

CNIC-01871

CAEP-0183

ECR 离子源实验台测试方法

周长庚 胡永宏 李彦

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

介绍了 ECR 离子源实验台的工作原理和结构。总结了研制过程中单个主要部件参数的测试方法及在一定的束流和束斑直径情况下, 综合参数的测试方法, 并给出了理想的测试数据。提出了放电室中的等离子体密度、准确的氢气流量等参数还无法在运行中测试等问题和解决的办法。

关键词: ECR 离子源 技术参数 工作原理 测试方法

**Testing Methods of ECR Ion Source
Experimental Platform**
(*In Chinese*)

ZHOU Changgeng HU Yonghong LI Yan
(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

The principle and structure of ECR ion source experimental platform were introduced. The testing methods of the parameters of single main component and the comprehensive parameters under the condition of certain beam current and beam spot diameter were summarized in process of manufacturing. Some appropriate testing data were given. The existent questions (the parameters of plasma density in discharge chamber and accurate hydrogen flow, etc. can not be measured in operation) and resolutions were also put forward.

Key words: ECR ion source, Technical parameters, Working principle, Testing method

引言

ECR 离子源实验台是核技术应用的重要平台,也是中子发生器的关键实验设备。与高频离子源相比,ECR 离子源有非常突出的优点,但也存在一些缺点:其结构比较复杂,运行过程中由于各部件的参数相互关联、互相影响,所以调整较困难。例如,引出束流的大小不仅与微波功率有关,也与磁场分布、各电极的电压差、进气量有关。因此,掌握 ECR 离子源的测试方法对于设计 ECR 离子源和运行良好的新型中子发生器是非常重要的。我们总结了两年来在研制 ECR 离子源实验台过程中的经验和教训,不仅给出了单个主要部件参数的测试方法,也给出了在一定的束流和束斑直径情况下,综合参数的测试方法。

1 ECR 离子源实验台的基本原理和技术指标

1.1 基本原理

ECR 离子源实验台的基本原理和结构如图 1 所示。

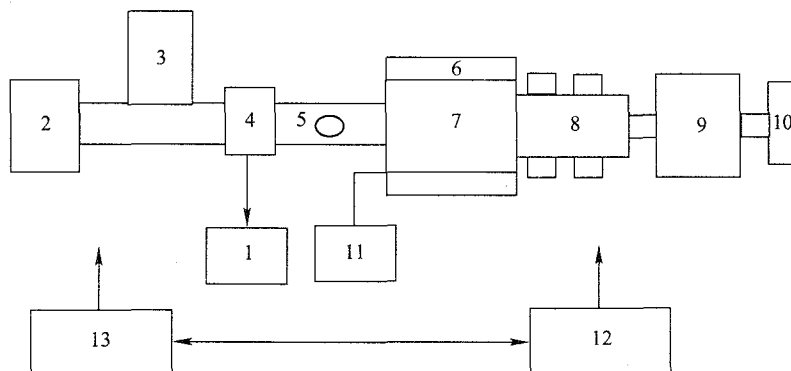


图 1 ECR 离子源实验台的基本原理和结构框图

1—微波功率测量装置;2—磁控管;3—环形器;4—定向耦合器;5—波导;
6—螺旋管磁透镜;7—放电室;8—引出电极;9—真空系统;10—测量靶室;
11—进气系统;12—系统电源;13—在线测控装置

由于 Lorentz 力的作用,电子在磁场中回旋运动。当电子的回旋频率 ω_{cyc} 和馈入的微波频率 ω_{hf} 相等时,电子获得能量,产生共振加速或共振减速,即满足以下条件:

$$\omega_{\text{hf}} = \omega_{\text{cyc}} = (e/m)B \quad (1)$$

式中: ω_{cyc} ——电子的回旋频率,Hz;

ω_{hf} ——微波频率,Hz;

e ——电子电荷,C;

m ——电子质量,kg;

B ——磁场的磁感应强度,T。

对于现在使用的 2.45 GHz 的微波频率,磁感应强度 B 约为 0.087 5 T。电子和氢原子的碰撞过程产生等离子体,等离子体被限制在轴向和径向复合磁场中。因为中心磁场最小并由此全方向增大,所以称为最小 B 结构。磁场的综合作用导致等离子体有一个较长的约

束时间,进而增加了电子与原子、电子与离子的碰撞概率,得到高密度的氢离子,氢离子束经过引出电极加速和聚焦后打到测量靶上。

ECR 离子源实验台主要由磁控管、带水负载环形器、定向耦合器、微波功率测量装置、螺旋管磁透镜、放电室、引出电极、高低压电源、进气系统和在线测控装置等构成。各部分的工作过程为:在 2M319k 型磁控管上加 3.3 V 的灯丝电压和 320 mA 的阳极电流,可产生频率为 2.45 GHz、功率为 1 kW(可调)的微波。带匹配负载的环形器用于防止反射微波功率对微波信号源的影响,保证其工作正常。入射微波经过矩形波导、微波输入窗进入放电室。放电室由带油冷的不锈钢双层圆筒做成。微波输入窗采用石英玻璃、 Al_2O_3 陶瓷和氮化硼(BN)三层材料构成。石英玻璃用于真空密封, Al_2O_3 减少微波反射,氮化硼保护微波输入窗免受次级电子流的影响。氢气通过针阀和带孔的法兰送入放电室,在放电室中电子与氢原子相互作用产生等离子体。满足共振条件的磁场分布由安装在放电室外围的两组螺旋管透镜线圈 A 和线圈 B 形成。两组线圈相对放电室可轴向和横向移动,以调整磁场分布达到最佳放电状态。

微波功率测量装置由两个定向耦合器、一对检波器、发送和接收的光纤传输电路、微波功率表等组成。

在参数的综合测试和调节中,采用了光纤传输技术。利用光纤传输既能有效地解决高压绝缘问题,又可提高系统的抗干扰能力。

1.2 主要技术指标

从 ECR 离子源实验台测到的主要性能指标列于表 1。

表 1 ECR 离子源实验台主要性能指标

名称	技术指标	名称	技术指标
工作方式	直流、脉冲	引出束流强度	≥ 4 mA
原子成分	$\leq 70\%$	微波功率	1 kW
引出电压	≥ 20 kV	微波频率	2.45 GHz
离子束电流	≥ 18 mA	磁控管参数	4.5 kV, 100 mA

2 真空系统测试方法

真空系统主要由直联泵、分子泵和真空室组成,按图 2 的方式连接 ZDF—5227 复合真空计,与真空计配套的电阻规用于测量低真空,电离规用于测量高真空。启动直联泵,正常情况下运行 10 min,复合真空计的低真空读数应达到 10 Pa 左右,否则仔细检查管道密封情况是否良好。低真空达到 10 Pa 左右时,开通分子泵。如果长期未运行,在 2 h 范围内,复合真空计的真空读数应达到 3×10^{-4} Pa 以下,否则,应用乙醚检查管道

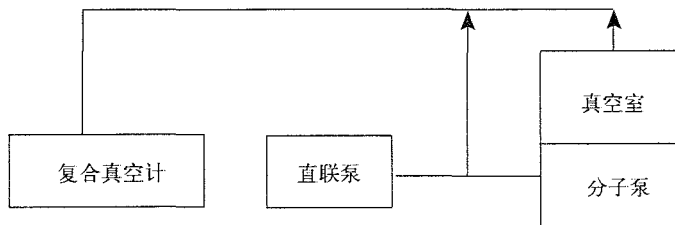


图 2 真空系统测试连线图

是否漏气,尤其注意氢气罐和放电室之间的连接是否可靠。当真空度达到 3×10^{-4} Pa 以下并在 1 h 以上保持稳定,可以确定真空系统测试完毕。

3 高压电源测试方法

ECR 离子源实验台高压电源系统的连线方式如图 3 所示。通过一个 30 kV 三相隔离变压器把 380 V 交流电送到 ECR 离子源的高压平台上,加速电源、抑制电源则直接由 380 V 交流电供电。

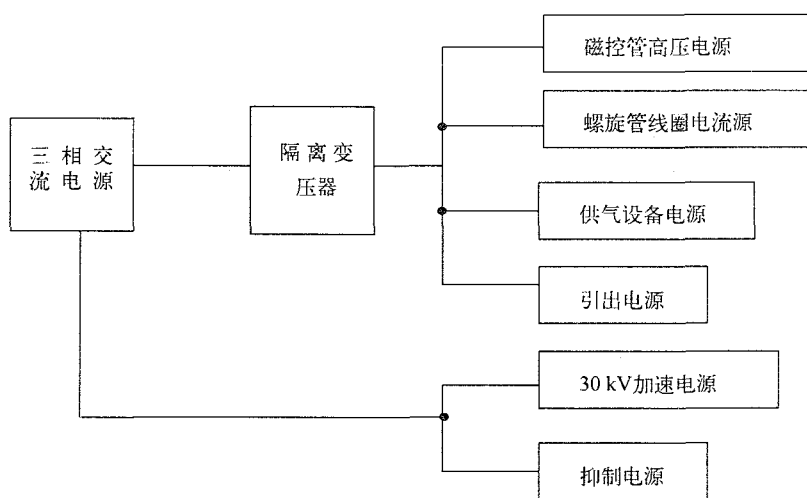


图 3 高压电气设备的连接示意图

根据各部件对电源的要求,高压电源被设计成线形电源和开关电源两种。30 kV 加速电源和磁控管电源采用线形电源。线形电源由控制信号输出电路、高压变压器、整流滤波电路等构成,如图 4 所示。控制信号输出电路产生 0~220 V 可调的交流电压,高压变压器把 0~220 V 变换成 0~4 kV 的交流电压,经整流滤波后形成直流高压。

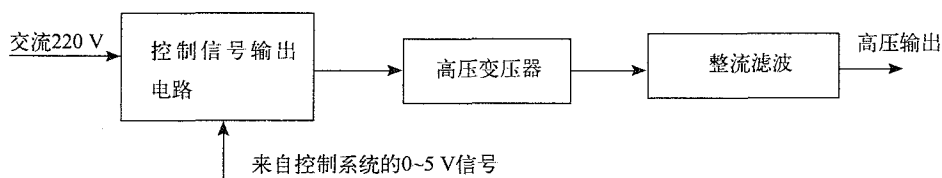


图 4 高压线形电源原理框图

25 kV 引出电源、-2 kV 的抑制电源、-4 kV 的磁控管脉冲电源采用开关电源技术,都是先把 380 V 交流电整流成 520 V 直流电,通过逆变技术再把直流电变成 16 kHz 的交流电,输出的稳定电压经过倍压、整流、滤波得到。其基本原理如图 5 所示。

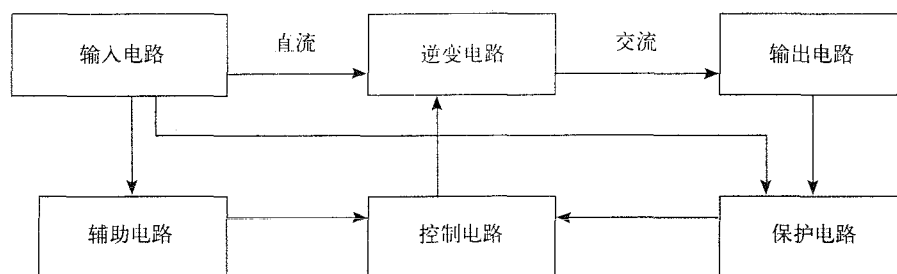


图 5 高压开关电源原理示意图

3.1 高压线形电源的测试

在真空度达到 3×10^{-4} Pa 以下时,开始进行高压测试。

加速电压源和磁控管直流电压源都属高压线形电源,测试方法基本相同,现以 30 kV 加速电压为例介绍测试方法。

3.1.1 脱机空载测试

用一台 0~30 V 可调直流电源代替控制信号,在空载的情况下,在加速电压的输出端接量程为 50 kV 的静电伏特计,从 0 V 开始,缓慢调节直流电源的电压旋钮,注意静电伏特计显示值,以确定其是否与直流电源的指示同步增加或减少。然后,以 5 kV 的步长缓慢增加,每一步保持 15 min,最后使高压加到 33 kV。

3.1.2 联机空载测试

脱机空载测试正常后,可把 30 kV 加速电压输出端通过一个保护电阻接到高压平台上,重复脱机空载测试步骤,最后使高压加到 33 kV。

3.1.3 联机假负载测试

联机空载调试正常后,在高压输出端接一组 1.5 M Ω 的负载电阻,同时串接一个毫安表。重复脱机空载测试步骤,最后使高压加到 30 kV,毫安表指示达到 20 mA。

3.1.4 联机负载测试

调节 ECR 离子源各参数,使氢离子束流达到最大值(约 4 mA),重复联机假负载测试步骤,最后使高压加到 30 kV,毫安表指示达到 20 mA。

3.2 高压开关电源测试

25 kV 引出电源、-2 kV 的抑制电源、-4 kV 磁控管脉冲电源属高压开关电源。高压开关电源与高压线形电源原理结构不同,但测试方法有相似之处。测试中分逆变器输出和滤波输出两部分进行。现以 25 kV 引出电源为例说明。

3.2.1 脱机空载测试

采用 TDS1012 数字示波器和高压探针测量逆变器输出。其输出应是脉冲幅度为 5 kV,脉冲宽度为 16 kHz 的方波。调节 0~5 V 的控制信号旋钮,脉冲的占空比发生变化为正常。

打开电源柜的电源。柜中的红绿灯应常亮。如果需要某一电源单元加电,就加“0”V 电压到相应控制端,此时红灯灭,表示该单元处于准备加电状态,否则,电源存在故障。

在空载的情况下,在加速电压的输出端接量程为 50 kV 的静电伏特计,从 0 V 开始,缓

慢调节直流电源的电压旋钮,注意静电伏特计显示值,以确定其是否与直流电源的指示同步增加或减少。然后,以 5 kV 的步长缓慢增加,每一步保持 15 min,最后使高压加到 33 kV。

3.2.2 联机空载测试

脱机空载测试正常后,可把 25 kV 加速电压输出端通过一个保护电阻接到引出电极上,重复脱机空载测试步骤,最后使高压加到 26 kV。

3.2.3 联机假负载测试

联机空载测试正常后,在高压输出端接一组 1.25 M Ω 的负载电阻,同时串接一个毫安表。重复脱机空载测试步骤,最后使高压加到 25 kV,毫安表指示达到 20 mA。视无打火,高压和真空无波动为正常。

3.2.4 联机负载测试

调节 ECR 离子源各参数,使氢离子束流达到最大值(约 4 mA),重复联机假负载测试步骤,最后使高压加到 25 kV。

4 螺旋管磁透镜测试方法

螺旋管磁透镜由两组线圈(线圈 A 和线圈 B)组成,产生 ECR 放电室所需要的分布磁场。应用特斯拉计和霍尔探针测量螺旋管磁透镜的纵向磁场。拆除放电室,在线圈 A 和线圈 B 加 25 A 的电流,用霍尔探针沿轴向测量磁感应强度 B ,理想的磁感应强度 B 与轴向距离 L 间的曲线如图 6 所示。否则,须调节线圈 A 和线圈 B 电流的大小及两者间的差值,直到接近理想值为止。

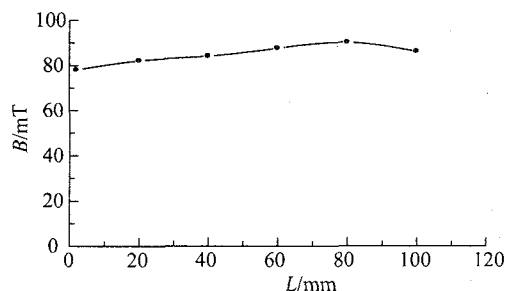


图 6 理想的纵向磁场分布

5 微波功率测试方法

微波测试的原理如图 7 所示。微波功率测量装置可以在线测量微波入射功率和反射微波功率。微波功率测量装置主要由定向耦合器、检波器、衰减器、微波功率表等组成。

当真空度达到 3×10^{-4} Pa 以下时,打开针阀,向放电室输入氢气,并观察真空计指示,真空度达到 5×10^{-4} Pa 左右为合适。然后在螺旋管线圈 A 和线圈 B 分别加 30 A 和 25 A 的电流。缓慢增加磁控管电流到 50 mA,此时功率表显示值约为 140 W 左右。反射微波功率应为入射功率的 12% 左右。否则,反复调整螺旋管线圈 A 和线圈 B 电流。增加磁控管电流到 250 mA,正常时功率表显示值约为 700 W 左右。

6 离子束流测试方法

6.1 直流束流测试

在测量靶室上通过一个电阻(抑制二次电子)接毫安表,在磁控管阳极加 -4 kV 直流电压。调节 ECR 离子源的各部件,使磁控管阳极电流达到 300 mA,调节电流源,使两组磁场线圈 A 和线圈 B 的工作电流分别为 30 A 和 26 A(轴向磁感应强度约 0.089 T),调节针阀,使真空室真空度从 3×10^{-4} Pa 变成 5×10^{-4} Pa。

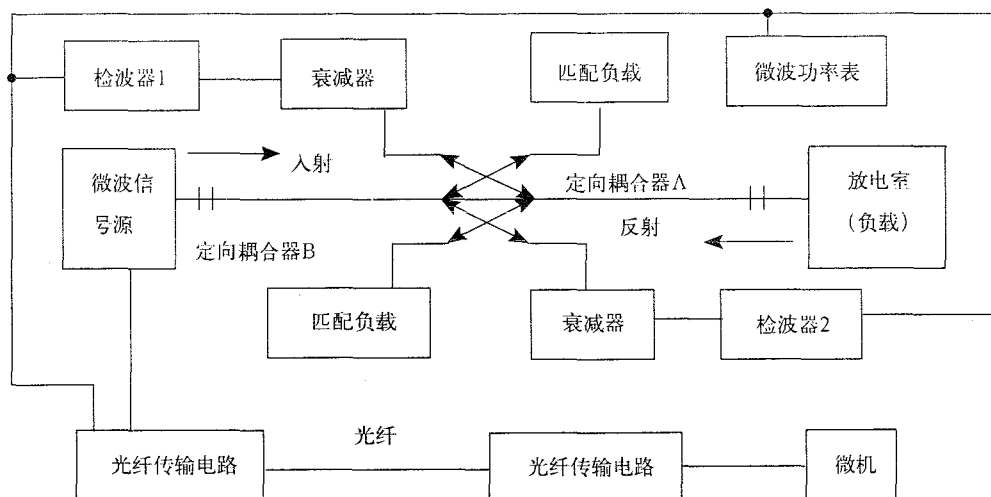


图7 微波功率测试过程原理框图

测量束流大小,理想值约 4 mA 左右。

6.2 脉冲束流测试

在测量靶室与地之间,并联一个 10 kΩ 电阻,用数字示波器测量其脉冲波形。在磁控管阳极输入系列脉冲信号:脉冲电压幅度为 -4 kV,脉冲宽度是 10~100 μs,脉冲频率分别为 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 000 Hz。ECR 离子源各部件的调节与直流束调试情况基本一致。

理想情况下,从测量靶室测得的脉冲波形应与输入系列脉冲信号基本相同,脉冲幅度不同(约为 40 V)。

6.3 束流不稳定性测试

在靶上束流为 4 mA 时,测试束流的不稳定度。

在 1 h 内测量束流,每隔 10 min 记录一次束流值,再利用公式计算其不稳定度:

$$dI = \frac{I_m - I_n}{I_m + I_n} \times 100\% \quad (2)$$

式中: I_m ——最大束流值, μA;

I_n ——最小束流值, μA;

dI ——束流不稳定性。

7 原子比测试方法

在原子比测试中,需要采用一个 90°分析磁铁和一个 90°分析室,测试原理为:基于流过磁铁线圈的电流与通过 90°分析室的氢离子质量成正比,而与曲率半径成反比。当流过磁铁线圈的电流为 0 A 时,氢原子离子束 H1⁺ 和氢分子离子束 H2⁺ 都直接通过磁铁打到 0°靶上。当流过磁铁线圈的电流约为 20 A 时,只有氢原子离子束 H1⁺ 通过分析室打到 90°分析室靶上,氢分子离子束 H2⁺ 都被偏转到分析室的管道上。

调节引出束流在 4 mA,先在 90°分析磁铁的输入端测量束流值 I_1 (氢原子离子束 H1⁺ 和氢分子离子束 H2⁺ 产生的综合电流),再在 90°分析磁铁的输出端(束流经过 90°偏转后,

氢原子离子束 $H1^+$ 产生的电流)测量束流值 I_2 ; 计算两者之比 I_2/I_1 即为原子比, 原子比应大于 70%。否则, 须调节氢气流量和磁场分布, 以使放电效果好。

8 综合参数测试方法

如图 8 所示, 综合参数测试在计算机监控状态下进行。

在计算机监控状态下, 将引出离子束流调节到 4.4 mA, 在计算机显示器上得到的参数分别为: 加速电极电压 30 kV, 抑制电极电压 1 kV, 分析磁铁线圈电流 20 A, 通过分析磁铁前后的束流分别为 4 mA 和 3.2 mA, 磁控管电流为 250 mA, 螺旋管线圈 A 电流 30 A, 螺旋管线圈 B 电流 25 A, 引出电极电压 5 kV, 微波入射功率 700 W。

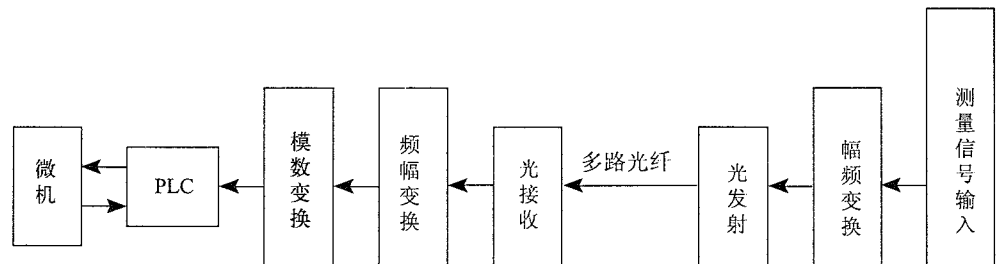


图 8 计算机监控综合参数测试框图

9 结 论

通过 ECR 离子源实验台参数的测试, 加深了对 ECR 离子源结构和性能的了解, 也为将来小型 ECR 离子源的研制打下了基础。因为把 ECR 离子源用于中子发生器在国内尚属首次, 相关参数测试方法的资料很少, 不少测试设备是自制的, 有些测试方法还处在摸索中, 所以在测试过程中难免存在误差, 遇到的问题也不少, 如放电室中的等离子体密度、准确的氢气流量等参数还无法在运行时测试。我们提出的解决办法是: 用朗法缪探针加动密封技术测试等离子体密度, 并标定其与离子束流之间的关系; 研制加工一套电动气体流量计, 在线测量氢气流量。

致 谢

对给予此项工作支持与帮助的所有同志表示由衷的感谢!