体放电, 电子在密度梯度层的共振增强电场作用下做往复运动, 朗道阻尼效应应该也发挥作用. 我们猜想对于大气压低功率微波放电等离子体射流而言, 碰撞电离和随机加热应该共同起作用; 但是具体起作用的物理过程及作用效能, 还需要做深入探究. 另一个问题, 低气压脉冲调制微波放电, 实验上已经探明存在时空分离的等离子体弹, 也即其电离过程是电离波方式. 大气压脉冲调制微波放电, 实验现象表明等离子体射流的电离过程, 在时间上是分离的, 但在空间上是局域连续的. 我们把这种电离过程命名为局域电离波方式^[69-72], 但是这种分类是否合适及电离波头的局域增强电场的时空演化等均需要作深入探究. 很有意思的是, 电离波头的局域增强电场由两部分组成(局域增强电磁波和电离波头的静电场), 而且此两部分的局域增强电场之间及与等离子体射流之间均存在互耦效应(如图18所示^[72]), 该部分研究亟需在实验或模拟上深入明晰.

5 应用研究展望

5.1 点火助燃应用

众所周知, 电火花点火一直是汽油机的技术核心,

图 17 (网络版彩图)曝光时间50 ns拍摄的放电照片. 放电输入参数: 微波频率2.45 GHz, 峰值功率10 W, 氩气流量1.0 L/min, 脉冲占空比0.1, 脉冲频率10 kHz^[72]

Figure 17 (Color online) Discharge images obtained using the ICCD camera with exposure times of 50 ns. Microwave frequency of 2.45 GHz, a pulse frequency of 10 kHz, duty cycle of 0.1, peak input power of 10 W, and an argon gas flow of 1.0 L/min are used^[72].

图 18 (网络版彩图)模拟电场分布. 等离子体长度分别为(a) 6 mm和(b) 10 mm^[72]

Figure 18 (Color online) Simulated electric field distributions with a plasma domain of length (a) 6 mm and (b) 10 mm, respectively^[72].

它利用火花塞产生电火花, 点燃压缩后的可燃混合气. 然而, 传统火花塞点火的电弧放电通道是局限于电极间的一根细丝, 不可能快速均匀地点燃燃气混合物, 靠较慢的火焰前锋缓慢推进预燃, 会产生热损失和有害废气, 这种工作过程效率低下, 只有25%–35%的能量用于实际行驶. 另一方面, 顾及微波放电具有体模放电和产生低温高密度等离子体的优点, 微波点火技术已被成功开发. 目前国际上已开发了4类微波点火技术用于汽油机点火助燃, 分属于中国、德国、日本和美国^[99-103]. 第一种, 利用谐振腔内的共振增强微波

场, 清华大学张贵新教授团队^[99,100]报道了微波放电均匀点燃缸内油气混合物的实验研究及仿真工作. 原理在于只要达到油气混合物的放电阈值, 整个气缸内的燃料便会同时点燃; 仿真结果和实验情况吻合, 只是在模拟实验时, 成功点火所需功率在5 kW左右, 改用脉冲调制微波源, 控制技术要求和造价较高. 第二种, 德国MWI公司通过向燃烧室内辐射微波, 燃料吸收微波能量, 实现均匀准同时的大体积点火燃烧; 据其专利报告, 实现油耗下降30%、CO₂降低30%和CO+SOX+NOX+CH排放量降到20%; 唯一的不足也是使用了脉冲调制微波源, 控制代价高. 第三种, 日本ElSabagh等人^[101]在火花塞上加一个天线向缸内辐射微波, 火花塞预电离, 微波放电点火燃烧, 提高了效率, 降低CO尾气到50%, 只是也要用脉冲信号来控制微波输出. 第四种, 是基于设计微波共振器来取代火花塞放电的微波点火技术, 改善了直射汽油机的点火性能(需用脉冲调制微波源)^[102], 成功实现了低功率放电点燃甲烷-氧气混合气, 开发了新型空间等离子体推进点火技术^[103]. 综述这4种典型的微波点火技术, 可见微波点火能取得节能环保, 但需要使用价格昂贵的脉冲调制微波源, 这就使得控制技术复杂, 设备投入较大, 实用难度增加. 能否通过创新, 找到一种不需要脉冲调制微波源的微波点火技术呢? 或者使用低功率(几十瓦)脉冲调制微波源(脉冲调制低功率源较易实现)驱动的微波点火技术呢? 鉴于此, 我们发明了一种电火花连锁微波体模点火助燃装置, 如图19所示. 组建思路是采用脉冲调制高频高压激励气体放电, 高频电火花连锁触发200 W左右的微波体模放电, 实现缸内同步体模点火; 火焰燃烧阶段, 微波放电有助于增强燃烧, 减少尾气污染物排放. 此装置, 克服采用大功率脉冲微波源难以实际应用的缺点. 初步实验, 相比于传统火花塞点火, 能效提高约8%, 污染物降低约17%, 目前还在进一步优化中.

除了微波放电在汽油机增燃减废方面的应用外, 国际上微波点火助燃的研究还有高速燃料的微波点火技术、燃料的微波助燃提效技术等. 超燃冲压发动机利用进气道激波压缩来流空气获得氧化剂, 在燃烧室内的超声速气流中组织燃烧, 因此其比冲远高于常规火箭发动机, 是实现马赫数6.0以上高超声速飞行的理想动力^[104]. 在放电等离子体增强燃烧方面, 快脉冲放电和介质阻挡放电增强燃烧是国内外的主要研究点,

图 19 脉冲高频电火花连锁微波放电体模点火助燃装置结构图

Figure 19 Structural diagram of spatial-mode ignition and combustion device for microwave discharge triggered by pulsed high-frequency spark discharge.

微波放电增强燃烧的研究主要集中于低速流动状态, 对于超声速流场中利用微波放电增强燃烧鲜见报道^[105]. 国外, 俄罗斯Esakov等人^[106,107]开展了超高音速的点火实验, 以丙烷为燃料气体, 在深度亚临界下实现了微波放电点燃丙烷的研究. 国内, 大连理工大学联合国内多家单位, 率先开展了微波放电点火助燃的应用研究正逐步开展开来^[40]. 近年来, 美国密歇根州立大学采用表面波共鸣器等离子体射流, 开展了微波等离子体辅助燃烧研究和再燃实验研究^[104,105]. 研究表明, 大气压微波等离子体点火助燃过程可分成3个阶段: 电场增强点火阶段、过渡阶段和等离子体助燃阶段. 如图20所示, 电火花连锁微波放电点火(SI+MW)与电火花点火(SI)相比, 燃烧速度更快, 燃烧区域更大. 综上所述, 适合用来点火助燃的大气压低功率微波放电装置为表面波共鸣器, 因为其产生的等离子体温度高、射流羽翼密度高、尺度大.

5.2 生物医学应用

大气压等离子体射流具有高密度、低温度的良好特性, 等离子体射流装置产生的等离子体富含多种活性粒子团而其羽翼温度接近室温, 非常适合用来做等离子体生物医学应用^[108]. 等离子体生物医学具有很好的应用价值, 比如等离子体杀菌消毒医用设备, 可以快速高效杀灭病菌和病毒; 等离子体创伤处理, 促进伤口愈合而又减少伤口疤痕; 再如等离子体诱导细胞凋亡和唤醒组织免疫, 可用来化疗癌细胞或其他免疫系统疾病^[109,110]. 大气压低功率微波同轴线谐振器相比于

图 20 (网络版彩图)SI和SI+MW点火及初始火焰发展的纹影图像. 甲烷-空气混合比分别为0.65, 0.75, 0.85和1.0. 初始条件为1.08 bar和300 K^[105]

Figure 20 (Color online) Schlieren images of the ignition event and early flame development for SI and SI+MW ignitions with methane-air mixtures of 0.65, 0.75, 0.85, and 1.0 at an initial condition of 1.08 bar and 300 K^[105].

其他激励源等离子体射流, 具有更高的活性粒子和更低的羽翼温度, 在等离子体生物医学应用方面有潜在优势. 在促进创伤凝血和伤口修复方面, 韩国的Lee课题组做了很多有益尝试. 2011年, 采用同轴线谐振器, 做了杀菌灭毒试验, 证明了等离子体射流的有效成分是氧活性粒子^[62]. 2013年, 使用同轴线谐振器, 比较了不同载气时等离子体的放电模式, 得出了等离子体有效因子是OH, O, O₃和NO^[63]. 2015年, 采用图3所示的便携式装置, 空气微波放电等离子体射流处理伤口试验, 对比试验结果如图21所示; 揭示了有效因子是O₃和NO, 等离子体处理后, 创口组织修复速度可以提高1倍^[65].

大多数大气压等离子体辉光放电需要使用惰性气体或者惰性气体和氧气的混合气体, 或者需要外加气流来得到稳定的放电效果. 而如果用空气作为工作气体, 则需要很高的电压并产生很高的等离子体温度. 这些都极大地限制了等离子体射流的应用范围, 如人体伤口的杀菌处理、牙齿美白等就需要是冷等离子体. 因此研究一种空气辉光放电冷等离子体射流装置尤为重要. 目前已经出现几种典型的非热等离子体的

图 21 (网络版彩图)空气微波等离子体处理伤口后, 伤口愈合的观察. 空气等离子体运行在富含臭氧(主要气流: 4 slm)条件下和富含NO(主要气流: 0.1 slm)条件下. 冷却空气流量固定在3 slm, 输入功率固定在10 W(1.315 GHz)的有效功率. (a) SKH1小鼠背部的伤口在每一天的代表性照片; (b) 组织样本在10 d后的组织学图像, 并且没有发现真皮的结构改变和角质层的物理损伤^[65]

Figure 21 (Color online) Observations of wound healing after air microwave plasma treatment. The air plasma was operated at the ozone abundant (main gas flow: 4 slm) regime and the NO abundant (main gas flow: 0.1 slm) regime. The cooling air flow was fixed at 3 slm. Input power was fixed at 10 W (1.315 GHz) effective power. (a) The representative photographs of the wounds on the backs of the SKH1 mice on even days and (b) histologic images of tissue samples after 10 d and no structural alterations of dermis and physical damages to the stratum corneum layer^[65].

发生装置, 但因成本高、不安全、不易携带等多种因素, 并没有很好的使用. 陈兆权等人^[111-113]采用的大气辉光放电等离子体射流装置简单易行、成本低, 而且产生的等离子体具有室温温度, 不会对人体造成热或电击的伤害, 使用便携安全. 便携式等离子体手电(用于伤口表面杀菌灭毒)最早由华中科技大学Pei等人^[114,115]研制成功, 但是该装置仅仅具有杀菌灭毒的功能, 不具有创伤修复的功能. 大气压等离子体处理静电纺丝液, 使得静电纺丝材料具有纳米银粒子而具有抗菌作用, 此种技术由美国北卡罗来纳大学的张向武教授团队^[116]研发得出. 静电纺丝装置不具有便携性, 且纺丝材料仅有抗菌作用而不具有促进伤口愈合和消除创伤疤痕的作用. 青岛博纳生物科技有限公司开发了便携式静电纺丝装置, 使用医用丙酮作为纺丝液, 得到了不会产生二次创伤的静电纺丝包覆材料, 但是该装置不具有等离子体杀菌灭毒的功能, 同时纺丝材料

也不具有抗感染、促生长和消疤痕的功能. 鉴于此, 陈兆权等人^[111-113]所开发的便携式微波子体杀菌灭菌和静电纺丝创伤修复一体装置在国际上是独有的, 具有快速等离子体射流创伤处理和抗感染、促生长、消疤痕及无二次创伤的静电纺丝伤口包覆功能. 该功能装置, 已经完成原理样机制作和专利授权工作, 正在优化装置性能和医学验证等工作, 有望不久推向市场.

5.3 其他应用前景

大气压微波放电具有等离子体密度高、温度低、活性成分丰富等优异性能. 大气压低功率微波等离子体除了在点火助燃和生物医学应用两个主流领域外, 在粒子激发源、光谱检测技术、等离子体3D打印技术、等离子体参数检测技术、照明光源、纳米材料应用等方面均有潜在应用. 激光器, 特别是大功率激光器, 需要泵浦粒子源, 微波放电产生的等离子体正好充当激光器泵浦; 此外, 质谱仪也需要粒子源, 微带线共振器已经在此方面有所作为^[14]. 常规的等离子体炬

光谱检测仪采用电感耦合放电源激发, 浙江大学的金钦汉教授^[117]正在采用同轴线谐振器取代电感耦合源, 开发微波等离子体光谱检测技术. 等离子体可以改性纸张的浸润性, 从而改善印刷质量; 不但如此, 等离子体射流还可以结合3D打印技术, 开发微机电设备^[118]. 发卡型激励器工作原理模型来源于发卡探针共振器, 反之基于发卡探针用来诊断大气压等离子体的参数的工作十分有必要^[119], 东华大学的徐金洲教授等人^[76]一直致力于此项工作. 如今LED光源几乎独占市场, 但是LED的光谱范围偏离自然光较大, 其含有的特征谱线尖峰对人眼有损伤; 中国科学院等离子体物理研究所的単家芳研究员开发了微波等离子体光源, 谱线范围与自然光吻合度好, 亮度更优. 还有, 微波等离子体共振放电器, 具有激发功率低、能效高等优良特性, 可以借用其共振放电电极构型, 用于设计先进的微波推进器^[120-122]. 此外, 在材料表面等离子体改性和镀膜应用领域, 大气压低功率微波等离子体射流的参数优越且不需要真空系统, 竞争优势明显^[123-129], 等等.

参考文献

- Hidaka Y, Choi E M, Mastovsky I, et al. Observation of large arrays of plasma filaments in air breakdown by 1.5-MW 110-GHz gyrotron pulses. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 035003
- Aleksandrov K V, Bychkov V L, Esakov I I, et al. Investigations of subcritical streamer microwave discharge in reverse-vortex combustion chamber. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2009, 37: 2293-2297
- Zhang Q, Zhang G, Wang L, et al. Measurement of the electron density in a microwave plasma torch at atmospheric pressure. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 201502
- Wang Z, Zhang G, Zhang Q, et al. A large-volume open-air microwave plasma based on parallel multislotted rectangular waveguides. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2012, 40: 1380-1385
- Liu Y X, Zhang G X, Hou L Y, et al. Electromagnetic characteristics of high pressure microwave plasma generator based on a cylindrical resonant cavity (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2013, 39: 1757-1762 [刘永喜, 张贵新, 侯凌云, 等. 基于圆柱形谐振腔的高气压微波等离子体发生装置的电磁特性. *高电压技术*, 2013, 39: 1757-1762]
- Wang Z, Zhang G X, Wang Q. Development of open type microwave plasma source (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2011, 37: 793-800 [王仲, 张贵新, 王强. 开放式微波等离子体源的研究进展. *高电压技术*, 2011, 37: 793-800]
- Liu C, Zhang G X, Wang Q, et al. Experimental study of organic waste gas treatment by microwave plasma generated at atmospheric pressure (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2017, 43: 2673-2679 [刘程, 张贵新, 王强, 等. 大气压微波等离子体处理有机废气的实验研究. *高电压技术*, 2017, 43: 2673-2679]
- Zhang Q, Zhang G X, Wang L M, et al. Design and experiment of an atmospheric pressure microwave plasma torch (in Chinese). *High Pow Las Part Beam*, 2010, 22: 315-318 [张庆, 张贵新, 王黎明, 等. 大气压微波等离子体炬的仿真设计与实验. *强激光与粒子束*, 2010, 22: 315-318]
- Liu C L, Wang J H, Xiong L W, et al. Design and experimental study of atmospheric microwave plasma torch device (in Chinese). *Chin J Low Temperat Phys*, 2011, 33: 112-115 [刘长林, 汪建华, 熊礼威, 等. 大气微波等离子体炬装置设计及实验研究. *低温物理学报*, 2011, 33: 112-115]
- Hnilica J, Kudrle V, Vašina P, et al. Characterization of a periodic instability in filamentary surface wave discharge at atmospheric pressure in

- argon. *J Phys D-Appl Phys*, 2012, 45: 055201
- 11 Takamura S, Amano S, Kurata T, et al. Formation and decay processes of Ar/He microwave plasma jet at atmospheric gas pressure. *J Appl Phys*, 2011, 110: 043301
- 12 Wang Q, Hou L, Zhang G, et al. Using indium tin oxide material to implement the imaging of microwave plasma ignition process. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 074107
- 13 Lee H W, Kang S K, Won I H, et al. Distinctive plume formation in atmospheric Ar and He plasmas in microwave frequency band and suitability for biomedical applications. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 123506
- 14 Hopwood J, Hoskinson A R, Gregório J. Microplasmas ignited and sustained by microwaves. *Plasma Sources Sci Technol*, 2014, 23: 064002
- 15 Chen Z, Xia G, Zou C, et al. Study on hairpin-shaped argon plasma jets resonantly excited by microwave pulses at atmospheric pressure. *J Appl Phys*, 2015, 118: 023307
- 16 Rao X, Hammack S, Carter C, et al. Microwave-plasma-coupled re-ignition of methane-and-oxygen mixture under auto-ignition temperature. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 3307–3313
- 17 Carbone E, Sadeghi N, Vos E, et al. Spatio-temporal dynamics of a pulsed microwave argon plasma: Ignition and afterglow. *Plasma Sources Sci Technol*, 2015, 24: 015015
- 18 Chen Z, Xia G, Zhou Q, et al. Filamentary streamer discharges in argon at atmospheric pressure excited by surface plasmon polaritons. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 084701
- 19 Zheng Z, Chen Z Q, Liu P, et al. Study on argon plasma jets at atmospheric pressure in ambient air excited by surface waves. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 911–916
- 20 Boeuf J P, Chaudhury B, Zhu G Q. Theory and modeling of self-organization and propagation of filamentary plasma arrays in microwave breakdown at atmospheric pressure. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 015002
- 21 Zhu G Q, Boeuf J P, Li J X. Effects of pressure and incident power on self-organization pattern structure during microwave breakdown in high pressure air (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 235202 [朱国强, Boeuf J P, 李进贤. 压强与功率对高压空气微波放电自组织结构影响的数值研究. *物理学报*, 2012, 61: 235202]
- 22 Zhou Q H, Dong Z W, Chen J Y. Modeling of plasma pattern formation in 110 GHz microwave air breakdown (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60: 125202 [周前红, 董志伟, 陈京元. 110 GHz微波电离大气压产生等离子体过程的理论研究. *物理学报*, 2011, 60: 125202]
- 23 Zhou Q H, Dong Z W. Theoretical study on the air breakdown by perpendicularly intersecting high-power microwave (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 205202 [周前红, 董志伟. 垂直相交高功率微波大气击穿的理论研究. *物理学报*, 2013, 62: 205202]
- 24 Henriques J, Tatarova E, Dias F M, et al. Spatial structure of a slot-antenna excited microwave N₂-Ar plasma source. *J Appl Phys*, 2008, 103: 103304
- 25 Yang J, Shi F, Yang T L, et al. Numerical simulation on the plasma field within discharge chamber of electron cyclotron resonance ion thruster (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2010, 59: 8701–8706 [杨涓, 石峰, 杨铁链, 等. 电子回旋共振离子推力器放电室等离子体数值模拟. *物理学报*, 2010, 59: 8701–8706]
- 26 Yang J, Shi F, Jin Y, et al. Experiment study of an electron cyclotron resonant ion source based on a tapered resonance cavity. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 123505
- 27 Chen Z Q, Liu M H, Lan C H, et al. Estimation of plasma density by surface plasmons for surface-wave plasmas. *Chin Phys Lett*, 2008, 25: 4333–4335
- 28 Lan C H, Lan C Z, Hu X W, et al. Self-consistent three-dimensional modeling and simulation of large-scale rectangular surface-wave plasma source. *Chin Phys B*, 2009, 18: 2412–2419
- 29 Chen M L, Mao G W, Xia G Q, et al. PIC/MCC simulation on the optical of electron cyclotron resonance ion thruster (in Chinese). *J Propuls Tech*, 2012, 33: 150–154 [陈茂林, 毛根旺, 夏广庆, 等. 电子回旋共振离子推力器栅极光学系统的PIC/MCC模拟. *推进技术*, 2012, 33: 150–154]
- 30 Jin X L, Huang T, Liao P, et al. The particle-in-cell simulation and Monte Carlo collision simulation of the interaction between electrons and microwave in electron cyclotron resonance discharge (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2009, 58: 5526–5531 [金晓林, 黄桃, 廖平, 等. 电子回旋共振放电中电子与微波相互作用特性的粒子模拟和蒙特卡罗碰撞模拟. *物理学报*, 2009, 58: 5526–5531]
- 31 Chen Z, Liu M, Xia G, et al. PIC/MCC simulation of the ionization process for filamentary streamer plasma jet at atmosphere pressure in argon. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2012, 40: 2861–2865

- 32 Chen Z, Ye Q, Xia G, et al. Particle-in-cell/Monte Carlo collision simulation of the ionization process of surface-wave plasma discharges resonantly excited by surface plasmon polaritons. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 033502
- 33 Schlüter H, Shivarova A. Travelling-wave-sustained discharges. *Phys Rep*, 2007, 443: 121–255
- 34 Carbone E, Nijdam S. Ultra-fast pulsed microwave plasma breakdown: Evidence of various ignition modes. *Plasma Sources Sci Technol*, 2014, 23: 012001
- 35 Razzak M A, Takamura S, Tsujikawa T, et al. Measurement of electric field distribution along the plasma column in microwave jet discharges at atmospheric pressure. *Plasma Fusion Res*, 2009, 4: 047
- 36 Hübner S, Palomares J M, Carbone E A D, et al. A power pulsed low-pressure argon microwave plasma investigated by Thomson scattering: Evidence for molecular assisted recombination. *J Phys D-Appl Phys*, 2012, 45: 055203
- 37 Muñoz J, Calzada M D. Experimental research on surface wave Ar-He discharges at atmospheric pressure. *J Phys D-Appl Phys*, 2008, 41: 135203
- 38 Liu P, Chen M, Chen J, et al. A new remote control microwave plasma jet excited by surface waves. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 3942–3948
- 39 Xia G, Chen Z, Yin Z, et al. Atmospheric plasma jet relay driven by a 40-kHz power supply and its representative characteristics. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2015, 43: 1825–1831
- 40 Chen Z Q, Wang D X, Xia G Q, et al. Research progress of microwave discharge plasma ignition and assisted combustion (in Chinese). *J Solid Rocket Tech*, 2014, 37: 63–67 [陈兆权, 王冬雪, 夏广庆, 等. 微波放电等离子体点火与助燃研究进展. 固体火箭技术, 2014, 37: 63–67]
- 41 Chen Z Q, Hu D, Liu M H, et al. Electromagnetic interaction between local surface plasmon polaritons and an atmospheric surface wave plasma jet. *Chin Phys B*, 2014, 23: 035202
- 42 Kim J, Terashima K. 2.45 GHz microwave-excited atmospheric pressure air microplasmas based on microstrip technology. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 191504
- 43 Iza F, Hopwood J. Split-ring resonator microplasma: Microwave model, plasma impedance and power efficiency. *Plasma Sources Sci Technol*, 2005, 14: 397–406
- 44 Hopwood J, Iza F, Coy S, et al. A microfabricated atmospheric-pressure microplasma source operating in air. *J Phys D-Appl Phys*, 2005, 38: 1698–1703
- 45 Liao B, Zhang S J, Zhu S Z. Modeling and simulation of 2.45 GHz low-power microwave plasma source based on a microstrip split-ring resonator (in Chinese). *J Electron Inform Technol*, 2007, 29: 2512–2516 [廖斌, 张少君, 朱守正. 基于微带环缝谐振器的2.45 GHz小功率微波等离子体源的建模与仿真. 电子与信息学报, 2007, 29: 2512–2516]
- 46 Liao B, Zhang S J, Zhao N, et al. Study on low-power microwave plasma source based on micro strip split-ring resonator (in Chinese). *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2009, 43: 372–376 [廖斌, 张少君, 赵娜, 等. 基于微带环缝谐振器的小功率微波等离子源. 上海交通大学学报, 2009, 43: 372–376]
- 47 Xue J, Hopwood J A. Microwave-frequency effects on microplasma. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2009, 37: 816–822
- 48 Berglund M, Grudén M, Thornell G, et al. Evaluation of a microplasma source based on a stripline split-ring resonator. *Plasma Sources Sci Technol*, 2013, 22: 055017
- 49 Hoskinson A R, Hopwood J. A two-dimensional array of microplasmas generated using microwave resonators. *Plasma Sources Sci Technol*, 2012, 21: 052002
- 50 Wu C, Hoskinson A R, Hopwood J. Stable linear plasma arrays at atmospheric pressure. *Plasma Sources Sci Technol*, 2011, 20: 045022
- 51 Monfared S K, Hoskinson A R, Hopwood J. Time-resolved microplasma electron dynamics in a pulsed microwave discharge. *J Phys D-Appl Phys*, 2013, 46: 425201
- 52 Miura N, Hopwood J. Internal structure of 0.9 GHz microplasma. *J Appl Phys*, 2011, 109: 113303
- 53 Miura N, Hopwood J. Instability control in microwave-frequency microplasma. *Eur Phys J D*, 2012, 66: 1–10
- 54 Gregório J, Alves L L, Leroy O, et al. Microwave microplasma sources based on microstrip-like transmission lines. *Eur Phys J D*, 2010, 60: 627–635
- 55 Wu C, Zhang Z B, Hoskinson A, et al. Circular array of stable atmospheric pressure microplasmas. *Eur Phys J D*, 2010, 60: 621–625
- 56 Hoskinson A R, Singh P K, Sonkusale S, et al. Low-voltage switchable microplasma arrays generated using microwave resonators. *IEEE Electron Device Lett*, 2013, 34: 804–806

- 57 Xue J, Urdahl R S, Cooley J E. Plasma resonances in a microwave-driven microdischarge. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 064102
- 58 Zhang Z B, Hopwood J. Linear arrays of stable atmospheric pressure microplasmas. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 161502
- 59 Kim J, Katsurai M, Kim D, et al. Microwave-excited atmospheric-pressure plasma jets using a microstrip line. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 191505
- 60 Hoskinson A R, Gregorio J, Hopwood J, et al. Argon metastable production in argon-helium microplasmas. *J Appl Phys*, 2016, 119: 233301
- 61 Choi J, Iza F, Do H J, et al. Microwave-excited atmospheric-pressure microplasmas based on a coaxial transmission line resonator. *Plasma Sources Sci Technol*, 2009, 18: 025029
- 62 Seo Y S, Lee H W, Kwon H C, et al. A study on characterization of atmospheric pressure plasma jets according to the driving frequency for biomedical applications. *Thin Solid Films*, 2011, 519: 7071–7078
- 63 Lee H W, Lee H W, Kang S K, et al. Synergistic sterilization effect of microwave-excited nonthermal Ar plasma, H_2O_2 , H_2O and TiO_2 , and a global modeling of the interactions. *Plasma Sources Sci Technol*, 2013, 22: 055008
- 64 Lee H W, Nam S H, Mohamed A A H, et al. Atmospheric pressure plasma jet composed of three electrodes: Application to tooth bleaching. *Plasma Process Polym*, 2010, 7: 274–280
- 65 Kang S K, Kim H Y, Yun G S, et al. Portable microwave air plasma device for wound healing. *Plasma Sources Sci Technol*, 2015, 24: 035020
- 66 Kim H Y, Kang S K, Kwon H C, et al. Gas temperature effect on reactive species generation from the atmospheric pressure air plasma. *Plasma Process Polym*, 2013, 10: 686–697
- 67 Choi J, Mohamed A A H, Kang S K, et al. 900-MHz nonthermal atmospheric pressure plasma jet for biomedical applications. *Plasma Process Polym*, 2010, 7: 258–263
- 68 Park G Y, Park S J, Choi M Y, et al. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications. *Plasma Sources Sci Technol*, 2012, 21: 043001
- 69 Chen Z, Yin Z, Chen M, et al. Self-consistent fluid modeling and simulation on a pulsed microwave atmospheric-pressure argon plasma jet. *J Appl Phys*, 2014, 116: 153303
- 70 Chen Z, Yin Z, Xia G, et al. Pulsed microwave-driven argon plasma jet with distinctive plume patterns resonantly excited by surface plasmon polaritons. *Chin Phys B*, 2015, 24: 025203
- 71 Chen Z, Liu X, Zou C, et al. Donut shape plasma jet plumes generated by microwave pulses even without air mole fractions. *J Appl Phys*, 2017, 121: 023302
- 72 Chen Z, Xia G, Zou C, et al. Bullet-shaped ionization front of plasma jet plumes driven by microwave pulses at atmospheric gas pressure. *J Appl Phys*, 2017, 122: 093301
- 73 Stenzel R L. Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasmas. *Rev Sci Instrum*, 1976, 47: 603–607
- 74 Stenzel R L. Filamentation instability of a large amplitude whistler wave. *Phys Fluids*, 1976, 19: 865–871
- 75 Piejak R B, Godyak V A, Garner R, et al. The hairpin resonator: A plasma density measuring technique revisited. *J Appl Phys*, 2004, 95: 3785–3791
- 76 Xu J, Nakamura K, Zhang Q, et al. Simulation of resistive microwave resonator probe for high-pressure plasma diagnostics. *Plasma Sources Sci Technol*, 2009, 18: 045009
- 77 Kang S K, Seo Y S, Lee H W, et al. Slit shaped microwave induced atmospheric pressure plasma based on a parallel plate transmission line resonator. *J Phys D-Appl Phys*, 2011, 44: 435201
- 78 Zhou Q H, Dong Y, Dong Z W, et al. Theoretical study of the microwave air breakdown at dielectric surface (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 085201 [周前红, 董烨, 董志伟, 等. 介质表面附近微波大气击穿理论研究. *物理学报*, 2015, 64: 085201]
- 79 Yuan Z C, Shi J M. Theoretical and numerical studies on interactions between high-power microwave and plasma (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 095202 [袁忠才, 时家明. 高功率微波与等离子体相互作用理论和数值研究. *物理学报*, 2014, 63: 095202]
- 80 Tatarova E, Dias F M, Ferreira C M, et al. Self-consistent kinetic model of a surface-wave-sustained discharge in nitrogen. *J Phys D-Appl Phys*, 1997, 30: 2663–2676
- 81 Zhao P C, Liao C, Feng J. Short-pulse high-power microwave breakdown at high pressures. *Chin Phys B*, 2015, 24: 025101
- 82 Chen Z, Liu M, Tang L, et al. Surface wave analysis of planar-type overdense plasma with surface plasmon polariton resonance. *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 025205
- 83 Kousaka H, Ono K. Fine structure of the electromagnetic fields formed by backward surface waves in an azimuthally symmetric surface wave-

- excited plasma source. *Plasma Sources Sci Technol*, 2003, 12: 273–286
- 84 Takahashi T, Takao Y, Eriguchi K, et al. Numerical and experimental study of microwave-excited microplasma and micronozzle flow for a microplasma thruster. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 083505
- 85 Takahashi T, Takao Y, Eriguchi K, et al. Microwave-excited microplasma thruster: A numerical and experimental study of the plasma generation and micronozzle flow. *J Phys D-Appl Phys*, 2008, 41: 194005
- 86 Zhao P C, Guo L X, Li H M. Effect of microwave frequency on plasma formation in air breakdown at atmospheric pressure. *Chin Phys B*, 2015, 24: 105102
- 87 Chaudhury B, Boeuf J P, Zhu G Q, et al. Physics and modelling of microwave streamers at atmospheric pressure. *J Appl Phys*, 2011, 110: 113306
- 88 Kourtzanidis K, Boeuf J P, Rogier F. Three dimensional simulations of pattern formation during high-pressure, freely localized microwave breakdown in air. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 123513
- 89 Kourtzanidis K, Rogier F, Boeuf J P. Gas heating effects on the formation and propagation of a microwave streamer in air. *J Appl Phys*, 2015, 118: 103301
- 90 Hoskinson A R, Gregório J, Parsons S, et al. Electron confinement and heating in microwave-sustained argon microplasmas. *J Appl Phys*, 2015, 117: 163301
- 91 Gregório J, Hoskinson A R, Hopwood J. Modeling of microplasmas from GHz to THz. *J Appl Phys*, 2015, 118: 083305
- 92 Baeva M, Andrasch M, Ehlbeck J, et al. Temporally and spatially resolved characterization of microwave induced argon plasmas: Experiment and modeling. *J Appl Phys*, 2014, 115: 143301
- 93 Chen Z Q, Xia G Q, Liu M H, et al. PIC/MCC simulation of the ionization process of SWP influenced by gas pressure and SPP (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 195204 [陈兆权, 夏广庆, 刘明海, 等. 气体压强及表面等离激元影响表面波等离子体电离发展过程的粒子模拟. *物理学报*, 2013, 62: 195204]
- 94 Chen Z Q, Yin Z X, Chen M G, et al. Particle-in-cell simulation on surface-wave discharge process influenced by gas pressure and negative-biased voltage along ion sheath layer (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 095205 [陈兆权, 殷志祥, 陈明功, 等. 负偏压离子鞘及气体压强影响表面波放电过程的粒子模拟. *物理学报*, 2014, 63: 095205]
- 95 Zhu L J, Chen Z Q, Yin Z X, et al. Numerical simulation on the production mechanism of surface-wave plasmas sustained along a metal rod. *Chin Phys Lett*, 2014, 31: 035203
- 96 Levko D, Raja L L. Effect of frequency on microplasmas driven by microwave excitation. *J Appl Phys*, 2015, 118: 043303
- 97 Levko D, Raja L L. Electron kinetics in atmospheric-pressure argon and nitrogen microwave microdischarges. *J Appl Phys*, 2016, 119: 163303
- 98 Kwon H C, Jung S Y, Kim H Y, et al. Abnormal electron-heating mode and formation of secondary-energetic electrons in pulsed microwave-frequency atmospheric microplasmas. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 033511
- 99 Huo N, Zhang G X, Zhang F, et al. Simulation and experimental investigation of auto ignition using microwave plasma (in Chinese). *J Autom Safe Energy*, 2011, 2: 217–222 [霍娜, 张贵新, 张锋, 等. 微波等离子体用于汽车点火的仿真及研究. *汽车安全与节能学报*, 2011, 2: 217–222]
- 100 Liao S S, Wang Q, Zhang B Y, et al. Cold-model experimental and simulation research of reaction zone of a microwave plasma torch (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2014, 40: 262–268 [廖姗姗, 王强, 张博雅, 等. 微波等离子体炬反应区的冷模测量与仿真. *高电压技术*, 2014, 40: 262–268]
- 101 ElSabbagh M, Kado S, Ikeda Y, et al. Measurements of rotational temperature and density of molecular nitrogen in spark-plug assisted atmospheric-pressure microwave discharges by rotational Raman scattering. *Jpn J Appl Phys*, 2011, 50: 076101
- 102 Linkenheil K, Ruoss H O, Grau T, et al. A novel spark-plug for improved ignition in engines with gasoline direct injection (GDI). *IEEE Trans Plasma Sci*, 2005, 33: 1696–1702
- 103 Rao X, Hammack S, Carter C, et al. Laser diagnostic imaging of energetically enhanced flames using direct microwave plasma coupling. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 2354–2355
- 104 Starikovskiy A, Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion. *Prog Energy Combust Sci*, 2013, 39: 61–110
- 105 Wolk B, DeFilippo A, Chen J Y, et al. Enhancement of flame development by microwave-assisted spark ignition in constant volume combustion chamber. *Combust Flame*, 2013, 160: 1225–1234
- 106 Esakov I I, Grachev L P, Khodataev K V, et al. Surface discharge in a microwave beam. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2007, 35: 1658–1663

- 107 Esakov I I, Grachev L P, Khodataev K V, et al. Propane-air mixture combustion assisted by MW discharge in a speedy airflow. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2006, 34: 2497–2506
- 108 Lu X, Laroussi M, Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Sci Technol*, 2012, 21: 034005
- 109 Lu X, Naidis G V, Laroussi M, et al. Guided ionization waves: Theory and experiments. *Phys Rep*, 2014, 540: 123–166
- 110 Lu X, Naidis G V, Laroussi M, et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Phys Rep*, 2016, 630: 1–84
- 111 Chen Z, Xia Q, Li P, et al. Production of 30-mm wide DC-driven brush-shaped cold plasmas and simulation on its discharge process. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2013, 41: 1658–1663
- 112 Li P, Chen Z, Xia G, et al. Study on DC-driven air cold plasma brushes generated without airflow supplement. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2013, 41: 513–517
- 113 Chen Z, Zheng X, Xia G, et al. A 30 mm wide DC-driven brush-shaped cold air plasma without airflow supplement. *Plasma Sci Technol*, 2014, 16: 329–334
- 114 Pei X, Lu X, Liu J, et al. Inactivation of a 25.5 μm *Enterococcus faecalis* biofilm by a room-temperature, battery-operated, handheld air plasma jet. *J Phys D-Appl Phys*, 2012, 45: 165205
- 115 Pei X, Liu J, Xian Y, et al. A battery-operated atmospheric-pressure plasma wand for biomedical applications. *J Phys D-Appl Phys*, 2014, 47: 145204
- 116 Shi Q, Vitichuli N, Nowak J, et al. Durable antibacterial Ag/polyacrylonitrile (Ag/PAN) hybrid nanofibers prepared by atmospheric plasma treatment and electrospinning. *Eur Polymer J*, 2011, 47: 1402–1409
- 117 Jin Q. Microwave Induced Plasma Atomic Spectrometry (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015. 10 [金钦汉. 微波诱导等离子体原子光谱分析. 杭州: 浙江大学出版社, 2015. 10]
- 118 Gandhiraman R P, Singh E, Diaz-Cartagena D C, et al. Plasma jet printing for flexible substrates. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 123103
- 119 Sirse N, Karkari S K, Turner M M. Probing negative ion density and temperature using a resonance hairpin probe. *Plasma Sources Sci Technol*, 2015, 24: 022001
- 120 Yang J, Feng B B, Luo L T, et al. Performance comparison between ECR neutralizers using argon and krypton propellant (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2015, 41: 2850–2855 [杨涓, 冯冰冰, 罗立涛, 等. 氩气和氪气作为ECR中和器工质的性能比较. 高电压技术, 2015, 41: 2850–2855]
- 121 Jin Y Z, Yang J, Luo L T, et al. Diagnosis of electron cyclotron resonance plasma inside ion source (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2015, 41: 2950–2957 [金逸舟, 杨涓, 罗立涛, 等. 离子源内电子回旋共振等离子体诊断与分析. 高电压技术, 2015, 41: 2950–2957]
- 122 Li P, Mu H B, Yu L, et al. Progress, key problems and prospect on low temperature plasma assisted combustion (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2015, 41: 2073–2083 [李平, 穆海宝, 喻琳, 等. 低温等离子体辅助燃烧的研究进展、关键问题及展望. 高电压技术, 2015, 41: 2073–2083]
- 123 Wu S Q, Nie L L, Lu X P. Atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2015, 41: 2602–2624 [吴淑群, 聂兰兰, 卢新培. 大气压非平衡等离子体射流. 高电压技术, 2015, 41: 2602–2624]
- 124 Kutasi K, Korolov I. Characteristics of the flowing afterglow of a surface-wave microwave discharge in a reactor loaded with a small diameter tube. *Plasma Process Polym*, 2017, 14: 1700028
- 125 Xian Y B, Lu X P. Propagation of atmospheric-pressure cold plasma jets (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2012, 38: 1667–1676 [鲜于斌, 卢新培. 等离子体射流的推进机理. 高电压技术, 2012, 38: 1667–1676]
- 126 Lu X P, Yan P, Ren C S, et al. Review on atmospheric pressure pulsed DC discharge (in Chinese). *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 801–815 [卢新培, 严萍, 任春生, 等. 大气压脉冲放电等离子体的研究现状与展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 801–815]
- 127 Chen Z, Zhou B, Zhang H, et al. Characteristic plume morphologies of atmospheric Ar and He plasma jets excited by a pulsed microwave hairpin resonator. *Chin Phys B*, 2018, 27: 055202
- 128 Li H P, Yu D R, Sun W T, et al. State-of-the-art of atmospheric discharge plasmas (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2016, 42: 3697–3727 [李和平, 于达仁, 孙文廷, 等. 大气压放电等离子体研究进展综述. 高电压技术, 2016, 42: 3697–3727]
- 129 Li P, Chen Z, Mu H, et al. Confluence or independence of microwave plasma bullets in atmospheric argon plasma jet plumes. *J Appl Phys*, 2018, 123: 123302

Research progress on atmospheric pressure lower-power microwave plasma sources and their application prospects

CHEN ZhaoQuan^{1*}, ZHANG Huang¹, TU YiLang¹ & KUDRYAVTSEV A. A.²

¹ College of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China;

² Faculty of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg 198504, Russia

In comparison with low pressure microwave plasma, atmospheric pressure microwave plasma has some excellent properties such as high density, high activity, simple production equipment, and so on. However, the microwave plasma excited at high gas pressure is often appeared as the form of streamer discharge and the very higher incident power is needed for atmospheric pressure microwave discharges, thence it is difficult in realizing some special applications because of the expensive cost for microwave discharges at atmospheric gas pressure. Aiming at the difficult problem of low power microwave discharge in atmospheric pressure, the research status and application prospect of atmospheric pressure low power microwave plasma source are presented in this paper. Firstly, the research and development status of four kinds of international typical atmospheric pressure low power microwave plasma sources are summarized. Followed the research progress of numerical calculation is introduced. And then the physical mechanism of atmospheric pressure low power microwave discharge is discussed. Finally, several engineering application examples are recommended and their potential applications are prospected.

microwave discharge, surface wave plasma, numerical simulation, electromagnetic model, ionization wave

PACS: 52.50.Sw, 52.40.Fd, 52.35.Mw, 52.25.Os

doi: [10.1360/SSPMA2018-00150](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00150)