

短管螺旋波放电中等离子体参数测量和模式转化研究

赵高 熊玉卿 马超 刘忠伟 陈强

Characterization of plasma in a short-tube helicon source

Zhao Gao Xiong Yu-Qing Ma Chao Liu Zhong-Wei Chen Qiang

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 235202 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.235202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.235202>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[磁场对螺旋波等离子体波和能量吸收影响的数值研究](#)

成玉国, 程谋森, 王墨戈, 李小康

2014, 63(3): 035203. 全文: [PDF](#) (431KB)

[快波模式转换效率的理论分析和数值模拟](#)

卢凌峰, 张新军, 赵燕平, 秦成明

2013, 62(7): 075204. 全文: [PDF](#) (629KB)

[微波阶梯阻抗变换器低气压电晕放电粒子模拟](#)

刘雷, 李永东, 王瑞, 崔万照, 刘纯亮

2013, 62(2): 025201. 全文: [PDF](#) (9845KB)

[太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究](#)

郑灵, 赵青, 刘述章, 邢晓俊

2012, 61(24): 245202. 全文: [PDF](#) (1490KB)

[等离子体中电磁波传输特性理论与实验研究](#)

郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章, 黄成, 邢晓俊, 张春艳, 陈旭霖

2012, 61(15): 155203. 全文: [PDF](#) (367KB)

短管螺旋波放电中等离子体参数测量和模式转化研究*

赵高¹⁾ 熊玉卿²⁾ 马超¹⁾ 刘忠伟¹⁾ 陈强^{1)†}

1) (北京印刷学院等离子体物理及材料研究室, 北京 102600)

2) (兰州物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

(2014年3月18日收到; 2014年6月29日收到修改稿)

对长度为45 cm的短放电管螺旋波放电等离子体进行了Langmuir探针、原子发射光谱以及集成电荷耦合检测器(ICCD)检测诊断, 研究螺旋波等离子体的放电特性. Langmuir探针数据显示电子密度在射频功率增加过程中出现两次大幅增长, 由此确认了放电模式的转换及螺旋波放电模式的出现. 发射光谱测量结果与Langmuir探针测量的电子密度数据一致, 发现Ar原子和Ar离子的谱线强度与放电模式变化有着密切相关性. 而通过对不同放电模式的ICCD测量, 获得射频功率吸收因放电模式转变而变化的方式, 认为放电模式转换时电子行为和能量传递方式也发生着变化.

关键词: 螺旋波放电, 原子发射光谱, 集成电荷检测器, 径向区域的变化

PACS: 52.50.Qt, 44.90.+c, 52.40.Db

DOI: 10.7498/aps.63.235202

1 引言

螺旋波最早由Aigrain^[1]在1960年提出, 主要用于描述在高电导率的介质中传播的低频电磁波, 如磁场中的气体放电等离子体等. 但是直到1970年Boswell^[2]才第一次实现和产生了螺旋波等离子体. 螺旋波放电是利用环绕于绝缘介质放电管外壁的射频驱动天线激发电磁波并发射到等离子体中去, 电磁波的能量则通过碰撞或无碰撞阻尼被电子吸收. 由于螺旋波放电电离率高, 能够产生 10^{11} — 10^{14} cm⁻³的等离子体密度, 同时约束磁场低, 以及可作为远程等离子体源等特点^[3], 因而可广泛用于材料改性、表面处理以及空间推进等诸多领域^[4].

虽然对螺旋波等离子体的研究已有一段时间, 但人们对于螺旋波形成的物理机理、射频功率耦合

到等离子体中的物理方式以及一些物理现象仍然没有合理的解释, 对于螺旋波等离子体高电离机理尚没有统一认识. 在先前的研究中大部分是在长放电管(约 ≥ 1 m)^[5-9]中进行, 研究较多的是螺旋波的产生机理, 放电功率对电子密度的影响, 利用电子密度随功率的变化作为确认螺旋波放电模式转变的依据^[10,11], 采用发射光谱(OES)进行空间分布的来研究螺旋波等离子体中的粒子平衡等理论^[6]. Chen和Torreblanca^[12]进行了螺旋波等离子体阵列结构设计, 采用短放电管研究等离子体的均匀分布, 且准备应用于等离子体刻蚀, 这是短管研究的真正开始; 后来Lafleur等^[13,14]对短管放电低场密度峰的产生及其机理进行了研究. 在实际工业应用中, 总是希望得到可承受大的功率、大面积和小体积的放电系统, 即在较小等离子体源的情况下可进行较大面积的材料处理或制备高效的等高

* 国家自然科学基金(批准号: 11175024, 11375031)、科技部十二五科技支撑项目(批准号: 2011BAD24B01)、国家科技支撑计划(批准号: E-b-2012-40)、北京印刷学院重点项目(批准号: 23190113051)、北京印刷学院科研基金和真空技术与物理重点实验室开放基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lppmchenqiang@hotmail.com

子体设备.

国内对螺旋波等离子体源产生机理的研究相对较少,但随着Tokamak聚变装置和航天推进技术的发展,对其关注在不断增加.国防科学技术大学、北京航空航天大学、苏州大学以及大连理工大学等开展了螺旋波等离子体的产生机理、双层特性及相关应用等方面的工作 [15-17].

本文主要进行短管放电的特性诊断研究.通过射频补偿Langmuir探针研究短放电管中放电模式的产生和转化,并结合OES对放电模式的产生和转化进行验证.采用集成电荷耦合检测器(ICCD)对短管螺旋波放电进行了测量,同时与Langmuir探针、OES测量的结果进行比较,进一步从理论上研究螺旋波放电的产生和转变机理.

2 实验设备与参数

螺旋波放电测量在实验室自制的装置中进行,图1为设备装置简图.设备结构包括一个长度为45 cm、内径为7 cm、外径为8 cm的石英放电管,射频天线,磁体系统,射频电源及匹配网络.石英管下端与高30 cm、内径为33 cm的不锈钢扩散腔室密封连接,上端则用金属板封闭.Ar气通过上端金属板由质量流量计控制输入到放电腔体.涡轮分子泵和机械泵抽气系统接在扩散腔下方以产生和维持真空.放电天线是由直径为6 mm的水冷铜管制得的双马鞍结构天线(即Boswell型天线),天线两端之间长15.5 cm.等离子体的外加磁场由一组通有恒定直流电流的线圈提供.由一个接有自动匹配器的13.56 MHz射频源馈入到天线上产生螺旋波

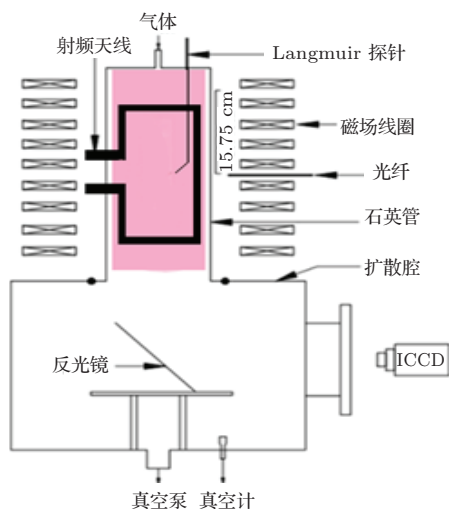


图1 短放电管螺旋波放电及其测量系统设备

等离子体,所加射频功率范围为0—1800 W.石英管和天线的外围加有法拉第屏蔽,真空室的气压通过扩散腔体上的真空电离管测量.带有射频补偿的Langmuir探针由石英管上端金属板插入放电室,探针头是长为7 mm、直径为0.2 mm的钨丝,且探针可沿轴向移动;OES测量是把光纤探头放置在石英管外、天线中间,并连接到光谱仪(Andor-500is-sm)记录测量放电区域的光谱信息;利用ICCD拍摄放电管径向区域的等离子体变化.在实验过程中保持外加磁场的磁感应强度为 3×10^{-2} T、Ar气工作气压为0.3 Pa不变.

3 结果与讨论

首先,采用射频补偿的Langmuir探针对该等离子体微观参数进行测量,结果如图2所示.从图2可以看到,在气压和磁场恒定条件下,电子密度随输入功率的增加而增大,且出现两次明显跃迁.当功率小于400 W时等离子体放电较弱,密度较低.当功率增加至约400 W时电子密度发生跃迁,之后随着输入功率的增加而增大.当输入功率达到1100 W时,再次出现等离子体密度的跃迁.两次等离子体密度的跃迁说明在放电过程中发生了放电模式转换,即通过增加射频功率可以改变放电模式,这与文献[16, 17]结果相一致.对于螺旋波放电,当射频入射功率以及轴向磁场强度发生变化时,可以出现以下三种放电模式:存在于低功率下的低密度感应模式(E-模式),即容性耦合放电;高功率条件下的中等密度放电模式(H-模式),即感性耦合放电;更高的功率条件下高密度的哨声波

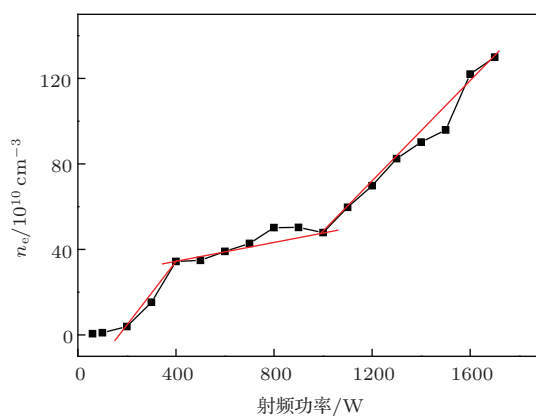


图2 (网刊彩色)短放电管中电子密度和射频输入功率之间的关系(Langmuir探针位于放电管中心轴线上部距天线中心向上约15.75 cm处,图中点划线为实验数据,红色实线为线性拟合结果)

(whistle) 模式(W-模式). 图2中的等离子体密度的跃迁, 正是这三种放电模式的转变引起的. 对图2所示曲线进行分段线性拟合, 可以看到三个明显不同的增长趋势, 电子密度随功率快速增长, 反映出射频能量传递给等离子体的效率高, 使得电离效率增加. 螺旋波放电模式通过波与粒子共振作用进行能量传递, 加热电子, 具有较高的能量传递效率, 从而获得较高的电离效率, 使得电子密度随功率的增加迅速提高.

对上述等离子体进行光谱诊断, 发现等离子体状态有着同样的变化趋势. 图3显示了三条Ar原子750.39, 763.51和811.53 nm光谱线强度随射频入射功率的变化. 从图3可以看出, OES也可以揭示出输入功率的变化引起三种不同放电模式(E-模式, H-模式, W-模式)转变的情况. 最初随着射频功率的增加, Ar原子三条光谱线强度明显增加, 此为容性放电模式向感性放电模式转变; 随后在约1100 W输入功率时, 谱线强度再次发生跃迁, 这是感性放电模式转换到螺旋波模式. Ar气原子发射谱线强度随功率的变化与Langmuir探针测量数据的一致性, 不仅说明Langmuir探针测量结果可信, OES测量的谱线强度同样可以作为放电模式的转换判据, 同时也证明了射频源能量的吸收以电磁波加热粒子的方式决定着整个放电模式.

分析图2和图3发现, 与电子密度随功率变化不同的是, 图3中的谱线强度增加的速度不明显, 甚至有所降低. 这说明等离子体在进入螺旋波模式后, 所吸收的能量耗散在原子激发的部分相对减少, 而耗散在气体电离的部分则相对增加, 从而使得等离子体的电离率增加.

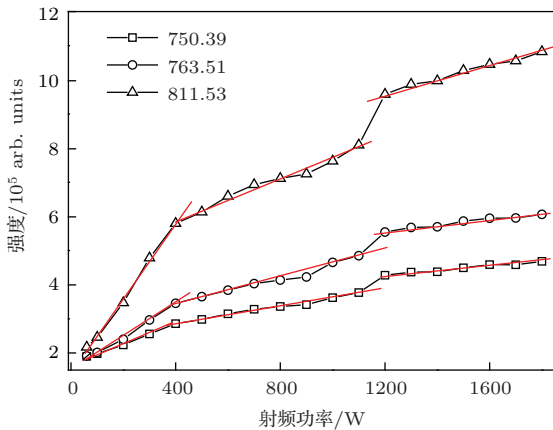


图3 (网刊彩色) Ar原子光谱线强度随射频入射功率的变化(图中点划线为实验数据, 红色实线为线性拟合结果)

此外, 从OES我们还注意到, ArII离子谱线同样与放电模式有着密切的关系. 在图4中, 随着入射功率的增加, ArII 480.6 nm由不出现到很弱, 即在低密度模式时Ar离子光谱发射线基本没有, 直到输入功率为1000和1100 W时, 等离子体出现过渡模式向螺旋波模式转变时, 谱线强度才出现跳跃式增长并维持在强度较高状态下. 因此ArII离子在480.6 nm谱线同样可以用来诊断哨声波产生的放电模式的转变研究.

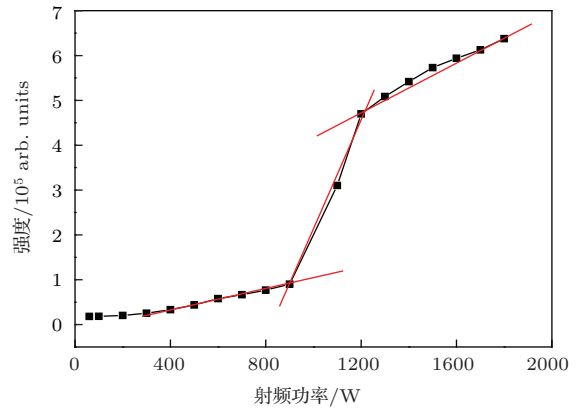


图4 (网刊彩色) OES测量ArII离子谱线强度对射频入射功率的影响(图中点划线为实验数据, 红色实线为线性拟合结果)

H-模式向W-模式转变时出现ArII离子谱线是和高密度W-模式放电产生的快电子有关^[18], 当和螺旋波相速度接近的快电子出现时, 增加了射频功率的吸收效率, 使得原本需要在更高激发电位下才能产生的激发态Ar离子也变得容易出现, 螺旋波放电模式下可以测到Ar离子谱线信号.

静电探针电流(电子电流)来自于对电子能量分布函数的积分, 对实验测得的电流电压特性曲线的过渡区部分求微分, 可以得到电子能量分布函数. 对于麦氏分布电子能量概率分布(EEPF)有^[19]

$$g_p(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} n_e T_e^{-3/2} e^{-\varepsilon/T_e},$$

其中, n_e 为电子密度, T_e 为电子温度, ε 为能量. 在此情况下 $\ln g_p$ 与 ε 呈线性关系. 因此可以通过对EEPF的分析来判断等离子体特征参数. 图5为静电探针测得的EEPF, 表明快电子的产生和高密度W-模式放电有关. 在图5(a)中随着射频入射功率的增加和放电模式的转换, 出现高能电子密度的概率越来越多. 从图5(b)可以明显看到, W-模式放电时出现两个电子群(分别用 T_{e1} 和 T_{e2} 表示): 快电子与本体电子. W-模式放电时高效的能量传递

使得电子获得很高能量, 等离子体出现能量较高的快电子群从而激发了 Ar 离子激发态的跃迁.

在 0.3 Pa, 3×10^{-2} T 放电条件下, 我们用 ICCD 对三个放电模式下等离子体的径向区域进行拍照诊断, 图 6 显示了等离子体密度的径向区域变化情况. 在第一个放电模式时, 整个辉光较暗, 较亮部分位于管子的边界; 当放电进入第二个放电模式,

等离子体整体辉光强度发生明显增强, 高密度等离子体产生的较亮区域集中在放电管外的天线附近; 随着更高的功率输入, 位于放电管边界的亮区移到放电管中心部位, 等离子体集中到管的中央, 对应着螺旋波等离子体的第三个放电模式. 这一结果表明 ICCD 可作为一种新型的螺旋波诊断方法, 纳秒成像技术也可以形象地描述螺旋波放电的特性.

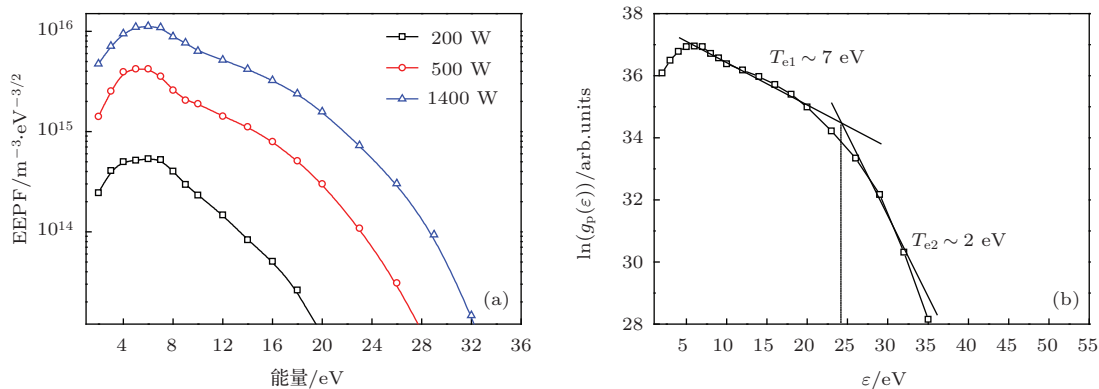


图5 (a) 射频入射功率为 200, 500, 1400 W 时的 EEPF; (b) W-模式下, 1400 W 时取对数处理后的 EEPF

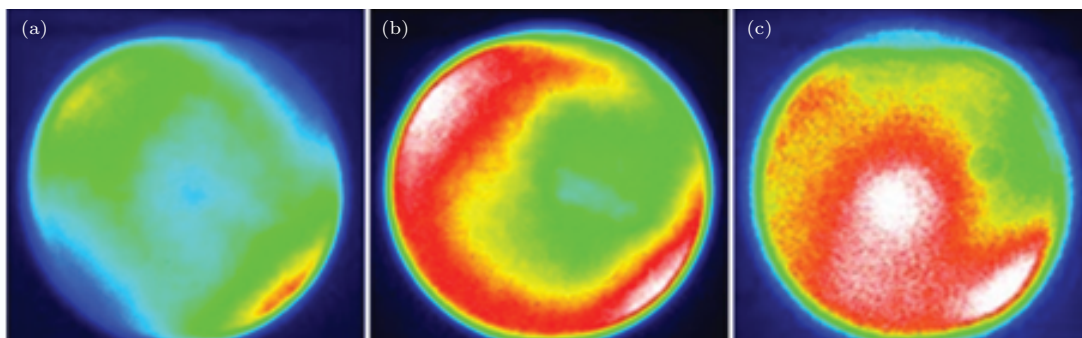


图6 (网刊彩色) ICCD 拍摄的放电状态随射频源功率变化的照片 (曝光时间为 2 ns) (a) 100 W; (b) 800 W; (c) 1700 W

分析 ICCD 照片, 我们认为快电子的产生和不同放电模式对 Ar 离子 OES 的影响可以用 ICCD 检测所证实. 在图 6 中, 射频输入功率为 1700 W 时产生的螺旋波放电模式 (即 W 模式) 位于管边界的高亮区域相对变暗, 但仍然有较亮的辉光存在, 我们认为这与螺旋波放电的电子加热机理的变化有关, 在放电模式转换时存在明显的预加速电子过程.

目前认为, 在螺旋波等离子体中, 螺旋波的强吸收和电子加热不是直接碰撞吸收机理, 而是电子-波共振作用理论, 如朗道阻尼理论^[20] 或非线性电子俘获机理^[21]. 只有在电子-波共振作用时, 才能将射频能量吸收传递到热电子并对其加速至相速度^[22]. Ellingboe 和 Boswell^[23] 认为这个过程中存

在一个预加速机理, 使得电子处于行进波容易俘获的状态, 但是 Niemi 和 Krämer^[7] 认为在“哨声波”或“非低场下通过改变功率或磁场实现螺旋波放电时的模式 (big bule)”下的高密度螺旋波等离子体预加热电子不太可能扮演重要角色. 他们研究螺旋波放电中心径向区域发现阻尼率在某一功率时开始增长, 这一功率接近波动开始作用的功率, 即当功率值达到进入螺旋波放电所需要的值时, 射频的吸收效率发生了变化. 但是从图 6 所示结果, 我们认为预加速电子可能是一个必要的过程, 且预加速电子正是来自于天线附近的放电管边界处. 在过渡模式下这些电子被加速, 然后当功率继续增加到一定值时, 天线所激发的哨声波对电子加热逐渐发挥

主导作用,使这些预加速的电子被加速到波的相速度(接近相速度的电子通常被称为快电子),吸收能量,并进入放电管中心部分且成为有效的电离引发剂,从而出现图6所示的1700 W时放电管中心出现的“big blue”光柱.也正是这部分电子的作用使得Ar离子激发并形成了ArII光发射谱线,此时放电转变为W模式,功率主要耗散在等离子体柱的中心区域.

4 结 论

本文通过射频补偿Langmuir探针对短放电管螺旋波结构进行测量,得到等离子体密度随功率的变化,发现电子密度随功率增加而出现两次明显大幅跃迁,确定了螺旋波等离子体中功率引起的放电模式的转变.在同样放电条件下,OES诊断表明Ar原子OES谱线强度随射频功率增加同样出现两次跃迁,且趋势与Langmuir探针得到的数据一致,表明实验数据的可信性和螺旋波放电诊断方法的多样性.通过对Ar离子480.6 nm谱线强度的测量,认为哨声波产生和高能电子群出现相关.ICCD照片揭示了螺旋波放电中的电子行为,认为放电模式转换时存在明显的预加速电子过程.

参考文献

- [1] Aigrain P 1960 *Proceeding of the International Conference Semiconductor Physics* Prague, Czechoslovakia, 1960 p224
- [2] Boswell R W 1970 *Phys. Lett. A* **33** 457
- [3] Fang T Z 1998 *Physics* **28** 163 (in Chinese) [房同珍 1998 物理 **28** 163]
- [4] Porte L, Yun S M, Armush D, Chen F F 2003 *Plasma Source Sci. Technol.* **12** 287
- [5] Chen F F 2003 *Phys. Plasmas* **10** 2586
- [6] Sudit I D, Chen F F 1996 *Plasma Source Sci. Technol.* **5** 43
- [7] Niemi K, Krämer M 2008 *Phys. Plasmas* **15** 073503
- [8] Fang T Z, Wang L, Jiang D M, Zhang H X 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1098
- [9] Fang T Z, Jiang N, Wang L 2005 *Chin. Phys.* **14** 2256
- [10] Franck C M, Grulke O, Klinger T 2003 *Phys. Plasmas* **10** 323
- [11] Boswell R W, Chen F F 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 1229
- [12] Chen F F, Torreblanca H 2007 *Plasma Phys. Control Fusion* **49** A81
- [13] Lafleur T, Charles C, Boswell R W 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 055202
- [14] Lafleur T, Charles C, Boswell R W 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 185204
- [15] Bo Y, Zhao Y, Jin C G, Yu T, Wu X M, Zhuge L J 2011 *Micronano Electron. Technol.* **48** 739 (in Chinese) [柏洋, 赵岩, 金成刚, 余涛, 吴雪梅, 诸葛兰剑 2011 微纳电子技术 **48** 739]
- [16] Xia G Q, Wang D X, Xue W H, Zhang J L 2011 *J. Propuls. Technol.* **32** 857 (in Chinese) [夏广庆, 王冬雪, 薛伟华, 张家良 2011 推进技术 **32** 857]
- [17] Cheng Y G, Cheng M S, Wang M G, Li X K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 035203 (in Chinese) [成玉国, 程谋森, 王墨戈, 李小康 2014 物理学报 **63** 035203]
- [18] Tysk S M, Denning C M, Scharer J E, White B O, Akhtar M K 2003 *15th Topical Conference on RF Power* Moran, USA, May 19–21, 2003 p427
- [19] Lieberman M A, Lichtenberg A J (translated by Pu Y K) 2007 *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Beijing: Science Press) p142 (in Chinese) [力伯曼 M A, 里登伯格 A J 著(蒲以康译) 2007 等离子体放电物理与材料(北京: 科学出版社) 第142页]
- [20] Loewenhardt P K, Blackwell B D, Boswell R W, Conway G D, Hamberger S M 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2792
- [21] Ellingboe A R, Boswell R W 1995 *Phys. Plasmas* **2** 1807
- [22] Chen F F, Boswell R W 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 1245
- [23] Ellingboe A R, Boswell R W 1996 *Phys. Plasmas* **3** 2797

Characterization of plasma in a short-tube helicon source*

Zhao Gao¹⁾ Xiong Yu-Qing²⁾ Ma Chao¹⁾ Liu Zhong-Wei¹⁾ Chen Qiang^{1)†}

1) (*Laboratory of Plasma Physics and Materials, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China*)

2) (*Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics,
Lanzhou 730000, China*)

(Received 18 March 2014; revised manuscript received 29 June 2014)

Abstract

Characteristics of helicon plasma in a 45 cm long discharge tube were diagnosed by the Langmuir electrostatic probe, optical emission spectroscopy (OES), and integrated capacitively coupled detector (ICCD). The discharge in helical wave mode was confirmed by the sharply variation of electron density and electron temperature based on the Langmuir data. We have noticed that the variation of electron density measured by the Langmuir electrostatic-probe is consistent with the OES measurement. Intensities in the spectra of argon atoms and ions are strongly related to discharge modes. The photos taken by ICCD can distinguish the discharge modes in the radial region. Intensity changes in the radial region reflect the electron motivation and the energy transfer path in the helicon plasma.

Keywords: helicon discharge, optical emission spectroscopy, integrated capacitively coupled detector, changes in radial region

PACS: 52.50.Qt, 44.90.+c, 52.40.Db

DOI: [10.7498/aps.63.235202](https://doi.org/10.7498/aps.63.235202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11175024, 11375031), the 12th Five-Year Science and Technology Support Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011BAD24B01), the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. E-b-2012-40), the Key Project of Beijing Institute of Graphic Communication, China (Grant No. 23190113051), the Scientific Research Foundation of Beijing Institute of Graphic Communication, China, and the Open Fund of Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, China.

† Corresponding author. E-mail: lppmchenqiang@hotmail.com