

文章编号: 1007-4627(2013)01-0032-06

2.45 GHz ECR 离子源的微波阻抗匹配

钱程¹, 陈志¹, 马鸿义², 武启², 张文慧², 王云¹, 杨尧^{2,3}, 方兴^{2,3},
孙良亭², 张雪珍², 张子民², 刘占稳², 赵红卫²

- (1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: ECR离子源的等离子体阻抗对其微波传输与阻抗匹配设计至关重要。在中国科学院近代物理研究所现有的2.45 GHz ECR质子源上, 对等离子体阻抗进行了测量。首先用水吸收负载代替等离子体负载测量得到了所用微波窗阻抗, 然后根据质子源测量数据, 推算得到了等离子体阻抗。实验结果表明, 脊波导输出端阻抗与后续负载不完全匹配, 等离子体阻抗随微波功率变化呈非线性。这些结果为ECR离子源过渡匹配和微波窗的设计提供了参考依据。

关键词: ECR离子源; 等离子体阻抗; 脊波导; 阻抗匹配

中图分类号: O536 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.032

1 引言

电子回旋共振 (ECR) 离子源根据其工作方式与用途不同, 可分为多电荷态离子源和单电荷态离子源。该类型的离子源具有电离密度高、无阴极、束流重复性好和束流品质好等优点^[1]。随着高功率的质子加速器的不断发展, 国内外的相关实验室都先后研制出了性能优良的强流 ECR 质子源^[2-5], 它通常采用 2.45 GHz 微波产生等离子体。要产生致密等离子体, 微波功率必须有效馈入并被等离子体吸收。等离子体相当于微波传输终端的负载^[6], 因此微波功率源与 ECR 离子源之间的微波传输与馈入设计至关重要。目前大多数强流质子源的微波过渡匹配段大都采用脊波导, 也有采用介质圆波导的, 如北京大学的强流质子源装置^[5]。在微波系统设计时, 首先需要知道放电室中等离子体阻抗大小, 以便为微波系统设计提供参考依据。

本文采用微波反射方法^[7]测量负载阻抗, 主要测量设备是斯洛伐克 S-TEAM Lab 公司的三销钉自动调谐器。通过测量负载的反射系数, 然后根据脊波导多

节反射理论推算出 ECR 源等离子体负载阻抗。

2 ECR离子源微波系统

2.45 GHz ECR 离子源微波系统由微波发生装置和微波传输装置两部分组成。磁控管是微波发生装置的核心部分, 可以根据需要来配置相应的微波电源。本实验研究的离子源是占空比为 1/3 的脉冲束。实验用到的 ECR 源微波产生和传输装置的主要部件包括: 微波电源、磁控管、环形器、定向耦合器、三销钉调谐器、过渡脊波导和微波窗等。通过各种传输器件的组合来实现微波的优化传输, 降低反射功率。从微波源到调谐器, 均是标准工业产品; 过渡波导和微波窗, 是根据自己的使用要求设计的。

3 微波传输与匹配

根据电磁波传输理论, 传输线的电压或电流是由该点的入射波和反射波叠加而成。从 ECR 源微波馈入系统可以看出, 在由功率源与负载组成的微波系统中, 为保证功率源工作于最佳状态, 传输线的输入阻

收稿日期: 2012-07-09 修改日期: 2012-11-20

基金项目: 国家自然科学基金核能专项 (91126004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (WK214000001)

作者简介: 钱程(1987-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 从事核能与核技术工程研究; E-mail: cqian@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 陈志, E-mail: zchen@ustc.edu.cn

抗与功率源应实现共轭匹配^[8]。另一方面, 如果传输线的输入阻抗与负载不匹配, 也会影响到微波在等离子体源中的吸收效率, 从而影响到等离子体的稳定性和输出束流强度。

从矩形脊波导传输出来的是其主模 TE₁₀ 模, 这不仅能保证高效的单模传输, 还能保证与后面圆波导中 TE₁₁ 模的有效过渡。这两种模的电力线分布相似^[8], 从而易于实现模式转换, 如图 1 所示。

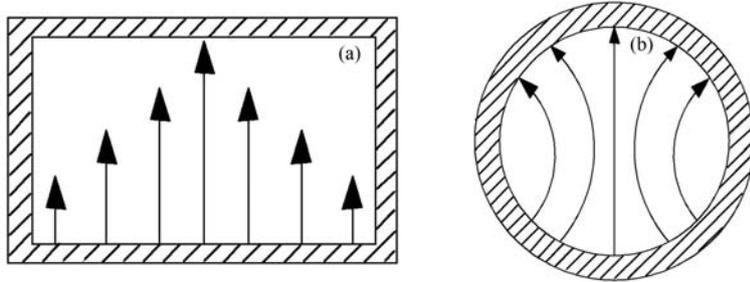


图 1 两种模的电力线分布
(a) 矩形波导的 TE₁₀ 模的分布, (b) 圆波导 TE₁₁ 模的分布。

三段双脊波导的设计, 是基于 λ/4 阻抗变换器理论, 但为了改善频宽, 经常采用多节 λ/4 波导变换器^[8]。参考以前的设计参数, 三段双脊波导的功率电压阻抗分别选为 Z₁ = 471 Ω、Z₂ = 249 Ω、Z₃ = 130 Ω。三段双脊的几何长度均为该段波导波长的四分之一, 呈阶梯状变化, 并使其阻抗逐渐降低以实现脊波导输出端与其负载阻抗匹配。

根据四分之一波长变换理论推算得到三段 λ/4 长波导变换器阻抗应满足式 (1)。此阻抗变换器示意于图 2。

$$Z_1 \times Z_3 = Z_2 \times \sqrt{Z_0 \times Z_{out}}, \quad (1)$$

其中, Z₀ 是矩形波导 BJ32 的特性阻抗。由式 (1) 得出脊波导输出端需匹配的阻抗为 Z_{out} = 90 Ω。脊波导输出端负载为微波窗和 ECR 源等离子体, 相当于两导纳并联, 它们在脊波导输出端的阻抗为 Z_L。如果初始设计的 Z_{out} 与 Z_L 不相等, 可考虑重新选取过渡脊波导或微波窗参数, 直到 Z_{out} 接近此处测得的负载阻抗 Z_L 为止。

为了验证所用公式的准确性和所采取的三段双脊波导阻抗值的合理性, 使用德国 CST (Computer Simulation Technology) 公司的 CST Microwave Studio 仿真软件包模拟计算, 结果如图 3 所示。图中二端口散射参数 S₁₁ 为在端口 2 匹配时端口 1 的反射参数, S₂₁ 为在端口 2 匹配时从端口 1 传输到端口 2 的正向传输系数。由图 3 可见, 正向传输系数达到 0.99, 在 2.45 GHz 的频率范围内能达到很好的传输效果, 因此设计

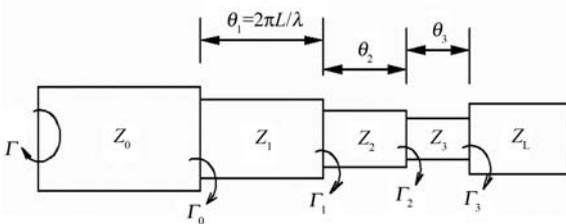


图 2 多节阻抗变换器局部反射系数

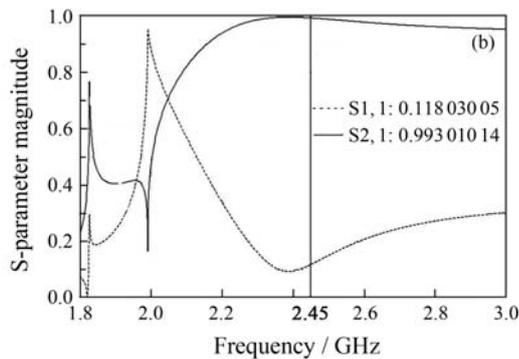
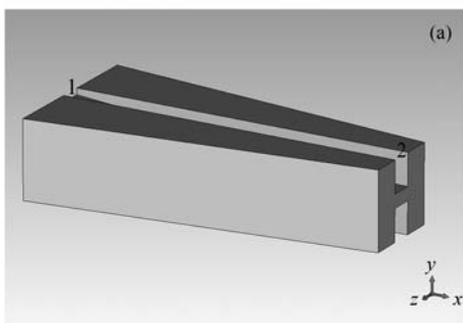


图 3 CST Microwave Studio 软件包模拟的过渡脊波导的散射参数

的三段双脊波导阻抗值和几何长度参数均大体合理。

在脊波导输出端加上的圆柱形微波窗，可以和圆柱形放电室在尺寸上很好对接，也实现了微波从矩形波导 TE_{10} 模到圆波导 TE_{11} 模式的转变，其中也有部分转换成高次模进入放电室中。设计时主要考虑保证总的微波功率最大化传输到放电室中，不必要求基模

传输效率的最大化。本实验的等离子体腔是一个低 Q 值的负载，只要能保证放电腔内设计成合适的磁场形状并调节到合适的工作气压，进入的微波便能通过 ECR 被充分吸收。

加上微波窗之后的模拟结果如图4所示，正向传输系数 S_{21} 达到 0.87。

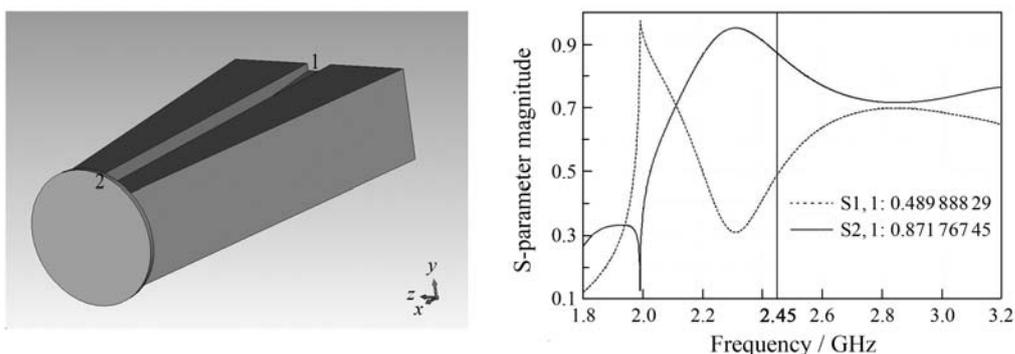


图 4 CST Microwave Studio软件包模拟的过渡脊波导加上窗的散射参数

4 实验测量结果与分析

实验是在中国科学院近代物理研究所的离子源实验台上进行的。该离子源所用等离子体电极引出孔直径为 4 mm，进气量约 1 mL/min，在大约 800 W 微波功率下，可引出 45~55 mA 的混合氢离子束。实验装置示意于图 5。

本实验所用的微波窗有两层介质，一层是氮化铝陶瓷，用于密封等离子体腔；另一层是氮化硼，用于挡回流电子的轰击，保护微波窗。微波窗和 ECR 源等离子体是否与设计的脊波导的输出端阻抗匹配，是本文需要探讨的问题。本文在正常的离子源运行参数下，测量了微波功率对等离子体阻抗的影响。

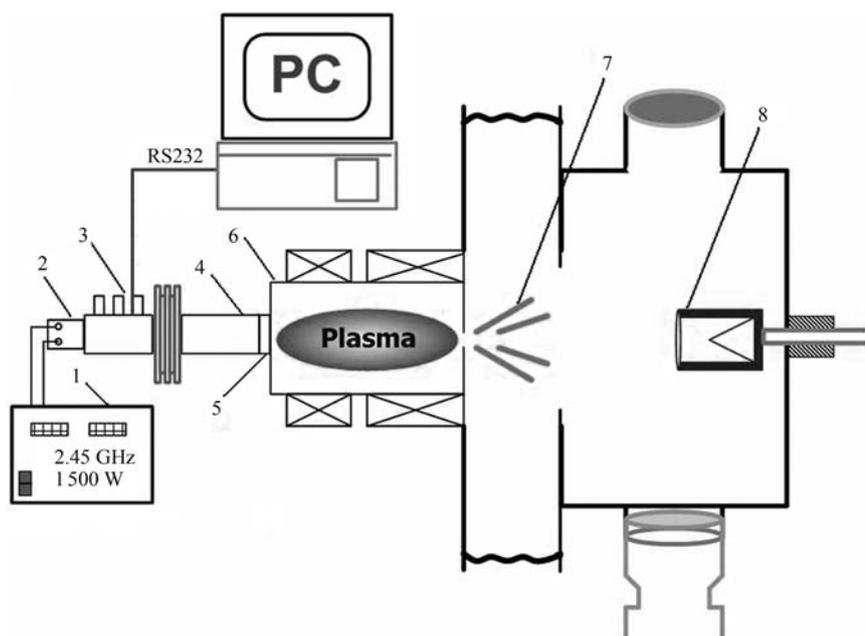


图 5 实验装置图

1 微波电源，2 磁控管，3 S-TEAM Lab自动调谐器，4 过渡脊波导，5 微波窗，6 ECR 离子源，7 引出系统，8 法拉第筒。

等离子体负载具有复数特性阻抗, 此值与微波系统的结构、离子源的结构以及离子源的运行条件有关。实验时, 如让调谐器进入自动调谐, 可使调谐器前面的反射系数很小, 同时可有效提高束流强度。在测量负载阻抗时, 不调谐, 仅用于测负载反射系数。自动调谐器是一段标准波导, 它对传输线不产生干扰。实验测得的微波入射和反射参数如表 1 所示。

表 1 微波窗和 ECR 源等离子体的微波入射和反射参数

入射功率/W	反射功率/W	反射系数	相位角/(°)
646.9	23.11	0.156	-68.8
749.4	25.96	0.152	-89.3
854.7	29.29	0.145	-95.7
914.1	28.82	0.133	-97.1

从表 1 中的反射系数可以看出, 脊波导输出端和其负载基本匹配, 但仍有反射。当然该反射可以通过三销钉调谐器调得更小, 但这只是保证在传输波导段反射最小, 并对等离子体密度有相当的调节作用, 但不能保证微波最优化馈入到等离子体中, 因此需要研究微波窗的阻抗, 并最终推算等离子体阻抗。

为此, 利用水吸收负载代替等离子体, 用厚度为 0.17 mm 的 Kapton 膜密封住和微波窗对接的圆柱型水负载, 圆柱体内充满流动的水, Kapton 膜另一侧紧密接触微波窗面或者脊波导输出面, 尽量减少附加的插入损耗。这样通过比较有无微波窗两种情况, 来推算微波窗的阻抗。实验测得微波入射和反射参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 有微波窗和水吸收负载的微波入射和反射参数

入射功率/W	反射功率/W	反射系数	相位角/(°)
650.0	33.08	0.200	112.4
758.5	38.61	0.201	114.1
850.5	48.85	0.211	110.3
929.7	49.98	0.204	108.2

表 3 无微波窗时水吸收负载的微波入射和反射参数

入射功率/W	反射功率/W	反射系数	相位角/(°)
653.3	306.9	0.672	18.1
752.2	345.7	0.664	15.5
854.8	391.5	0.662	14.5
931.0	420.0	0.656	13.8

可以看出, 水吸收负载和微波窗在恒定的外界条件下, 阻抗基本保持不变; 对于不同的微波功率, 如

表 2 和表 3 所示, 反射系数和相位变化也较小。这种特性保证了以下推算微波窗阻抗的准确性。

根据多节阻抗变换器理论, 每段脊波导之间的阻抗变化对微波都会产生影响。多节变换器上局部反射系数^[8]示意于图 2。图中 Z_0 是矩形波导 BJ-32 的特性阻抗, Z_L 是负载阻抗, Z_1 , Z_2 和 Z_3 是三段脊波导阻抗, L 为脊波导几何长度, λ 为该段微波波导波长。

每段之间产生的反射系数如下:

$$\begin{aligned} \Gamma_0 &= \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, & \Gamma_1 &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \\ \Gamma_2 &= \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}, & \Gamma_3 &= \frac{Z_L - Z_3}{Z_L + Z_3}. \end{aligned} \quad (2)$$

三销钉不调谐情况下测得的总反射系数 Γ 计算如式(3), 它主要来自初始的 Z_0 与 Z_1 之间的反射 (Γ_0)、 Z_1 与 Z_2 之间的反射 (Γ_1)、 Z_2 与 Z_3 之间的反射 (Γ_2)、 Z_3 与 Z_L 之间的反射 (Γ_3)。

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_1 e^{-2j\theta} + \Gamma_2 e^{-4j\theta} + \Gamma_3 e^{-6j\theta}, \quad (3)$$

其中, $e^{-2j\theta}$, $e^{-4j\theta}$ 和 $e^{-6j\theta}$ 是入射波在传输线行进过程中产生的相位延迟^[8], 电长度 θ 均为 $\pi/4$ 等长度。

根据表 2、式(2)及式(3)推算出微波窗和水吸收负载两并联导纳的阻抗约为 $Z_{L水} = 94.4 + 42.5i \Omega$ 。同理根据表 3、式(2)和(3)及 $Z_{L水}$ 推算出微波窗的阻抗, 其阻抗约为 $22.1 + 79.9i \Omega$ 。同理根据表 1、式(2)、式(3)和所得微波窗阻抗求出等离子体阻抗随微波功率的变化如图 6 所示, Z_r 为阻抗的实部(电阻), Z_i 为阻抗的虚部(电抗)。

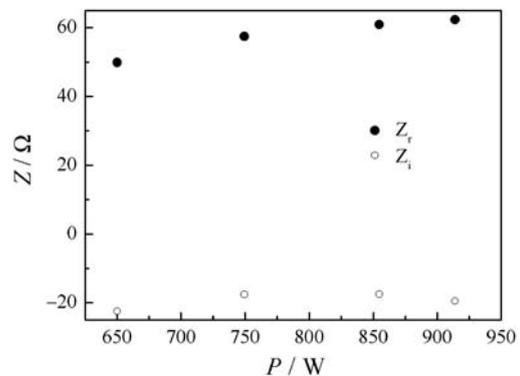


图 6 等离子体阻抗随微波功率的变化

本实验所用的放电室直径 40 mm, 长度 45 mm, 为典型的小放电室。通过实验计算得阻抗呈容性, 和其它低气压放电产生的等离子体阻抗特性相同。此类

离子源等离子体阻抗随微波功率具有可变的、非线性特性。此实验数据是在离子源多次调试优化磁场分布、放电室结构、进气量等参数形成高密度稳定等离子体后得到的。图 6 中所示等离子体阻抗和微波窗阻抗与脊波导输出端所需匹配阻抗 $Z_{\text{out}} = 90 \Omega$ 有一定差距, 另外图 4 模拟结果也显示出散射参数 S11 偏高, 说明微波窗的结构需要进一步改进。

本实验中测得的等离子体阻抗可能存在一定误差, 主要原因是实验过程中等离子体没有加高压引出束流, 等离子体处于自动喷出的状态, 这和离子源有引出电压时的工作状态不同; 另外, 所用微波电源在低功率下稳定性相对较差。限于目前所用的微波机, 微波脉冲占空比约为 1/3, 这与磁控管在 CW 模式运行时的等离子体阻抗会有一定差别。

5 总结

根据本实验测量的等离子体阻抗, 三段脊波导的特性阻抗和微波窗的结构大体合适, 但是脊波导、微波窗和等离子体之间的匹配仍然不是很理想, 因此, 进一步的结构改进是必要的。比较现实的办法是把现有的三段脊波导改成四段脊波导, 进一步降低其输出阻抗; 或者是改造微波窗, 使其具有更高的特性阻抗。无论哪种办法, 都要注意到 ECR 源等离子体阻抗呈容性的匹配, 从而进一步优化 ECR 源等离子体的微波吸收效率, 以达到进一步提高 ECR 源性能的目的。

致谢 感谢中国科学院近代物理研究所高频室边志彬老师对微波测量装置的指导及讨论; 法国 CEA

Saclay 的 GOBIN. R 教授在试验装置筹建中提供的指导、帮助和建议, 使我们深受裨益; 感谢美国劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 谢祖棋研究员和北京大学物理学院重离子物理研究所彭士香副教授长期以来对本实验的热心指导。

参考文献 (References):

- [1] TAYLOR T, MOURIS J F. Nucl Instr and Meth A, 1991, **309**(1/2): 37.
- [2] TAYLOR T, WILLS J S C. Nucl Instru and Meth A, 1991, **309**: 37.
- [3] SHERMAN J D, FIGUEROA T L, HANSBOROUGH L D, *et al.* Review of Scientific Instrume, 2002, **73**(2): 917.
- [4] GOBIN R, BEAUVAIS P Y, DELFERRIERE O, *et al.* Review of Scientific Instrume, 2008, **79**(2): 02B303.
- [5] REN Haitao. Research on Compact High-current High-brightness 2.45 GHz Permanent Magnet ECR Ion Source and its Applications [D]. Beijing: College of Physical science of Graduate University of CAS & Institute of Heavy Ion Physics of Peking University, 2012: 42–45 (in Chinese).
(任海涛. 紧凑型高流强高亮度全永磁 2.45 GHz ECR 离子源及其应用的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院物理科学学院和北京大学重离子物理研究所, 2012: 42–45.)
- [6] CELONA L, CIAVOLA G, GAMMINO S. Review of Scientific Instruments, 1998, **69**(2): 1113.
- [7] KIM J D, KIM S H, KIM H J, *et al.* Journal of the Korean Physical Society, 2012, **60**(6): 907.
- [8] POZAR D M. Microwave Engineering (Third Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 66–223 (in Chinese).
(POZAR D M. 微波工程(第三版)[M]. 张肇仪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 66–223.)

Microwave Impedance Matching of A 2.45 GHz ECR Ion Source

QIAN Cheng¹, CHEN Zhi¹, WU Qi², ZHANG Wen-hui², WANG Yun¹, YANG Yao^{2, 3},
MA Hong-yi², FANG Xing^{2, 3}, SUN Liang-ting², ZHANG Xue-zhen²,
ZHANG Zi-min², LIU Zhan-wen², ZHAO Hong-wei²

(1. *School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Plasma impedance of an ECR ion source is important for microwave transmission and impedance matching design. Plasma impedance was measured indirectly with the 2.45 GHz ECR proton source at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences. In the test, we got microwave window impedance by using water absorption load instead of plasma load, and the source plasma impedance was derived from the test data with the 2.45 GHz ECR proton source and microwave window impedance. The experimental results show that ridge waveguide output impedance and the subsequent load does not exactly match, plasma impedance variation is nonlinear with microwave power. The achieved result is useful in the design of ridged waveguide and microwave window.

Key words: ECR ion source; plasma impedance; ridged waveguide; impedance matching

Received date: 9 Jul. 2012; **Revised date:** 20 Nov. 2012

Foundation item: China Nuclear Power Project of National Natural Science Foundation(91126004); Fundamental Research Fund for the Central Universities (WK2140000001)

Corresponding author: CHEN Zhi, E-mail: zchen@ustc.edu.cn

<http://www.npr.ac.cn>