

专题: 低温等离子体非平衡输运与主动调控

# 低磁场峰螺旋波等离子体的波传播和功率耦合特性\*

罗苗健 苒磊<sup>†</sup> 马婧婧 阚子晨 张世杰 赵应鑫

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

(2026年2月2日收到; 2026年3月4日收到修改稿)

低磁场约束条件下的螺旋波电离机制具有复杂的波传播与功率耦合特性, 是领域内的研究热点和难点. 本文针对该问题, 以单环天线激发的氩气工质螺旋波等离子体为研究对象, 对低磁场条件下波传播及功率耦合特性进行系统数值研究. 本文在模拟中引入多参量驻波分析体系, 包括驻波比、波场幅值与相位分布、前向与反向波幅比、振幅反射系数与功率反射系数、负载电阻、径向功率沉积、累积功率分布、轴向波数功率谱等, 从空间-频谱-功率三个角度, 系统研究了螺旋波放电中由驻波向行波传播的连续演化过程. 数值结果表明: 在低磁场条件下, 轴向反射增强会导致显著的驻波结构, 功率在天线附近呈现局域化分布; 随着背景磁场的增大, 反射逐渐减弱, 驻波特征消失, 螺旋波传播状态过渡为行波传播的主导状态. 本文采用的不同表征量对上述演化过程表现出一致性, 为定量分析低磁场条件下螺旋波放电中的波传播和功率耦合, 以及低磁场峰螺旋波放电过程的数值研究与实验诊断提供了参考.

**关键词:** 螺旋波等离子体, 低磁场峰, 驻波比**DOI:** 10.7498/aps.75.20260190**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260190

## 1 引言

螺旋波等离子体因具有高密度、高电离效率和无电极结构等优点, 在电推进、等离子体材料处理和磁控反应器等领域得到了广泛关注和应用<sup>[1-7]</sup>. 在此类系统中, 低磁场峰 (low-field peak, LFP) 是一种重要的非线性特征, 表现为在较低背景磁场下电子密度随磁场增强出现 1—2 个峰值, 其形成机理长期以来备受关注<sup>[8,9]</sup>. 低磁场峰现象不仅直接影响等离子体的放电稳定性与能量利用效率, 而且与波传播模式、功率沉积机制及边界条件密切相关, 是理解低磁场螺旋波放电物理过程的关键问题之一. 早期研究普遍认为, LFP 主要源

于 TG (Trivelpiece-Gould) 波与 H(Helicon) 波之间的功率耦合以及由此导致的高效功率沉积<sup>[10-15]</sup>. Chen<sup>[16]</sup> 在氩气工质螺旋波放电中首次系统阐述了 LFP 现象, 随后多项工作从 Landau 阻尼、碰撞加热、驻波干涉和反射共振等角度对 LFP 机理进行了研究<sup>[16-22]</sup>. 从已有研究可以看出, 针对低磁场峰现象的分析主要可分为 3 类研究路径: 其一是基于等离子体参数与色散关系的分析, 重点讨论电子密度、磁场强度与螺旋波传播条件之间的对应关系; 其二是从具体加热机制出发, 分析 TG 波、螺旋波及其耦合模式在不同磁场区间内对功率沉积的贡献; 其三是结合实验诊断或数值模拟, 研究有限长度和边界条件对低磁场放电行为的影响<sup>[7-10,16-18,23]</sup>. 然而, 上述研究大多针对  $m = +1$  螺旋天线结构,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 92271113, 12411540222, 12481540165)、重庆市自然科学基金 (批准号: CSTB2025NSCQ-GPX0725) 和新奥能源研究院氢硼聚变研究基金 (批准号: 2025ENNHB01-011) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: leichang@cqu.edu.cn

其轴向波数受到天线几何尺寸的强约束,难以完全解释低磁场区内复杂的波模结构和功率分布特征<sup>[2-4,17-20]</sup>.此外,在较高磁场条件下,Chang等<sup>[24]</sup>通过数值模拟系统研究了蓝芯螺旋波等离子体形成前后波传播结构与功率沉积特性的演化过程.近年来,单环天线( $m=0$ )激发的螺旋波放电中相继观测到新的低磁场行为,在较低磁场(约10—20 G)附近出现第1个密度峰,在中等磁场(约30—50 G)又形成第2个峰值<sup>[23-30]</sup>.此外在理论研究方面也有工作从功率沉积角度对低磁场峰相关物理过程进行了分析,例如,李文秋等<sup>[31]</sup>基于低温等离子体动理学效应和电子温度各向异性假设,研究了低磁场、低气压条件下TG波的色散特性及其功率沉积行为;在实验研究方面,牛晨等<sup>[32]</sup>在低磁场螺旋波等离子体源中,利用功率-电流特性、增强型电荷耦合相机(ICCD)以及磁探针诊断,对源区波传播特性进行了研究.

尽管上述研究从不同角度分析了低磁场条件下的相关物理过程,但是,现有工作和相关研究主要集中于等离子体密度与色散关系层面的分析,缺乏对驻波形成、功率局域化以及行波传播之间内在联系的系统阐述,且对低磁场条件下波传播状态由驻波向行波的连续演化机制缺乏系统的空间场分布分析与定量验证.为此,本文以氩气工质螺旋波等离子体为研究对象,基于HELIC程序,对单环天线激发的LFP进行系统数值研究<sup>[9,11,14,20-22,33]</sup>.本文通过引入驻波比(standing wave ratio, SWR)、波场幅值与相位分布、前向与反向波幅比、振幅反射系数与功率反射系数、负载电阻、径向功率沉积、累积功率分布与轴向波数功率谱等多参量分析手段,从空间-频谱-功率三个角度,系统表明了螺旋波放电中由驻波向行波传播的连续演化过程.本文的主要创新在于:1)通过引入多参量驻波分析方法,对单环天线螺旋波等离子体低磁场区驻波向行波转变过程进行了定量分析,并验证了不同表征参量之间的一致性;2)从空间分布、波数谱和功率沉积三个角度,将波场空间分布、频谱特性与功率演化统一起来,对低磁场峰螺旋波的波传播和功率耦合特性进行了系统数值分析;3)提出的SWR、相位突变、反射波幅比等参量,可通过双探针阵列或B-dot探针等<sup>[23]</sup>进行实验测量验证.与已有工作相比,本研究更聚焦于驻波-行波演化过程的多参量分析方法及其一致性分析,为后续相关的低磁

场峰数值定量研究与实验诊断提供参考.

## 2 模型与参数

为了对低磁场条件下螺旋波等离子体中的波传播及功率耦合特性进行定量分析,本文在冷等离子体近似条件下,从麦克斯韦方程组出发,建立用于数值计算的控制方程,并结合HELIC程序对相关物理过程进行求解<sup>[5,8]</sup>,从而得到不同背景磁场条件下波场结构与功率沉积特性的演化规律,下面将依次给出控制方程、物理假设及参数设置.

### 2.1 控制方程

等离子体中的波动电磁场满足经典麦克斯韦方程组,其时域形式如下<sup>[5,8]</sup>:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \varepsilon_0. \quad (3)$$

在频域下,有

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B}, \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} - i\omega \mu_0 \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (5)$$

其中, $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{B}$ 分别为波电场与波磁场, $\mathbf{J}$ 为电流密度, $\rho$ 为电荷密度, $\mu_0$ 为真空磁导率( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m), $\varepsilon_0$ 为真空介电常数( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m), $t$ 为时间.

在本文所考虑的参数范围内,电子热运动对波传播的影响相对较弱,因此采用冷等离子体近似来描述等离子体的介电响应.在该近似条件下,等离子体的介电张量可表示为<sup>[8,16]</sup>

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$S = 1 - \frac{\omega_p^2 (\omega + iv)}{(\omega + iv)^2 - \omega_c^2}, \quad D = \frac{\omega_c \omega_p^2}{(\omega + iv)^2 - \omega_c^2},$$

$$P = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + iv)}, \quad (7)$$

其中, $S$ ,  $D$ ,  $P$ 为介电张量的3个基本参数; $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \varepsilon_0 m_e}$ 为等离子体频率; $\omega_c = eB_0 / m_e$ 为电子回旋频率; $\nu$ 为电子碰撞频率; $n_e$ 为电子密度; $B_0$ 为背景静磁场强度; $e$ 为电子电荷量; $m_e$ 为电子质量.

将频域形式的麦克斯韦方程与冷等离子体介电张量联立或耦合, 可得到描述螺旋波传播的电磁波动方程. 进一步假设电磁场满足如下的谐波形式 [16,21,22]:

$$E(r, \theta, z, t) = E(r)e^{i(m\theta + k_z z - \omega t)}, \quad (8)$$

进而得到圆柱坐标下的耦合波动方程如下 [21,22]:

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rE_z) \right) + \left( k_0^2 S - k_z^2 \frac{S^2 - D^2}{S} \right) E_z = 0, \quad (9)$$

$$E_r = \frac{ik_z}{k_0^2 S - k_z^2} \frac{dE_z}{dr}, \quad (10)$$

$$E_\theta = \frac{D}{S} E_r + \frac{im}{r} \frac{k_z}{k_0^2 S - k_z^2} E_z, \quad (11)$$

其中,  $E_r, E_\theta, E_z$  分别为电场圆柱坐标下的 3 个分量;  $r, \theta, z$  为圆柱坐标 (径向、方位角、轴向);  $m$  为方向模式数;  $k_0 = \omega/c$  为真空波数;  $k_z$  为轴向波数.

为定量描述低磁场条件下螺旋波放电中出现的驻波结构, 在有限长度等离子体系统中, 利用轴向波磁场表示为前向波与反射波的叠加形式 [22]:

$$B_z(z) = B_f e^{ik_z z} + B_b e^{-ik_z z}, \quad (12)$$

$$\text{SWR} = \frac{|B_f| + |B_b|}{|B_f| - |B_b|} = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}, \quad (13)$$

其中,  $|B_f|$  为沿轴向传播的前向波幅度;  $|B_b|$  为由轴向边界反射产生的反射波幅度; SWR 为驻波比, 用于衡量反射强度与共振程度;  $B_{\max}$  为磁场轴向分量的最大值;  $B_{\min}$  为磁场轴向分量的最小值.

为进一步分析功率沉积在放电截面内的径向分布特征, 引入累积功率径向分布, 其定义为径向功率密度在柱坐标下面积加权积分并归一化后的结果, 即:

$$P_t(r) = \int_0^r P_r(r') r' dr' / \int_0^a P_r(r') r' dr', \quad (14)$$

$$P_t(0) = 0, P_t(a) = 1, \quad (15)$$

其中, 某个  $r$  处的斜率  $dP_t/dr$  越大, 说明局部功率

贡献越大, 即局部功率沉积强度越高; 曲线越“靠右、越陡”, 说明功率越集中在外层; 曲线“向左抬起、提前上升”, 说明更多功率积累在内侧.

## 2.2 参数设置

本文采用 HELIC 电磁场求解程序对上述物理模型进行数值计算. 计算区域的几何结构如图 1 所示, 其布局参考了典型的线性螺旋波等离子体装置结构, 天线沿轴向放置于  $z = 0$  位置, 用于激发轴对称的  $m = 0$  螺旋波模式, 模拟区域沿轴向划分为源区 (source) 和扩散区 (diffusion), 其中源区长度为 45 cm, 扩散区长度为 55 cm, 总轴向长度为 100 cm; 在径向方向上, 等离子体半径取为 3 cm, 天线外半径为 3.5 cm, 腔体半径设为 4.5 cm, 等离子体被限制在金属腔体内部传播, 腔体壁被视为理想导体, 用以反映有限边界条件对波传播和反射行为的影响, 上述参数均来自于相关实验测量结果 [23], 以确保数值模拟结果具有实验可比性, 模拟区域具体参数设置如表 1 所列. 在此基础上, HELIC 程序通过求解频域形式的麦克斯韦方程组, 结合冷等离子体介电响应模型, 对不同背景磁场条件下螺旋波的传播特性和功率沉积行为进行计算. 此外, 为分析波场的空间分布特征, 本文在

表 1 HELIC 程序中参数设置

Table 1. Parameters settings in the HELIC simulation.

参数名称	参数值
等离子体半径 $R_a$ /cm	3
天线半径 $R_b$ /cm	3.5
腔体半径 $R_c$ /cm	4.5
离子种类	Ar
射频频率/MHz	13.56
等离子体密度 $n_{e0}$ /cm <sup>-3</sup>	$6 \times 10^{11}$
背景压强 $p_{g0}$ /mTorr	4
电子温度 $T_{e0}$ /eV	4
步长 $N$	99

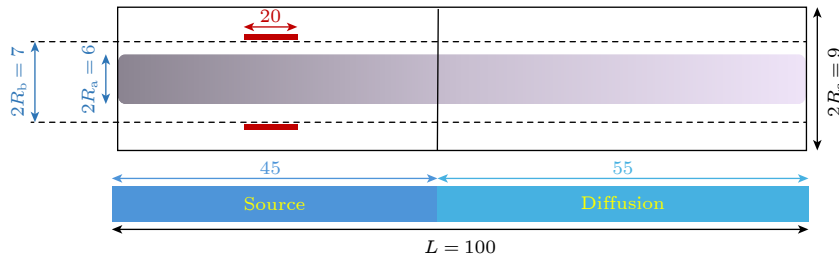


图 1 计算区域及几何参数示意图

Fig. 1. Schematic of the computational domain and geometric parameters.

扩散区内设置了数据采样位置,用于提取磁场幅值和相位随轴向变化的分布信息,从而为后续驻波比、反射系数以及相位演化等多参量分析提供数据基础。

### 3 结果与讨论

在上述模型与参数设置的基础上,本文利用HELIC程序对单环天线激发的氩气工质螺旋波等离子体在不同背景磁场条件下的波场结构与功率耦合特性进行了系统数值研究,重点研究低磁场区域内驻波向行波传播的连续演化过程,并通过多参量分析对该演化过程进行验证,具体包括波场空间分布、相位演化、驻波比、前向与反射波幅度对比、负载电阻演化以及功率沉积径向分布等方面.考虑到螺旋波传播特性的演化过程主要集中在天线附近区域,同时避免轴向边界条件对结果的影响,本文重点分析 $|z| \leq 15$  cm区域内的结果。

#### 3.1 波场空间结构与相位演化

为了研究波磁场的空间结构特征,在不同背景磁场的条件下,对典型磁场幅值轴向分量 $|B_z|$ 和磁场幅值径向分量 $|B_r|$ 均进行了归一化处理,使不同工况下的峰值统一为1,模拟得到的波磁场轴向分布如图2所示.对于 $m=0$ 模式,径向分量 $|B_r|$ 和角向分量 $|B_\theta|$ 分布相同[24],故只展示 $|B_r|$ 。

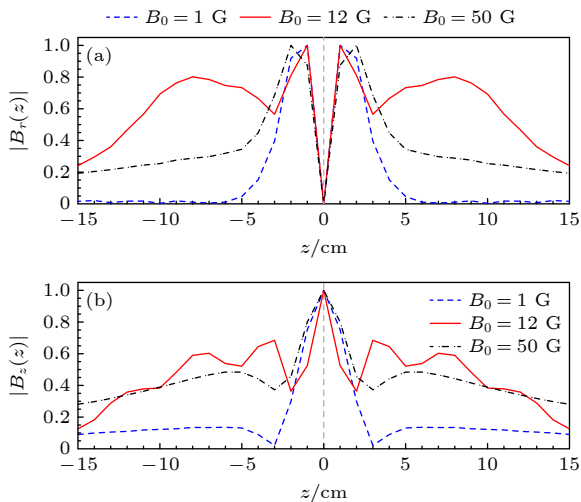


图2 不同背景磁场下归一化磁场幅值径向分量(a)和轴向分量(b)沿轴向的分布

Fig. 2. Distribution of the normalized axial (a) and radial (b) magnetic field amplitude components along the axial direction under different background magnetic fields.

由图2可知,轴向磁场幅值和径向磁场幅值随背景磁场的变化呈现出显著差异,且呈现出对称的空间分布.当 $B_0 = 1$  G时,磁场幅值沿轴向和径向均较弱,沿 $z$ 方向几乎无明显振荡;当 $B_0 = 12$  G时,出现明显的波节与波腹结构,轴向磁场幅值呈现周期性起伏的空间分布特征;当 $B_0 = 50$  G时,波形振荡逐渐减弱,包络逐渐趋于平滑。

为了更加清晰地说明波传播特性,本文进一步研究了波磁场相位空间分布特性,典型背景磁场下径向和轴向波磁场相位分量 $\phi_B(z)$ 的变化曲线如图3所示.其中,相位定义为 $\phi_B(z) = \arg|B(z)|$ ,取值范围为 $(-180^\circ, 180^\circ]$ .由图3可知,当 $B_0 = 12$  G时,轴向磁场和径向磁场沿轴线的相位在节点处发生约 $180^\circ$ 的突变,表现出典型的驻波特征;当 $B_0 = 36$  G时,相位变化趋于单调,驻波的波腹和波节逐渐消失;当 $B_0 = 50$  G时,相位沿 $z$ 方向平滑连续变化,表明波动已转变为行波主导。

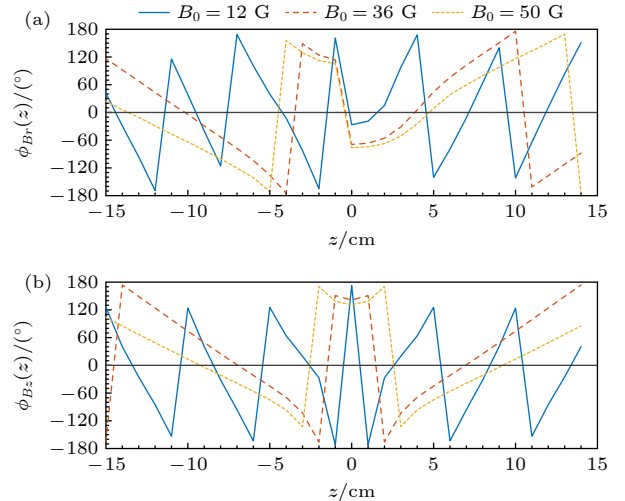


图3 不同背景磁场下(a)径向和(b)轴向波磁场相位分量的空间分布

Fig. 3. Spatial distributions of the phase components of the (a) radial and (b) axial wave magnetic fields under different background magnetic fields.

进一步,研究波电场的空间分布特征,如图4所示.在低磁场条件下,电场幅值沿轴向整体较弱,几乎无明显周期性振荡;当磁场增强时,波电场沿轴向出现清晰的波节与波腹结构;随着背景磁场进一步增大,电场振荡逐渐减弱,场幅值包络趋于平滑连续,相位沿 $z$ 方向趋于单调连续变化.波电场的空间分布特征与波磁场的空间分布特征基本保持一致。

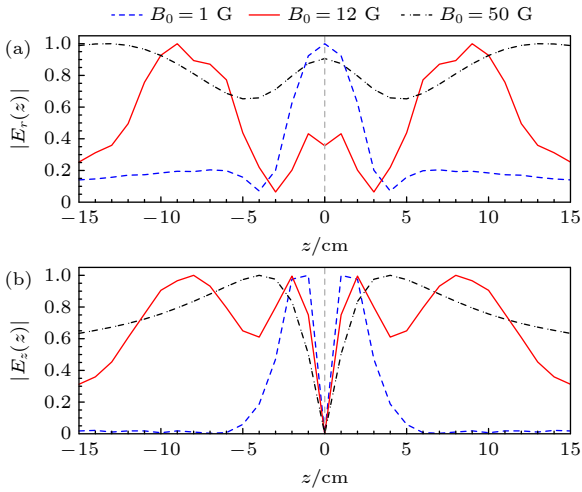


图 4 不同背景磁场下归一化电场幅值径向分量 (a) 和轴向分量 (b) 沿轴向的分布

Fig. 4. Distribution of the normalized axial (a) and radial (b) electric field amplitude components along the axial direction under different background magnetic fields.

类似地, 研究波电场相位的空间分布特征, 如图 5 所示. 可以看出, 在低磁场条件下, 电场相位沿轴向在波节附近发生明显突变, 表现出典型的驻波特征; 随着磁场增强, 相位突变逐渐减弱, 电场相位分布趋于平滑, 螺旋波传播状态进入驻波与行波共存的过渡状态; 当磁场进一步增大时, 电场相位沿轴向呈现单调连续变化, 基本不再出现突变, 表明波动已转变为行波传播主导状态. 上述变化趋势表明, 波在轴向传播过程中包含反射分量, 证明了驻波存在, 随着磁场增强, 螺旋波传播状态逐步演化为行波传播.

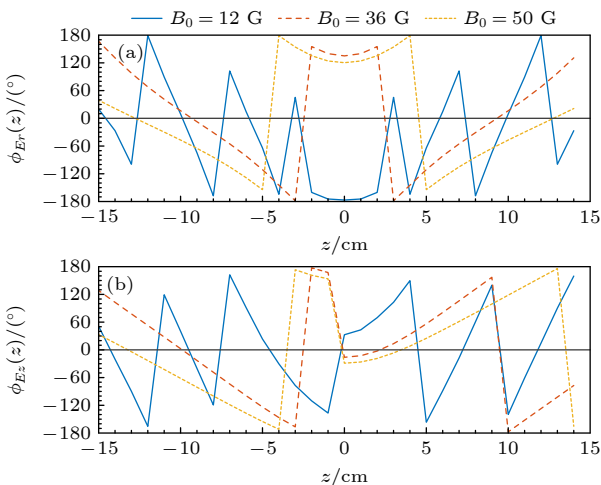


图 5 不同背景磁场下 (a) 径向和 (b) 轴向波电场相位分量的空间分布

Fig. 5. Spatial distributions of the phase components of the (a) radial and (b) axial wave electric fields under different background magnetic fields.

本文数值结果与近期关于单环天线低磁场峰现象的实验研究结果具有一致性. 文献 [23] 在单环天线氩气螺旋波等离子体实验中, 通过 B-dot 探针测量发现, 在第一低磁场峰附近 (约 10—20 G) 波场存在明显驻波成分, 相位在节点处发生突变, 而在较高磁场区 (约 36—50 G) 相位沿轴向连续变化, 表现为行波传播特征. 本文数值结果同样显示, 在低磁场条件下轴向磁场相位分量呈现波节结构且相位发生突变, 而随磁场增强相位演化趋于单调连续, 驻波结构逐渐消失, 传播状态过渡为行波主导. 这表明本文提出的多参量驻波分析方法能够较好地再现实验中观测到的波传播演化特征.

### 3.2 驻波与反射特性的多参量分析

为了对低磁场条件下的驻波特性进行定量分析, 本文基于前向波与反射波的分解模型, 并结合 SWR 的定义, 对不同背景磁场条件下的波传播状态进行计算分析. 当磁场  $B_0$  分别为 12, 14, 16, 36, 42, 50 G 时, SWR 值分别为 8.0, 3.0, 2.7, 3.4, 3.5, 3.6, 其随背景磁场变化的规律曲线如图 6 所示.

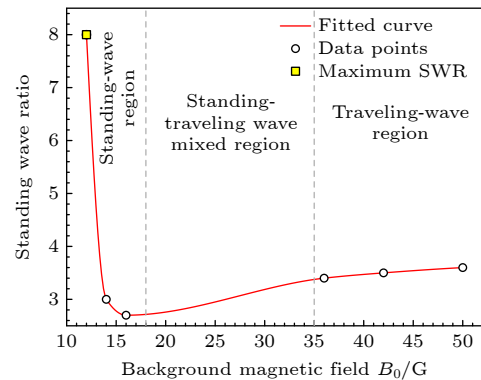


图 6 驻波比随背景磁场的变化

Fig. 6. Variation of standing wave ratio (SWR) with background magnetic field.

由图 6 可知: 在较低磁场时, SWR 达到最大值, 表明低磁场时反射波显著增强, 螺旋波传播状态处于驻波共振状态; 随着磁场增强, 驻波结构逐渐减弱, 螺旋波传播状态进入驻波-行波共存区; 在较高磁场时, SWR 趋于稳定, 说明螺旋波传播状态转为行波主导, 这与相位分量随磁场变化的规律完全一致.

在 SWR 分析的基础上, 本文进一步比较不同磁场条件下前向波与反向波幅度的变化特征, 其归一化结果如图 7 所示. 可以看出, 归一化后, 前向

波幅度  $|B_f| \approx 1$ , 基本保持不变, 而反向波幅度  $|B_b|$  随磁场增强显著下降. 在较低磁场区, 反向波幅值接近前向波幅值; 随着磁场增大,  $|B_b|$  迅速减小; 在较高磁场区, 反向波幅度趋于稳定, 并保持较低水平.

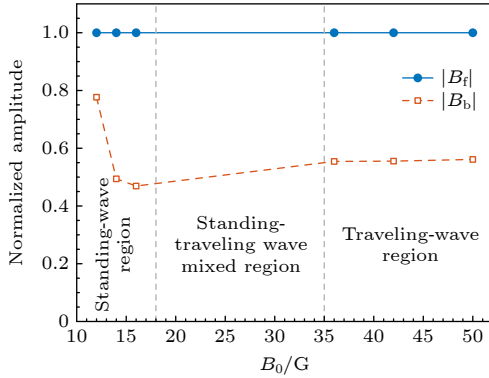


图 7 不同磁场下前向波与反向波幅度的对比曲线  
Fig. 7. Comparison of forward and reflected wave amplitudes under different magnetic fields.

为了进一步定量说明不同磁场条件下的波反射特性, 引入反射系数的概念, 反射系数的定义遵循电磁波反射的标准处理方法, 在等离子体波传播研究中被广泛采用<sup>[22]</sup>, 所以, 将振幅反射系数定义为  $\Gamma_A = |B_b|/|B_f|$ , 将功率反射系数定义为  $\Gamma_P = (|B_b|/|B_f|)^2$ . 图 8 给出了振幅反射系数和功率反射系数随背景磁场的变化. 从图 8 可以看到, 在低磁场条件下,  $\Gamma_A$  与  $\Gamma_P$  均保持较高数值; 随着磁场强度的增大, 反射系数迅速降低, 并趋于相对稳定. 这一反射系数的变化趋势与图 7 中前向波和反向波幅度的演化一致, 同时也与驻波区和行波区的划分相对应.

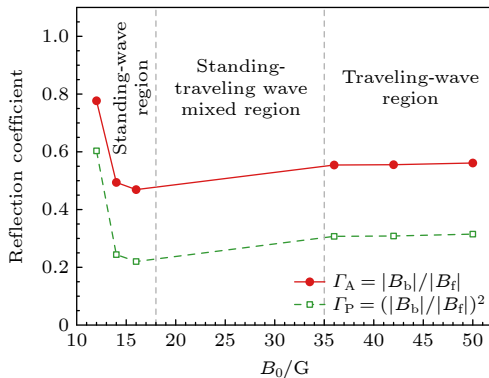


图 8 振幅反射系数和功率反射系数随背景磁场的变化  
Fig. 8. Variation of the amplitude reflection coefficient and the power reflection coefficient with the background magnetic field.

上述结果从驻波比与反射系数角度定量分析了不同磁场条件下轴向反射强度的变化, 为后续从相位梯度角度进行一致性验证提供了依据.

### 3.3 有效轴向波数分析与一致性验证

在反射系数分析的基础上, 引入由相位梯度提取的局部有效轴向波数  $k_z(z)$ , 且定义为  $k_z(z) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_B(z)}{dz}$ , 其中  $\phi_B(z)$  表示波磁场相位沿轴向的空间分布. 图 9 给出了由磁场相位梯度提取的局部有效轴向波数的分布情况, 其中图 9(a), (b) 分别对应由径向磁场相位分量  $\phi_{Br}(z)$  和轴向磁场相位分量  $\phi_{Bz}(z)$  得到的结果. 可以看到, 在低磁场条件下,  $k_z(z)$  在天线附近表现出明显的空间起伏及正负交替特征; 随着背景磁场强度的增大,  $k_z(z)$  的空间分布逐渐趋于平滑, 其符号正负和幅值在轴向方向上更加稳定. 由此可知, 局部有效轴向波数的变化结果从相位梯度角度为上述驻波比和反射系数分析提供了进一步的定量验证.

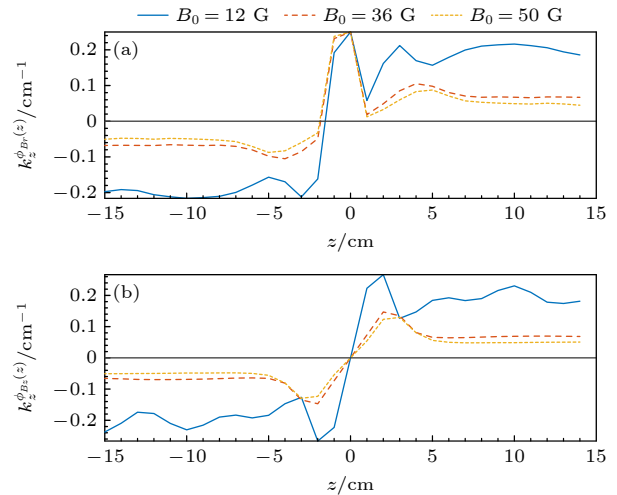


图 9 由 (a) 径向和 (b) 轴向磁场相位分量得到的局部有效轴向波数分布曲线  
Fig. 9. Local effective axial wavenumber distributions obtained from the (a) radial and (b) axial magnetic field phase component.

为了验证不同表征参量对波传播状态的一致性, 图 10 对驻波比 SWR、振幅反射系数  $\Gamma_A$  以及由相位梯度提取的局部有效轴向波数绝对值的平均值  $\langle |k_z(z)| \rangle$  进行归一化. 通过对比可以看到, 在低磁场条件下, 3 种参量均表现出较高的归一化数值, 表明反射增强、相位梯度剧烈以及驻波显著, 所以螺旋波传播状态为驻波主导; 随着背景磁场强

度的增大, SWR 与  $\Gamma_A$  快速下降并保持在较低水平, 而  $\langle |k_z(z)| \rangle$  也随之显著减小, 此时行波特征逐渐占据主导.

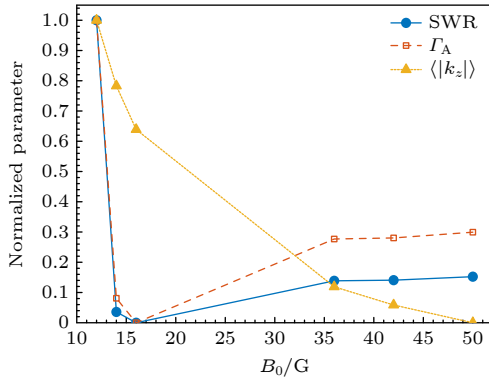


图 10 不同表征参量的一致性验证

Fig. 10. Consistency verification among different representation parameters.

尽管 SWR、振幅反射系数以及由相位梯度提取的局部有效轴向波数来源于不同的数学定义和物理表达方式, 但三者物理内涵上具有一致性. SWR 和反射系数直接描述了前向波与反向波幅度之比, 反映了轴向反射强度的变化; 而有效轴向波数的空间起伏与正负交替特征, 则从相位演化角度解释了前向与反向波的叠加程度. 当磁场较低时, 轴向反射增强, 反向波占比上升, 表现为较大的 SWR、较高的反射系数以及显著的波数起伏; 随着磁场增强, 反射减弱, 行波成分占比提高, 各参量同步下降并趋于平滑. 因此, 上述的多参量分析对波传播状态的演化进行了不同角度的刻画.

### 3.4 功率耦合与沉积特性的空间与谱分析

本文为进一步从负载电阻角度分析等离子体功率耦合随背景磁场的演化过程, 给出了固定等离子体密度条件下, 负载电阻随不同背景磁场的变化关系, 如图 11 所示.

由图 11 可知, 负载电阻随磁场增强单调上升并逐渐趋于饱和, 表明天线与等离子体之间的电磁耦合逐步增强, 且天线-等离子体负载也随磁场增强而增强, 并进入稳定区间. 在低磁场时, 增幅最大, 反映螺旋波传播状态对磁场敏感; 随着磁场增大, 曲线出现拐点, 增长速率下降, 进入负载过渡区; 进一步增大磁场, 负载电阻接近水平, 表明进入稳定负载阶段. 该趋势与上述驻波反射逐渐减弱、螺旋波传播状态由驻波共振向行波传播主导的演化规律一致.

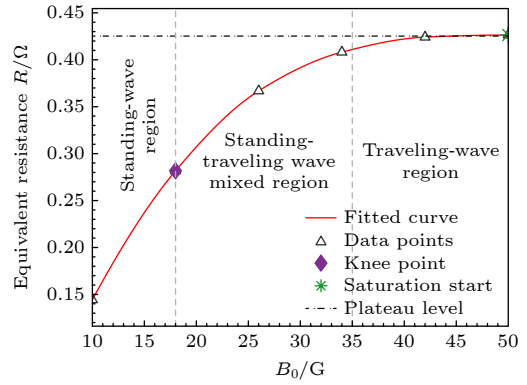


图 11 固定等离子体密度下载电电阻随背景磁场的变化

Fig. 11. Variation of the load resistance with background magnetic field at a fixed plasma density.

为了进一步研究功率沿轴向的空间分布规律, 本文在固定等离子体密度条件下, 对不同背景磁场对应的轴向功率特性进行分析. 通过对数值计算结果进行归一化处理, 得到了轴向功率密度的空间分布情况. 对应的归一化轴向功率密度二维等高线分布如图 12 所示.

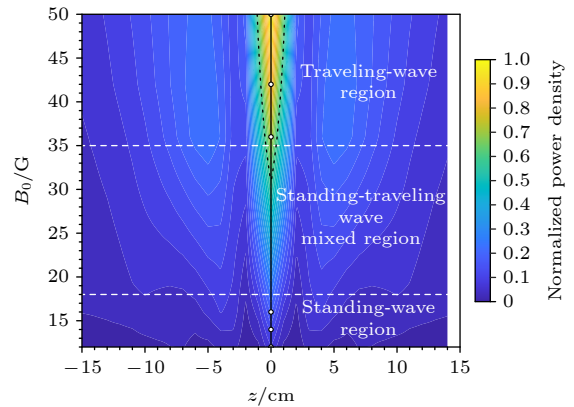


图 12 归一化轴向功率密度分布的二维等高线图

Fig. 12. Two-dimensional contour map of the normalized axial power density distribution.

在图 12 中提取每个相同磁场下的轴向功率峰位置  $Z_{peak}$ , 并以归一化轴向功率密度  $P_2 > 0.6$  作为高功率区绘制高功率等高线. 由图 12 所示, 主功率峰始终锁定在天线中心附近, 高功率区域的轴向长度随磁场显著变化. 在较低磁场时, 功率密度主要集中在天线中心两侧, 形成对称的功率积聚区, 表明波场具有显著的驻波特征; 随着磁场增强, 高功率区沿  $z$  轴方向逐渐“下移”, 表示功率沿轴向传播, 驻波特征减弱, 行波特征增强; 当磁场进一步增大时, 功率继续沿轴向传播, 功率分布由双峰逐渐演化为单峰, 表明波场转变为行波主导. 这一

变化趋势进一步表明, 磁场增强导致螺旋波传播状态从驻波共振向行波传播转变, 说明磁场增强会削弱反射耦合并促进功率沿轴向传播.

然而, 仅从轴向分布仍难以全面反映功率在放电截面内的沉积特性. 因此, 为了进一步研究径向上的功率传播, 在电子密度  $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  的情况下, 分别计算典型磁场 ( $B_0 = 1 \text{ G}$ ,  $B_0 = 16 \text{ G}$ ,  $B_0 = 50 \text{ G}$ ) 所对应的结果, 进而得到不同磁场下功率密度径向分布  $P_r(r)$  和累积功率径向分布  $P_t(r)$  的变化情况 (均是归一化后的数据), 如图 13 所示.

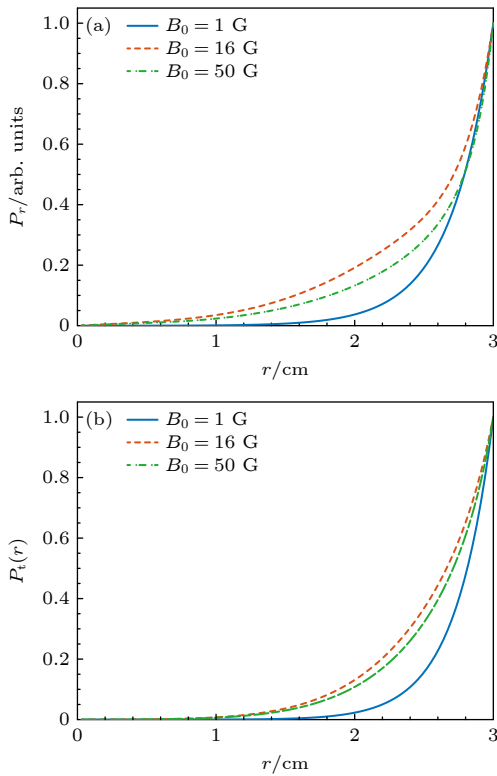


图 13 不同磁场下功率沉积径向分布 (a) 功率密度径向分布; (b) 累积功率径向分布  
Fig. 13. Radial distributions of power deposition under different magnetic fields: (a) Radial power density distribution; (b) radial cumulative power distribution.

从图 13 可以看出: 当  $B_0 = 1 \text{ G}$  时, 功率主要集中在边缘区域, 中心功率几乎为零, 此时功率沉积主要分布于放电外层; 当  $B_0 = 16 \text{ G}$  时, 功率开始向轴心转移, 表明参与功率沉积的波模成分发生变化, 轴心区域的功率贡献显著增强; 当  $B_0 = 50 \text{ G}$  时, 径向功率密度曲线和累积功率曲线均明显高于低磁场条件, 说明中心区域的功率沉积仍然占据重要地位, 径向功率分布趋于稳定, 图 13(a) 功率密度径向分布的变化趋势与文献 [23] 结果一致. 该结果表明, 随着背景磁场的增强, 功率沉积整体呈现

出由外层向内层转移的趋势.

在上述轴向与径向功率分布分析的基础上, 本文为了从频谱角度分析不同磁场条件下的功率吸收机制, 分别计算典型磁场 ( $B_0 = 1 \text{ G}$ ,  $B_0 = 16 \text{ G}$ ,  $B_0 = 50 \text{ G}$ ) 所对应的结果, 并对吸收功率进行归一化处理, 进而得到不同磁场下归一化吸收功率随轴向波数  $k_z$  的分布如图 14 所示.

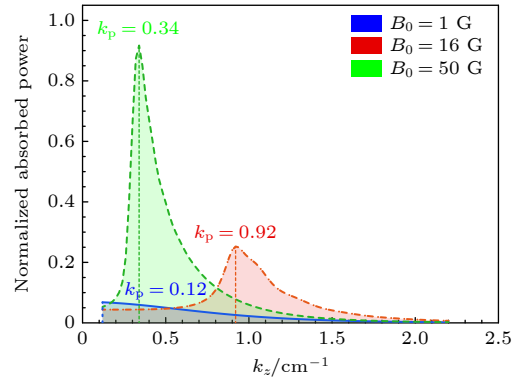


图 14 不同磁场下等离子体吸收功率随轴向波数  $k_z$  的分布  
Fig. 14. Distribution of plasma absorbed power versus axial wavenumber under different magnetic fields.

图 14 反映了波功率在波数空间的选择性吸收特征. 当  $B_0 = 1 \text{ G}$  时, 吸收功率谱较为平缓, 功率在宽广的  $k_z$  区间分布, 说明此时波功率未集中于特定轴向波数范围, 轴向传播特性不具明显选择性; 当  $B_0 = 16 \text{ G}$  时, 功率谱在形成明显峰值, 吸收功率在峰值附近显著增强, 表明不同波模分量在该磁场条件下形成较强的功率耦合区; 当  $B_0 = 50 \text{ G}$  时, 峰值位置向低波数移动, 谱宽变窄, 表明功率在波数空间的分布趋于集中. 此外, 本文得到的轴向波数随磁场增强而减小的趋势与文献 [23] 的研究具有一致性. 文献 [23] 基于实验测量与色散关系计算指出, 单环天线条件下轴向波数随背景磁场增加逐渐减小, 并对应第 2 低磁场峰的形成. 图 14 所示的功率谱峰向低波数移动的结果, 与文献 [23] 中的实验与理论分析趋势一致, 从频谱角度进一步验证了数值模型的合理性.

图 2—图 12 表明了驻波向行波的转变过程, 图 13 补充了径向上的功率传播路径, 表明了波功率在放电截面内呈现出差异化的空间分布特征. 结合图 2—图 12 可知, 驻波结构的形成与相位突变共同导致功率在天线区积聚. 图 13 从径向角度进一步印证了这一结论, 即低磁场下功率主要分布于边缘; 而随着磁场增强, 功率向轴心集中. 与此

同时, 图 14 的波数谱结果与空间分布特性密切相关, 与图 2—图 5 中所对应的驻波较为显著的磁场区间内, 吸收功率在波数空间呈现出更明显的集中趋势; 与图 6—图 10 中的相位突变特征逐渐减弱的区间内, 波数吸收分布也发生相应变化; 并与图 11—图 13 所反映的反射减弱及功率由边缘向中心转移的趋势保持一致。

## 4 结 论

低磁场约束条件下, 螺旋波等离子体中的电离过程伴随着复杂的波传播与功率耦合机制, 是当前螺旋波放电研究中的重要问题之一. 本文基于 HELIC 程序, 对单环天线激发的氩气工质螺旋波等离子体在低磁场条件下的波场结构与功率分布特征进行系统的数值研究, 重点分析了不同磁场条件下波传播及功率耦合特性. 主要结论如下:

1) 在低磁场条件下, 轴向反射增强会导致显著的驻波结构形成, 功率在天线附近呈现局域化分布特征; 随着背景磁场的增大, 反射逐渐减弱, 驻波特征消失, 螺旋波传播特性过渡为以行波传播为主导的波传播状态.

2) 驻波比、波场幅值与相位分布、前向与反向波幅比、反射系数以及有效轴向波数等多参量分析结果的一致性分析, 验证了螺旋波传播状态由驻波主导区、驻波-行波共存区到行波主导区的连续演化过程.

3) 功率耦合与沉积分析表明, 随磁场增强, 天线-等离子体耦合能力提高, 功率沿轴向传播能力增强, 径向功率沉积由放电外层逐步向轴心区域迁移.

4) 轴向波数功率谱结果表明, 在不同磁场条件下, 等离子体对轴向波数的功率吸收表现出明显差异: 低磁场条件下功率分布较为分散, 中等磁场区间出现明显的谱峰特征, 而在较高磁场条件下, 功率吸收逐渐向低波数区域集中, 反映了波传播特性的变化趋势.

综上所述, 低磁场条件下螺旋波放电中的波传播及功率耦合特性可通过多参量分析方法进行统一分析, 本文研究结果为解释低磁场条件下螺旋波放电中的波传播与功率耦合特性提供了数值支撑, 并可为后续数值分析与实验诊断提供参考.

在后续工作中, 本文的数值模拟结果将结合螺旋波等离子体实验进行验证, 相关实验计划在 LEAD

装置上开展, 并将重点对低磁场条件下的波传播特性、驻波结构及功率沉积行为进行定量对比分析, 从而进一步验证多参量分析方法的适用性.

## 参考文献

- [1] Ellingboe R A, Boswell R W 1996 *Phys. Plasmas* **3** 2797
- [2] Degeling W A, Mikhelson N, Boswell R W, Sadeghi N 1998 *Phys. Plasmas* **5** 572
- [3] Kaepelin V, Carrere M, Faure B 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 4377
- [4] Franck C M, Grulke O, Klinger T 2003 *Phys. Plasmas* **10** 323
- [5] Chen F F, Boswell R W 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 1245
- [6] Shamrai K P, Taranov V B 1996 *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** 474
- [7] Mouzouris Y, Scharer J E 1998 *Phys. Plasmas* **5** 4253
- [8] Chen F F 1996 *Phys. Plasmas* **3** 1783
- [9] Piotrowicz P A, Caneses J F, Showers M A, et al. 2018 *Phys. Plasmas* **25** 052101
- [10] Shinohara S, Shamrai K P 2002 *Thin Solid Films* **407** 215
- [11] Franck C M, Grulke O, Stark A, Klinger T, Scime E E, Bonhomme G 2005 *Plasma Sources Sci. Technol.* **14** 226
- [12] Tarey D R, Sahu B B, Ganguli A 2012 *Phys. Plasmas* **19** 073520
- [13] Chen F F 1991 *Plasma Phys. Control. Fusion* **33** 339
- [14] Sato G, Oohara W, Hatakeyama R 2007 *Plasma Sources Sci. Technol.* **16** 734
- [15] Shinohara S, Shinohara K P, Shiramai K P 2000 *Plasma Phys. Control. Fusion* **42** 865
- [16] Chen F F 1992 *J. Vac. Sci. Technol. A* **10** 1389
- [17] Zhu G H, Li Q, Zheng J S, et al. 2021 *Plasma Sources Sci. Technol.* **30** 075015
- [18] Degeling A W, Jung C O, Boswell R W, Ellingboe A R 1996 *Phys. Plasmas* **3** 2788
- [19] Carter C, Khaichan J 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 432
- [20] Cho S 2006 *Phys. Plasmas* **13** 033504
- [21] Chen F F 2003 *Phys. Plasmas* **10** 2586
- [22] Chen F F, Arnush D 1997 *Phys. Plasmas* **4** 3411
- [23] Xia Z Y, Zhang T L, Cui Y, Zheng B C, Ouyang J T 2024 *Phys. Plasmas* **31** 083504
- [24] Chang L, Caneses J F, Thakur S C 2022 *Front. Phys.* **10** 1009563
- [25] Zhu W Y, Cui R L, He F, Zhang T L, Ouyang J T 2022 *Phys. Plasmas* **29** 093511
- [26] Zhang T L, Cui Y, Xia Z Y, Zheng B C, He F, Ouyang J T 2024 *Plasma Sources Sci. Technol.* **33** 045016
- [27] Cui R L, Zhang T L, He F, Zheng B C, Ouyang J T 2024 *Plasma Sources Sci. Technol.* **33** 025021
- [28] Blackwell D D, Chen F F 1997 *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** 569
- [29] Arnush D, Chen F F 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1239
- [30] Rayner J P, Cheetham A D 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 79
- [31] Li W Q, Tang Y N, Liu Y L, Wang G 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 155201 (in Chinese) [李文秋, 唐彦娜, 刘雅琳, 王刚 2025 物理学报 **74** 155201]
- [32] Niu C, Liu Z W, Yang L Z, Chen Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 045201 (in Chinese) [牛晨, 刘忠伟, 杨丽珍, 陈强 2017 物理学报 **66** 045201]
- [33] Wang C, Liu J, Chang L, et al. 2024 *Chin. Phys. B* **33** 035201

SPECIAL TOPIC—Non-equilibrium transport and active control strategy in low-temperature plasmas

## Wave propagation and power coupling characteristics of low-field peak helicon plasma\*

LUO Miaojian    CHANG Lei<sup>†</sup>    MA Jingjing    KAN Zichen  
ZHANG Shijie    ZHAO Yingxin

(*School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

( Received 2 February 2026; revised manuscript received 4 March 2026 )

### Abstract

Low-field peak (LFP) phenomena in helicon plasmas represent an important nonlinear feature of low-magnetic-field helicon discharges and are closely associated with wave propagation, reflection, and power coupling processes. Understanding the evolution of wave propagation characteristics under low magnetic field conditions is therefore essential for elucidating the physical mechanisms underlying LFP helicon plasmas. In this work, argon helicon plasmas excited by a single-loop antenna are systematically investigated through numerical simulations using the HELIC code, with a focus on wave propagation and power coupling characteristics in the low magnetic field regime. To quantitatively characterize the propagation state of helicon waves, a multi-parameter standing-wave analysis framework is introduced. This framework includes the standing wave ratio (SWR), spatial distributions of wave amplitude and phase, amplitude ratios of forward and reflected waves, amplitude and power reflection coefficients, load resistance evolution, radial power deposition, cumulative power distribution, and axial wavenumber power spectra. Based on these diagnostic parameters, the transition of wave propagation from a standing-wave-dominated regime to a traveling-wave-dominated regime is analyzed from the perspectives of spatial field structure, spectral characteristics, and power deposition. The numerical results show that under low magnetic field conditions, strong axial reflections lead to pronounced standing-wave structures, resulting in localized power deposition near the antenna region. As the background magnetic field increases, the reflection strength gradually diminishes, and the propagation state evolves into a traveling-wave-dominated regime. This transition is consistently characterized by a decrease in SWR and reflection coefficients, a reduction in phase discontinuities, and stabilization of the effective axial wavenumber. Meanwhile, the antenna-plasma coupling strength increases with magnetic field, as indicated by the rise in load resistance. The power deposition pattern also evolves with magnetic field, exhibiting a gradual shift of radial power deposition from the plasma edge toward the core region. In addition, the axial wavenumber power spectrum indicates that the absorbed power becomes increasingly concentrated at lower wavenumbers as the magnetic field increases. These results provide quantitative insights into wave propagation and power coupling processes in low-magnetic-field helicon discharges and offer useful references for future numerical studies and experimental diagnostics of LFP helicon plasmas.

**Keywords:** helicon plasma, low-field peak, standing-wave ratio

**DOI:** [10.7498/aps.75.20260190](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260190)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20260190](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260190)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 92271113, 12411540222, 12481540165), the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant No. CSTB2025NSCQ-GPX0725), and the ENN Energy Research Institute Hydrogen-Boron Fusion Research Fund (Grant No. 2025ENNH01-011).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [leichang@cqu.edu.cn](mailto:leichang@cqu.edu.cn)

## 低磁场峰螺旋波等离子体的波传播和功率耦合特性

罗苗健 苕磊 马婧婧 阚子晨 张世杰 赵应鑫

### Wave propagation and power coupling characteristics of low-field peak helicon plasma

LUO Miaojian CHANG Lei MA Jingjing KAN Zichen ZHANG Shijie ZHAO Yingxin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090502 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260190

CSTR: 32037.14.aps.75.20260190

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260190>

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

电子温度各向异性对螺旋波等离子体中电磁模式的传播及功率沉积特性的影响

Influence of electron temperature anisotropy on wave mode propagation and power deposition characteristics in helicon plasma

物理学报. 2023, 72(5): 055202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222048>

低磁场螺旋波等离子体中Trivelpiece-Gould波的功率沉积特性

Analysis of power deposition characteristics of Trivelpiece-Gould wave in low magnetic field helicon plasma

物理学报. 2025, 74(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250303>

电子温度各向异性对螺旋波 $m = 1$ 角向模功率沉积特性的影响

Influence of electron temperature anisotropy on the  $m = 1$  helicon mode power deposition characteristic

物理学报. 2024, 73(7): 075202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231759>

外加磁场对螺旋等离子体的影响

Effect of external magnetic field on helix plasma plume

物理学报. 2023, 72(13): 130501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222442>

HL-2M托卡马克装置中螺旋波与低杂波的协同电流驱动

Synergistic current drive of helicon wave and lower hybrid wave in HL-2M

物理学报. 2023, 72(24): 245202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231077>

多组分尘埃等离子体中非线性尘埃声孤波的传播特征

Propagating characteristics of nonlinear dust acoustic solitary waves in multicomponent dusty plasma

物理学报. 2023, 72(3): 035201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221843>