

外加磁场对螺旋等离子体的影响*

胡杨^{1) #} 罗婧怡^{2) #} 蔡雨烟¹⁾ 卢新培^{2) †}

1) (中电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆 400060)

2) (华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

(2022年12月26日收到; 2023年5月5日收到修改稿)

在低气压、氮气环境及无外加磁场的情况下发现了一种新型等离子体, 因其具有规则的螺旋传播模式, 被称为螺旋等离子体. 尽管已经对该螺旋等离子体的关键特性进行了大量研究, 螺旋等离子体的形成机理仍未理清, 这影响其在材料、纳米技术上的应用. 通过在不同手性的螺旋等离子体外施加磁场, 研究外加磁场对螺旋等离子体的调控行为, 发现外加磁场将会使得螺旋等离子体发生收缩、拉伸等行为. 并且, 外加磁场还会影响螺旋等离子体的手性和螺旋形态的清晰度. 通过电磁波理论计算螺旋等离子体的径向电场, 理清外加磁场影响螺旋等离子体行为的机理, 发现洛伦兹力的磁场力分量是外加磁场调控螺旋等离子体行为的原因. 本文为理解螺旋等离子体的运动行为打下理论基础, 有利于将来在材料、纳米技术等领域的实际应用.

关键词: 大气压等离子体, 等离子体射流, 非平衡等离子体, 电流体动力学**PACS:** 05.70.-a, 36.40.Gk, 41.20.Jb, 42.25.Bs**DOI:** 10.7498/aps.72.20222442

1 引言

由于大气压等离子体射流在等离子体生物学、表面处理、材料加工、纳米技术等方面的应用, 引起了国内外学者的广泛关注^[1-11]. 对于等离子体而言, 磁场会对其电离平衡和空间分布产生影响. 在工业应用中, 已经开始采用磁场的方式来提高等离子体去除污染气体的效率. Park等^[12]在1998年就开始研究磁场对直流电晕放电去除 NO_x 的影响, 他们的研究表明磁场与 NO_x 的去除效果密切相关. 而Ferreira等^[13]在其研发的等离子体反应器中引入了磁场, 结果发现磁场的存在可以使电晕放电去除污染气体的效率提高. 而Moon等^[14]在非平衡等离子体反应器上施加了一个交叉磁场, 发现该磁场的存在会使电晕起始电压和击穿电压增大. 此外, 磁场和等离子体的结合不仅有利于污染

气体的去除, 还有利于增大某些工业气体的产量. Pekárek^[15]研究了固定磁场对大气压力下圆柱形电极结构中通过负电晕放电从空气中产生臭氧的影响, 发现磁场的引入扩大了放电电压电流范围, 并在没有额外能量输入的情况下提高臭氧浓度.

磁场调控等离子体将是一项有前景的研究, 许多学者都对等离子体在磁场中的行为进行了大量的研究. Sternberg等^[16]研究了轴向磁场作用下圆柱形弱电离准中性等离子体的流体模型, 给出了任意外部放电参数下等离子体边界处的电离频率和等离子体密度的解析近似. 也有学者对等离子体与磁场相互作用中出现的手性现象进行了相关研究. Kharzeev和Yee^[17]证明了磁场作用下相对论性等离子体中的手性磁性(chiral magnetic effects, CME)和手性分离效应(chiral separation effects, CSE), 这意味着等离子体中存在一种手性电磁波(chiral magnetic wave, CMW).

* 国家重点研发计划(批准号: 2021YFE0114700)和国家自然科学基金(批准号: 52130701, 51977096)资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: luxinpei@hust.edu.cn

Zou 等^[18]报道了一种在氮气氛围和低压条件下出现,并且由脉冲直流电压驱动的具有规则螺旋传播模式的等离子体.为了更好地理解这种螺旋传播等离子体的产生和控制,在介质管外安装了一个不锈钢螺旋线圈/环^[19].研究发现,螺旋线圈的存在能有效地调制螺旋等离子体 (helical plasma, HP) 的形态.然后将螺旋线圈连接高压脉冲电源,研究外电场对 HP 的影响.调整外电场参数,观察 HP 的响应.最后,还建立了等离子体推进过程的等效电路图,这有助于理解螺旋传播等离子体的推进过程^[20].值得注意的是,该等离子体的产生并不依赖于外部磁场.本文将在之前工作的基础上引入外加磁场,研究磁场对 HP 的影响.通过调节外部磁场的极性和强度,来观察 HP 的响应行为.磁场的加入可以帮助 HP 的现象更容易被理解和研究.实验发现外部磁场的引入可以引起 HP 的拉伸或收缩.这种现象也与等离子体的手性有显著的关系.例如,当 HP 为左手性,外加磁场为 S 极时,HP 随着磁场强度的增大而拉伸.改变 HP 的手性或外部磁场的极性,现象则完全相反.最后,外加磁场也会引起 HP 的手性和螺旋形态清晰度的改变.

2 实验设置

图 1(a) 为实验设置示意图.使用一个被石英介质覆盖的棒状电极在 1.0 m 长的石英管中产生 HP,石英管的内径和外径分别为 6 mm 和 9 mm.石英管的另一端连接至真空泵和进气端.真空泵将石英管内的空气抽出,同时采用质量流量控

制器控制工作气体氮气的流量,使管内气压保持在 4000 Pa.脉冲直流电源驱动设备,频率设置为 700 Hz,脉冲宽度设置为 3 μ s.

为了研究外部磁场对 HP 的影响,在石英管外部放置了一个电磁线圈以产生磁场.直流电源 (eTM-10010) 向电磁线圈提供可调电流,由安培定则可知电磁线圈将在石英管内产生磁场,磁力线与石英管平行.值得注意的是,图 1(a) 所绘的磁力线示意图是以 N 极磁场绘制的,在实验中对调直流电源高压电极和地电极与电磁线圈的接线顺序即可产生 S 极磁场.使用高斯计 (WT103, 量程 0—2000 mT, 精度 $\pm 2\%$) 在螺线圈口测量磁场强度.由于等离子体螺旋结构的左右手性是随机出现,本文通过微调电压来得到目标手性的 HP,以研究外部电场对不同手性的 HP 的影响.使用佳能 D7000 相机拍摄等离子体照片,曝光时间设置为 0.1 s.

3 实验结果

3.1 外加磁场导致 HP 伸缩行为

当对电极施加高压时,石英管内会激发出螺旋形态的等离子体.此时,再在介质管外施加一个方向与 HP 发展方向同向的磁场,将会使得 HP 发生伸缩行为.这种现象与 HP 羽流的手性和磁场的极性有关.左旋和右旋手性的 HP 示意图分别见图 1(b), (c).如图 2(a) 所示,当施加电压为 3.5 kV 时,随着磁场强度从 0 mT 增至 200 mT,左旋 HP 在 S 极磁场下存在拉伸行为.相反,如图 2(b) 所示,当磁极变为 N 极时,左手性 HP 出现收缩行为.

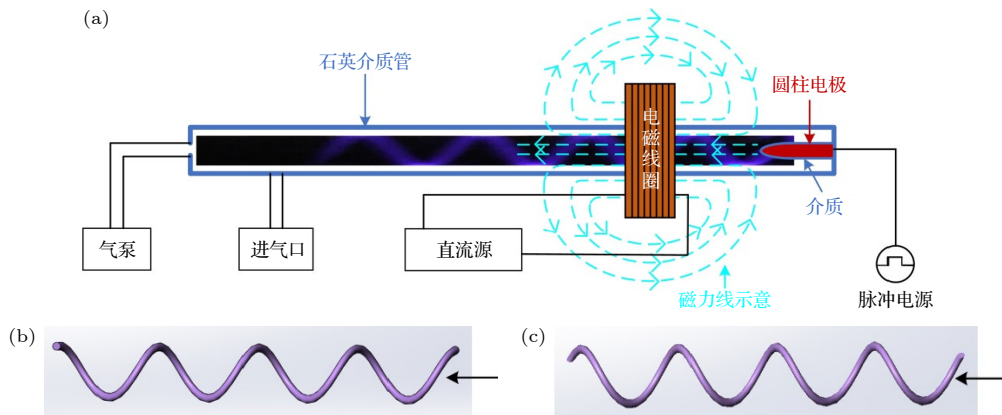


图 1 (a) 实验装置示意图; (b) 左手性旋 HP 示意图; (c) 右手性旋 HP 示意图

Fig. 1. (a) Schematic of the experimental setup; (b) schematic of left-handedness HP plume; (c) schematic of right-handedness HP plume.

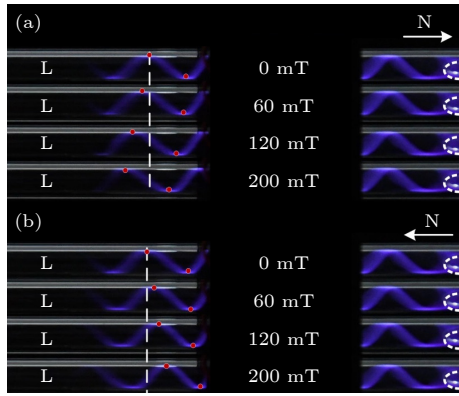


图2 施加电压为3.5 kV时,左手性HP在不同极性和磁场强度下的照片 (a) S极磁场下左手性HP出现拉伸现象; (b) N极磁场下左手性HP出现收缩现象

Fig. 2. Photographs of the left-handedness chiral HP plume at different polarity and intensity of the magnetic field at the applied voltage is 3.5 kV: (a) Contraction photographs of the left-handedness chiral HP plume at S-pole; (b) stretching photographs of the left-handedness chiral HP plume at N-pole.

然而,当调节施加电压为3.8 kV,改变HP的初始手性使其变为右手性时,实验现象与上述结果相反.图3为右手性HP羽流随磁场强度变化的现象.与左手性不同的是,在S极磁场作用下,右手性HP随着磁场强度的增大而收缩,如图3(a)所示.而在N极磁场作用下,当磁场强度从0 mT增至200 mT时,HP羽流随着磁场增加而拉伸,如图3(b)所示.

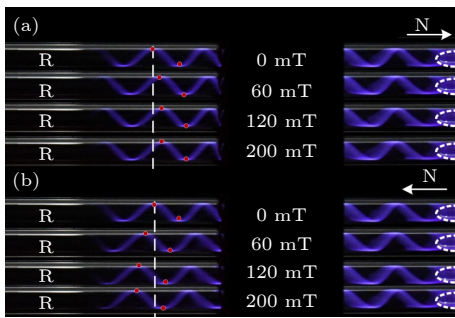


图3 施加电压为3.8 kV时,右手性HP在不同极性和磁场强度下的照片 (a) S极磁场下右手性HP出现收缩现象; (b) N极磁场下右手性HP出现拉伸现象

Fig. 3. Photographs of the right-handedness chiral HP plume at different polarity and intensity of the magnetic field at the applied voltage is 3.8 kV: (a) Contraction photographs of the right-handedness chiral HP plume at S-pole; (b) stretching photographs of the right-handedness chiral HP plume at N-pole.

为更清楚了解外加磁场对HP拉升和收缩的影响规律,将该规律总结在表1中.此外,使用

ImageJ测量了不同磁场强度下的HP的伸/缩长度,结果如图4所示.测量的伸/缩长度为图2和图3中处于白色虚线上的红色小点(0 mT)在不同磁场强度下距初始位置(白色虚线)的距离.从图4可以看出,在相同磁场强度下,拉伸实验组的伸/缩长度普遍大于收缩实验组.伸/缩长度的最大值出现在左手性、S极磁场(200 mT)的实验组下,拉伸长度达到5.4 mm.

表1 外加磁场对HP拉伸和收缩影响的实验结果
Table 1. Effect of external magnetic field on the stretch and contraction of HP.

等离子体手性	S极	N极
左手性	拉伸	收缩
右手性	收缩	拉伸

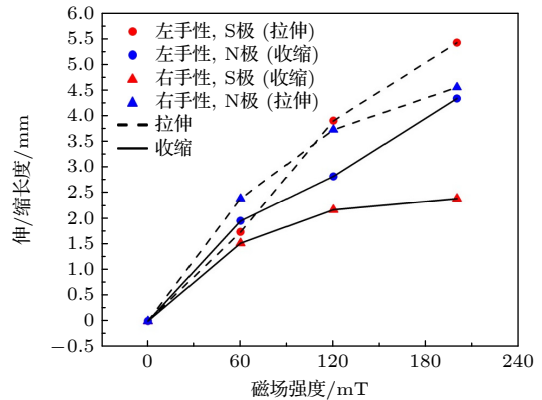


图4 HP伸/缩长度曲线

Fig. 4. Shrunken or stretched length curve of HP plume.

3.2 外加磁场导致HP手性变化

如图5所示,外加磁场会改变HP的手性.在无外加磁场的情况下,将电压调至3.9 kV时,出现了左旋等离子体羽流.随着S极外加磁场的增大,HP开始拉伸变长直到外磁场达到80 mT.当磁场强度为80 mT时,HP几近消失,石英管中的等离子体呈发散状.然后将磁场强度增至160 mT,等离子体又以螺旋状出现.值得一提的是,与最初的左手性等离子体羽流不同,当磁场增至80 mT时,等离子体的手性转变为右手性.

在实际观察中,很容易发现等离子体的手性发生了反转,但从二维图片中无法直观获取该信息.然而,通过观察图5中HP的运动趋势,仍然可以发现HP的手性发生了反转:当S极磁场强度没有达到80 mT前,HP随着磁场的增强而拉伸,结合表1可以判断出此时HP手性为左手性;而当S极

磁场强度达到 80 mT 后, HP 随着磁场强度的增大而收缩. 这一现象与上述 S 极磁场中右手性 HP 的变化规律一致, 因此可以判断出此时等离子体的手性为右手性.

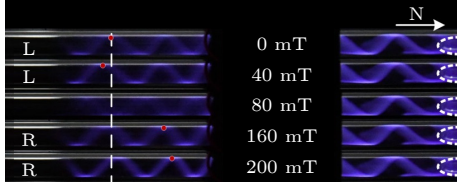


图 5 施加电压为 3.9 kV 时, S 极左手性 HP 随磁场强度增大而改变手性

Fig. 5. Left-handedness chiral HP plume at S-pole changes the chirality with the increase intensity of the magnetic field, when the applied voltage is 3.9 kV.

3.3 外加磁场导致等离子体的螺旋形态清晰度改变

在之前的研究中发现, 施加电压幅值的增大将使等离子体的螺旋形态清晰度下降, 并且其螺旋形态会随着电压的增大逐渐变得弥散并最终过渡到直线模式^[18]. 这是由于在较低的施加电压下, 等离子体的电子密度较低, 石英管的内表面没有完全充电. 在这种情况下, 等离子体更易沿着石英管的内表面传播, 从而形成螺旋传播的形态. 然而, 在更高的施加电压下, 管内表面上的电荷变高. 这反过来又导致较弱的径向电场, 从而导致等离子体沿着直线传播. 而螺旋形态和直线形态的过渡状态就是此处描述的螺旋形态清晰度下降的状态.

为了研究磁场对等离子体螺旋形态清晰度的影响, 从 3.5 kV 开始逐步提高电压至 3.9 kV, 可通过对比发现图 2(b) 中的螺旋形态 (施加电压为 3.5 kV, 0 mT) 较为清晰; 而图 6 的螺旋形态 (施加电压为 3.9 kV, 0 mT) 清晰度已经很低. 因此, 本节将在 3.9 kV 下调节外加磁场强度, 观察其对等离子体螺旋形态清晰度的影响.



图 6 施加电压为 3.9 kV 时, N 极左手性 HP 的螺旋形态随外加磁场强度增加清晰度改变

Fig. 6. Left-handedness chiral HP plume at N-pole changing the clarity in the process of increasing the intensity of the magnetic field.

在改变磁场强度的过程中, 等离子体螺旋形态的清晰度也会发生变化. 图 6 展示了这一现象. 当不施加磁场时, 石英管中的 HP 较为发散. 但当施加 200 mT 强度的磁场时, HP 在磁场作用下不仅出现收缩行为, 螺旋形态也更为清晰.

值得一提的是, 图 2, 图 3, 图 5 和图 6 为完整的等离子体螺旋结构照片, 而实验中观察到的所有现象都发生在电磁线圈的左侧. 线圈右侧的等离子体, 即靠近高压电极的一端, 不会因磁场的变化而发生明显变化, 该现象的产生原因将在后文进行讨论. 在之前的研究中^[18], 已经提到了另一种 HP 模式, 称为直-手性模式. 该模式的 HP 以直线模式启动, 然后在距离圆柱电极一定距离处切换到 HP 形态. 上述外磁场对螺旋状等离子体的影响对直-手性等离子体也是同样的.

4 讨论

实验发现, 通过在介质管外施加特定方向的磁场, 可以对 HP 的形态产生影响. 首先, 外加磁场的引入会引起 HP 出现拉伸或收缩的行为, 并且该行为与 HP 的手性以及磁场方向有关; 其次, 外加磁场会使得 HP 的手性发生反转; 最后, 外加磁场会改变等离子体螺旋形态的清晰度. 然而, 外加磁场究竟如何调控 HP 的行为, 是帮助理解 HP 机理的一个关键问题, 这也有利于更深层次理解电和磁这两种相互影响的电磁学概念.

洛伦兹力是运动电荷在电磁场所受到的力, 其于 1895 年由荷兰物理学家洛伦兹^[21]提出. 洛伦兹力方程表达式为

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

式中, \mathbf{F} 为洛伦兹力, q 为电磁场中带电粒子的电荷, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{v} 是带电粒子的运动速度, \mathbf{B} 为磁场强度. 其可以拆解为两项, 其中 $q\mathbf{E}$ 为电场力项, $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 为磁场力项. 洛伦兹力的磁场项不改变运动电荷的速率和动能, 只能改变电荷的运动方向. 同时实验结果显示, 无论磁场强度如何变化, HP 的总长度、亮度并没有发生明显改变, 只有 HP 的形态发生了改变. 这是否暗示 HP 受到了洛伦兹力磁场项的影响, 从而导致外加磁场对 HP 的调控行为. 对于本文所述的实验设置, 相同电压设置的 HP 的洛伦兹力电场力可视为常数. 因此, 下面将主要分析讨论洛伦兹力的磁场分力对 HP 影响.

由于 HP 总是贴着石英介质管发展, 因此在分析 HP 中的带电粒子运动速度的方向时, 取其运动轨迹的切线方向. 为了方便分析和讨论, 如无特殊说明, 下面提到的带电粒子均指 HP 中的正电荷. 以图 7(a) 中的视角分析此点上的带电粒子受力情况. 图 7(b) 中红色叉号代表分析的带电粒子受到的洛伦兹力的磁场分量方向垂直纸面向下, 即指向石英介质管轴心; 红色点号代表其方向垂直纸面向上, 即背离石英介质管轴心. 对于左手性 HP 中的带电粒子而言, N 极磁场将对会产生一个指向石英介质管轴心的力. 而在同样的磁场方向下, 右手性 HP 中的带电粒子却会受到一个背离石英介质管轴心的力. 而在磁场为 S 极的情况下, 左手性、右手性 HP 的受力情况与 N 极磁场下完全相反.

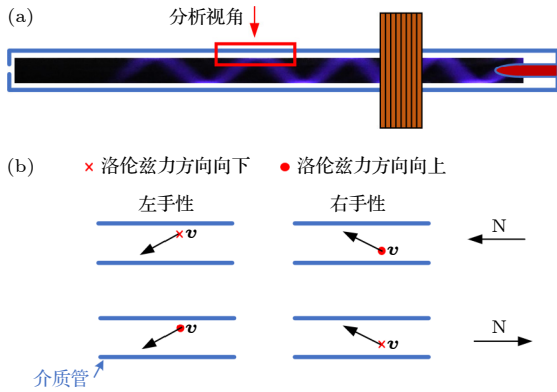


图 7 洛伦兹力磁场分量分析示意图

Fig. 7. Schematic diagram of the magnetic field force component of Lorentz force.

通过分析可以发现, HP 在外加磁场的作用下受力规律和伸缩规律具有一定的相似性. 进一步总结可以得出, 洛伦兹力的磁场分量指向石英介质管轴心时 HP 将会收缩, 而当其背离介质管轴心指向管外时, HP 将发生拉伸行为.

HP 的成因是讨论和研究洛伦兹力对 HP 收缩等行为调控机理的前提. 首先, 未施加磁场时, 等离子体为什么会沿着管壁发展而不是在气体中沿直线发展? 这是因为管壁在此处可以视为通过空气接地的杂散电容, 当等离子体的电子密度较高时, 将有大量电荷沉积在管的内表面, 管壁被完全充电, 最终显著地削弱径向电场, 导致等离子体直接在气体中发展; 当管壁电荷密度低时, 管壁没有完全充电, 因此径向电场强度较高, 等离子体更易沿着管壁发展. 此外, 由于外加磁场带来的洛伦兹力的磁场分量 $qv \times B$ 中的 $v \times B$ 与电场 E 的量纲

一样, 故定义外加磁场产生的伪电场 E' :

$$E' = v \times B. \quad (2)$$

可以认为, 当洛伦兹力的磁场分量指向管外时, E' 的方向也指向管外, 此时介质管上的沉积电荷增多, 径向电场强度被削弱, 等离子体更易转化为偏直线传播的模式, 因此在实验中观察到螺旋螺距增大的“拉伸”行为. 反之, 当洛伦兹力的磁场分量指向管内时, E' 的方向也指向管内, 介质管上的沉积电荷减少, 径向电场强度增强, 等离子体更易沿着管壁螺旋传播, 因此在实验中观察到螺旋螺距减小的“收缩”行为.

在无外加磁场时, 等离子体的螺旋传播行为表明除了轴向的电场, 还存在一个径向电场分量. 这也意味着阳极产生的外部电场可以解释为电场的轴向分量. 然而静电理论在此不足以解释径向电场的起源, 其需要进一步的分析 and 解释. 在这通过电磁波理论来讨论, 基于先前的工作可以得到介质管内壁上 ($r = 3 \text{ mm}$) 的径向电场强度可估算为^[18]

$$E_{\varphi 0} \approx \partial_t H_0 \approx \frac{i}{4\pi r \Delta t} = 4 \times 10^4 \text{ V/m}. \quad (3)$$

在前期工作中, 通过超高速增强型电荷耦合相机 (intensified charge coupled device, ICCD) 拍摄得到 HP 传播速度为 $0.5 \times 10^5 - 1.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ ^[20]. 取磁场强度为 100 mT, 得到外加磁场产生的伪电场 E' 强度约为 $1 \times 10^4 \text{ V/m}$, 这与导致等离子体螺旋发展的极向电场 ($4 \times 10^4 \text{ V/m}$) 在一个数量级. 因此外加磁场导致的洛伦兹力磁场分量完全足够影响 HP 的发展过程, 从而使得观察到等离子体在外加磁场下发生拉伸、收缩等行为.

而靠近高压电极端 (上游) 的等离子体, 并没有因为磁场的变化而发生明显变化. 这是由于上游管壁电荷沉积量比下游更多, 因此下游较上游更易受到磁场的影响而发生伸缩现象. 此外, 实验中还观察到了 HP 伸缩程度不均匀的现象: 通过 ImageJ 测量图 2 和图 3 的近磁场源的红点和远磁场源的红点随着磁场增强的位移量变化, 可知近磁场源的 HP 的伸缩程度略小于远磁场源的 HP 的伸缩程度. 尽管远磁场端的磁场强度较低, E' 强度更低, 但由于其远离高压电极端, 管壁电荷沉积较少, 对磁场产生的伪电场 E' 更加敏感, 最终导致实验中观察到的近磁场源 HP 的伸缩程度略小于远磁场源 HP 的现象.

正如第 3 节观察到的实验结果, 外加磁场除了影响 HP 的收缩、拉伸行为, 还会影响 HP 的手性和螺旋形态的清晰度. 这同样与外加磁场产生的径向洛伦兹力相关. HP 的手性变化和螺旋形态的清晰度实际上可认为是一个问题. 如图 5 所示, 在 0 mT 的初始情况下, 由于施加电压较高, 此时的径向电场已经比较弱了. 而随着磁场的增大, 洛伦兹力的磁场分量指向管外, 使管壁电荷沉积再次削弱了径向电场. 当磁场增至 80 mT 时, 可以观察到螺旋形态基本全部消失. 继续增大磁场后, 等离子体可能会转向直线发展形态, 或跳转手性后继续以螺旋形态传播. 而从实验结果中可知, 当磁场继续增大时, 等离子体反转了手性, 并且开始收缩. 通过分析可以得知, 手性反转后的洛伦兹力磁场分量是指向管内的, 这将使得管壁上沉积的电荷减少, 径向电场增强. 由上述分析可知, 径向电场增强会导致等离子体更倾向沿着管壁以螺旋形态传播, 其螺旋形态的清晰度也理应会增加. 这与本文实验现象吻合, 在图 5 中磁场为 160 mT 时, 此时的等离子体刚发生手性翻转, 而继续增大磁场到 200 mT 时, 等离子体的螺旋形态清晰度明显提升. 而相比于图 5 的情况, 图 2 和图 3 的径向电场较强, 洛伦兹力的磁场分量不至于使其发生手性的翻转.

5 总 结

本文介绍了外加磁场可以调控等离子体行为, 该等离子体在低气压、氮气环境下被激发并且沿规则的螺旋路径发展. 在外加磁场的作用下, HP 会发生拉伸、收缩等行为, 并且 HP 的手性和螺旋形态的清晰度也会发生改变. 通过对 HP 的特征进行分析, 计算得到介质管内壁的径向电场和带电粒子受到的磁场伪电场大小, 证明外加磁场导致的洛伦兹力磁场分量是导致 HP 行为被调控的原因.

总之, 通过调整外加磁场强度, 对 HP 的行为

有了更好的了解, 利于更深层次地理解电和磁这两种相互影响的电磁学概念. 然而许多问题仍未得到解答. 例如, 为什么外加磁场只对远离阳极的等离子体产生影响等. 这些问题对于 HP 的未来应用至关重要, 从而有助于其最终应用于材料加工、纳米技术、生物医疗中.

参考文献

- [1] Cheng H, Luo J, Song K, Zhao F, Liu D, Nie L, Lu X 2022 *Phys. Plasmas* **29** 063506
- [2] Luo J, Nie L, Liu D, Lu X 2022 *Plasma Processes Polym.* **19** e2200181
- [3] Guo D, Yu D, Zhang P, Song W, Zhang B, Peng K 2021 *Surf. Coat. Tech.* **415** 127129
- [4] Baniya H B, Guragain R P, Subedi D P 2021 *Progress in Adhesion and Adhesives* (Hoboken: Wiley Scrivener Publishing LLC) p841
- [5] Meyyappan M 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 174002
- [6] Morabit Y, Hasan M I, Whalley R D, Robert E, Modic M, Walsh J L 2021 *Eur. Phys. J. D* **75** 1
- [7] Lin L, Keidar M 2021 *Appl. Phys. Rev.* **8** 011306
- [8] Adhikari B C, Lamichhane P, Lim J S, Nguyen L N, Choi E H 2021 *Results Phys.* **30** 104863
- [9] Chen Z, Obenchain R, Wirz R E 2021 *Processes* **9** 249
- [10] Douat C, Escot Bocanegra P, Dozias S, Robert É, Motterlini R 2021 *Plasma Processes Polym.* **18** 2100069
- [11] Liu C, Hung C W, Cheng I C, Hsu C C, Cheng I C, Chen J Z 2021 *Polymers* **13** 3585
- [12] Park J Y, Kim G H, Kim J D, Koh H S, Lee D C 1998 *Combust. Sci. Technol.* **133** 65
- [13] Ferreira J L, Monteiro K M F P, Damasio H J, Kostov K G 1998 *Combust. Sci. Technol.* **140** 1
- [14] Moon J D, Lee G T, Chung S H 1999 *IEEE T. Ind. Appl.* **35** 1198
- [15] Pekárek S 2010 *Eur. Phys. J. D* **56** 91
- [16] Sternberg N, Godyak V, Hoffman D 2006 *Phys. Plasmas* **13** 063511
- [17] Kharzeev D E, Yee H U 2011 *Phys. Rev. D* **83** 1451
- [18] Zou D, Cao X, Lu X, Ostrikov K 2015 *Phys. Plasmas* **22** 103517
- [19] Nie L, Liu F, Zhou X, Lu X, Xian Y 2018 *Phys. Plasmas* **25** 053507
- [20] Liu F, Li J, Wu F, Nie L, Lu X 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 294003
- [21] Li L, Liang W, Yang L, Cao F, Sun K, Ban C, Cui J 2022 *Int. J. Metalcast.* **17** 399

Effect of external magnetic field on helix plasma plume*

Hu Yang^{1) #} Luo Jing-Yi^{2) #} Cai Yu-Yan¹⁾ Lu Xin-Pei^{2) †}

1) (*CETC Chips Technology Group Co., LTD, Chongqing 400060, China*)

2) (*School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 26 December 2022; revised manuscript received 5 May 2023)

Abstract

Electric phenomena and magnetic phenomena are inseparable. The magnetic field affects the ionization balance and spatial distribution of the plasma. A new type of plasma discharges has been found in nitrogen gas under sub atmospheric pressure condition without external magnetic field. Because of its regular helical propagation pattern, it is called helical plasma (HP) plume. Although a great deal of research has been carried out on the key characteristics of the HP plume, the formation mechanism of it remains unclear, which affects its applications in materials and nanotechnology.

By applying magnetic field to HP with different chirality, the regulation behavior of the external magnetic field on HP is studied. It is found that the external magnetic field will make the HP shrink or stretch. With the magnetic field intensity increasing from 0 mT to 200 mT, the left-handed HP plume stretches under the magnetic field of S-pole. Conversely, the left-handed chiral HP plume contracts when the magnetic pole changes to N-pole. However, when the chirality of HP plume is changed to being right-handed by adjusting voltage, phenomenon opposite to the previous one is observed. Moreover, the applied magnetic field also affects the divergence of HP. With the increase of S-pole external magnetic field, the HP plume stretches until the external magnetic field reaches to 80 mT. When the magnetic field intensity is 80 mT, the HP disappears. The plasma in the quartz tube appears in the divergent form. With the magnetic field intensity increasing to 160 mT, the plasma in the form of a helix appears again. Finally, in the process of changing the intensity of the magnetic field, the clarity of the HP plume will also change.

The radial electric field of HP is calculated by electromagnetic wave theory, and the mechanism of the influence of external magnetic field on the behavior of HP is clarified. It is found that the magnetic field force component of Lorentz force is responsible for the external magnetic field regulating the HP behavior. This study lays a theoretical foundation for understanding the motion behavior of HP, which is conducive to the practical applications in the field of materials and nanotechnology.

Keywords: atmosphere pressure plasma, plasma jet, nonequilibrium plasma, electrohydrodynamic

PACS: 05.70.-a, 36.40.Gk, 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: [10.7498/aps.72.20222442](https://doi.org/10.7498/aps.72.20222442)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFE0114700) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52130701, 51977096).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: luxinpei@hust.edu.cn



外加磁场对螺旋等离子体的影响

胡杨 罗婧怡 蔡雨烟 卢新培

Effect of external magnetic field on helix plasma plume

Hu Yang Luo Jing-Yi Cai Yu-Yan Lu Xin-Pei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 130501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222442

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222442>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气压氩气刷形等离子体羽的特性研究

Discharge characteristics of argon brush plasma plume operated at atmospheric pressure

物理学报. 2021, 70(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202091>

纵磁作用下真空电弧单阴极斑点等离子体射流三维混合模拟

Three-dimensional hybrid simulation of single cathode spot vacuum arc plasma jet under axial magnetic field

物理学报. 2021, 70(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201701>

大气压脉冲放电等离子体射流特性及机理研究

Discharge characteristics and mechanism of plasma plume generated by atmospheric pulsed discharge

物理学报. 2021, 70(9): 095202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202246>

激光等离子体射流驱动亚毫米直径铝飞片及姿态诊断

Laser-plasma jet driven sub-millimeter diameter aluminum flyer and its gesture diagnosis

物理学报. 2022, 71(9): 095201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212136>

大气压电晕等离子体射流制备氧化钛薄膜

Deposition of titanium oxide films by atmospheric pressure corona discharge plasma jet

物理学报. 2021, 70(9): 095205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202181>

屏蔽气体流速对同轴双管式氦气大气压等离子体射流粒子分布的影响

Effect of flow rate of shielding gas on distribution of particles in coaxial double-tube helium atmospheric pressure plasma jet

物理学报. 2022, 71(16): 165201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220421>