

CNIC-01920

CAEP-0205

ECR 离子源实验台的研制

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、基本结构和研制过程。作为实验和测试平台, ECR 离子源实验台可以很方便的调整离子源各参数, 在靶上得到好的束流品质。通过对部件的改进和调试, 解决了束流较小的问题, 使 ECR 离子源工作在最佳状态。上述结果可用于中子发生器的运行调试。因此, ECR 离子源实验台是强中子发生器所必需的实验设备。与国内外的 ECR 离子源相比, ECR 离子源实验台主要着眼于中子发生器的模拟实验, 在结构上强调小型化、实验平台化, 在功能上要求能够在线测量许多重要参数。测量结果表明, ECR 离子源实验台技术指标达到设计要求。

关键词: 实验台 ECR 离子源 中子发生器

Manufacture of an Experimental Platform with ECR Ion Source

(In Chinese)

ZHOU Changgeng HU Yonghong LI Yan

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

The working principle and basal configuration and fabricative process of ECR ion source are introduced. Regarding as an experimental and test device, the experimental platform of ECR ion source may expediently regulate every parameter of ion source, and achieve good character of beam current. Through improving on the components, ECR ion source can be modulated in best state. Above results may be used in the running and debugging of neutron generator. Therefore, the experimental platform of ECR ion source is the necessary equipment of large beam current neutron generator. Comparing the experimental platform of ECR ion source with domestic ones and the overseas ones, it mainly be used in the simulation experiments about neutron generator. It is compact and experimental platform mode in structure. It can focus the beam current and measure many parameters on line in function. The problem of lower beam current to discover is resolved in debugging of the device. The measurement results indicate that the technology character of the device have achieved design requirements.

Key words: Experimental platform, ECR ion source, Neutron generator

引言

ECR 离子源具有工作寿命长、束流强度大、性能稳定、无极、耐腐蚀和能在低真空下工作等优点,所以是使用在强中子发生器上最具发展前景的离子源之一^[1]。现有的直流强中子发生器采用的就是 ECR 离子源。但 ECR 离子源结构比较复杂,运行过程中由于各部件的参数相互关联、互相影响,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,使得大多数参数无法直接在中子发生器上进行实验和验证,这将影响中子发生器的工作状况。作为实验和测试平台,ECR 离子源实验台则可以很方便地对各参数进行优化组合,在靶上得到最佳的束流品质。通过对部件的改进,使 ECR 离子源工作在最佳状态,其结果可用于中子发生器的调试。因此,ECR 离子源实验台是强中子发生器调试运行所必需的设备。

美国、法国、日本、德国、俄罗斯、加拿大等国都建立了 ECR 离子源,并先后在离子注入、等离子体物理、微细加工技术、金刚石薄膜制备和化学气相沉积等许多领域得到了广泛应用。

近年来,中国科学院等离子体物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院和四川大学原子核科学技术所等单位也相继进行了 ECR 离子源的研制或应用。与国内外相比,我们的研制工作主要着眼于中子发生器的模拟实验。在功能和结构上主要是小型化、平台化,设有部分在线参数测量系统和束流分析系统。

1 ECR 离子源实验台结构和原理

ECR 离子源实验台的总体结构如图 1 所示。全套设备总尺寸约 $3\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 2\text{ m}$,为卧式结构。高约 1.5 m 的四根支柱用来支撑整个钢结构的低压平台(平台 1)。

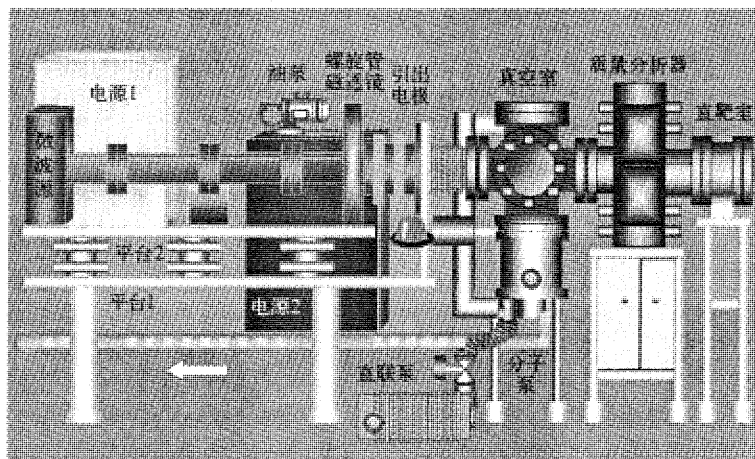


图 1 ECR 离子源实验台的总体结构设计图

高压平台(平台 2)由五个绝缘瓷柱支撑并与地电位隔离。微波源系统、引出电极、供气系统、螺旋管磁透镜安置在 30 kV 的高压平台上,设备的电源设置在 1 号电源柜中。

加速电压、抑制电源、 90° 质量分析器、变频器、隔离变压器等设置在 2 号电源柜中。真

空室是一个三通式不锈钢圆筒,上部固定了真空测量规管,下部连接分子泵。真空系统采用直联泵和分子泵组合。为了避免真空泵振动影响离子源工作,在真空室和引出电极之间采用了波纹管连接。在真空室后部是 90°质量分析器。直靶室和斜靶室分别接在质量分析器的 0°和 90°方向,用于测量分析前后的离子束。

ECR 离子源实验台的工作原理是:由于 Lorentz 力的作用,电子在磁场中沿磁场线回旋运动。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现象,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, k;

m ——电子质量, kg;

B ——磁场的磁感应强度, T。

对于 2.45 GHz 的微波频率,磁感应强度 B 约为 0.087 5 T(实测为 0.089 T)。电子和氢原子等粒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。磁场的综合作用导致等离子体有一个较长的约束时间,进而增加了碰撞概率,得到高密度的氢离子。氢离子由引出电极引出后形成能量为 30 keV 的氢离子束,经过 90°质量分析器得到氢原子离子(H_1)束。

2 设备的研制

2.1 自动控制系统研制

ECR 离子源实验台的测量与控制中包含两大部分。在低电压端,主要控制 30 kV 加速电源、5 kV 抑制电源、聚焦磁透镜电源、90°质量分析器、真空泵等设备的启动和停止,调节电压、电流和真空度的大小,测量显示上述设备的参数以及直流和脉冲束流值,提示束流品质和束流聚焦状态。

在高压平台上,主要测控磁控管及电源、螺旋管磁透镜和电流源、放电室和供气设备、引出电极。并在线测量微波入射功率、反射功率和气体流量等。

控制系统如图 2 所示。对于高压平台上的设备的测控,采用了光纤传输技术,既有效地

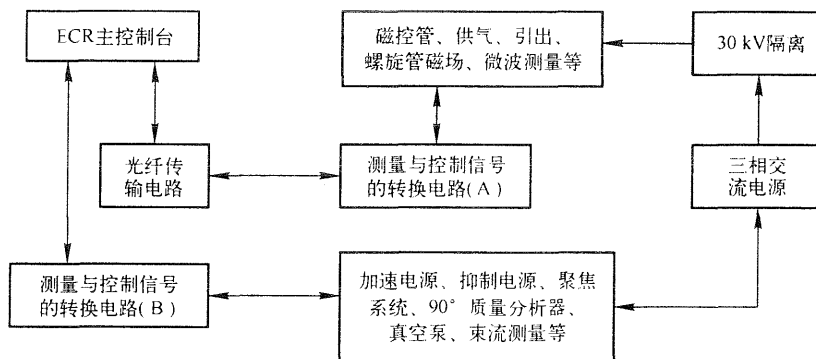


图 2 控制系统示意图

解决了高压绝缘问题,又提高了控制系统的抗干扰能力。ECR 主控制台安放在控制室,主要由微机、PLC(可编程逻辑控制器)、I/O(数字量输入、输出)接口、A/D(模拟量转换数字量)模块、D/A(数字量转换模拟量)模块、通讯协议转换器、光纤接口电路、功率驱动电路、过载保护电路、仪表、按钮和开关等组成。

由于采用了 PLC 和 I/O 接口电路,增强了控制和测量的可靠性,提高了运行速度。对控制容量和功能的变化,只需修改 PLC 软件。

30 kV 三相隔离变压器把头部的 30 kV 电位与地电位隔离,并输出 380 V 单相交流电为高压平台上的设备供电。通过测量与控制信号的转换电路(A),把高压信号变成低电压信号、把模拟量转换成数字量、接受来自控制台的光信号并转变成电信号、把测量到的信号转换成光信号并通过光纤发送给控制台。在低压平台上,除无光纤传输电路以外,其余和高压平台上的测控电路基本一样。

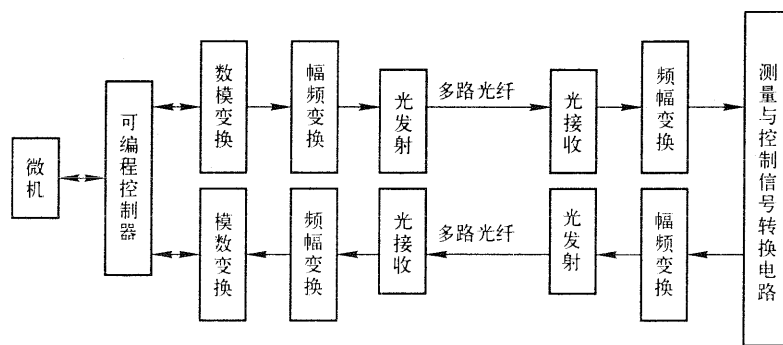


图 3 高压平台上的设备的测控原理

如图 3 所示,ECR 离子源光纤传输控制装置主要由微机、PLC、光电发射电路、光电接收电路、幅频变换电路、若干个幅频变换电路、多路光纤、测量与控制信号转换电路组成。微机与 PLC 之间,PLC 与 A/D 模块、D/A 模块之间,采用 485 串行总线通讯模式。其工作过程如下:设置在控制室的台式微型计算机把操作人员键入的命令转换成数字信号送到 PLC,PLC 把信号进行分析处理后再进行数模转换,经过幅频变换电路幅度转换成频率。

光发射电路频率转换成光信号后从光纤接口输出,输出光信号经光纤送至远端(ECR 离子源实验厅),由光接收电路还原成电信号再进行幅频变换,形成 0~5 V 的直流电平,送到控制信号输出电路。

测量信号经过上述反过程形成 0~5 V 的直流电平,被模数转换后变成十进制编码信号送 PLC,PLC 对信号进行处理后送微机,微型计算机根据具体情况进行显示、提示、存档或打印。

2.2 真空系统

真空系统是 ECR 离子源实验台正常运行的基础,真空系统的好坏直接影响到 ECR 离子源实验台的工作状态,根据 ECR 离子源正常工作时对系统真空($<4 \times 10^{-4}$ Pa)和系统内部清洁度的要求,在设计思路本着操作方便、高效和无油化的原则,选用了抽速 8 L/min 的直联泵(不需冷却)作为前级真空泵,选用抽速 1 500 L/min 的分子泵(无油污染)作为高

真空泵,在分子泵上方接一真空室,真空室两侧分别连接波纹管 and 90°分析室,顶部是金属热偶规管和金属电离规管及一个用铅玻璃密封的观察窗,以便于对系统低真空和高真空的测量,观察离子束流状况。在真空室侧面还装有放气阀,便于拆卸时对系统放气。分子泵及真空室安装在可调支架上方,便于安装时真空系统的上下调节。

真空系统具体运行过程如下:先启动直联泵,待前级真空小于 10 Pa 时,开分子泵冷却水,启动分子泵。分子泵正常工作时,高真空应小于 4×10^{-4} Pa。测试表明,该真空系统极限真空可达 9×10^{-5} Pa,其结构如图 4 所示。

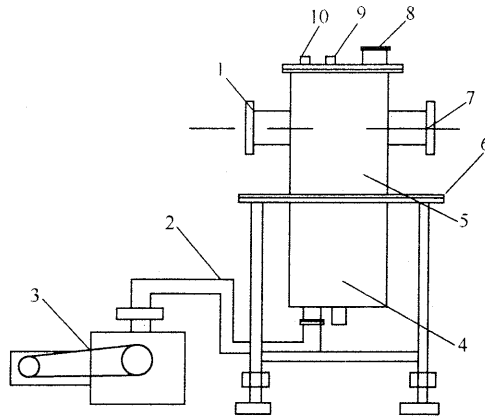


图 4 真空系统

1—波纹管连接法兰;2—前级真空管道;3—直联泵;4—分子泵;5—真空室;6—可调支架;7—分析室连接法兰;8—束流观察窗;9—金属电离规管;10—金属热偶规管

2.3 30 kV 直流高压电源

30 kV 直流高压电源的基本结构如图 5

所示。该电源采用交流 220 V 供电,用隔离变压器进行高低电压隔离。整流滤波后输出各组低压直流电源,再经过 DC/DC 电压变换,产生 0~30 kV(可采用手动和自动方式调节)的直流高压。从高压端取出电压与基准信号比较,将得到的差值放大后去控制 DC/DC 变换器的工作状态,从而达到输出电压稳定的目的。整个电源安装在 440 mm×200 mm×350 mm 机箱中。

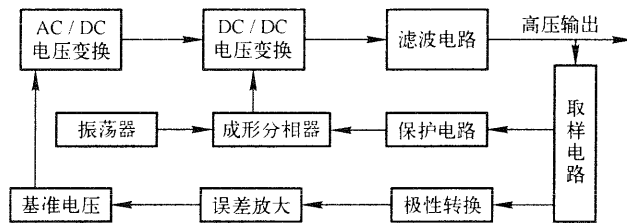


图 5 30 kV 直流高压电源方框图

2.4 冷却系统

高压平台上的大功率部件在运行时,需要冷却。用普通的水冷却存在绝缘问题。我们采用了变压器油循环冷却的方法。

其工作原理是:通过油泵将冷却油输送到 ECR 离子源需油冷的部分,如放电室、螺线管线圈、加速电极、抑制电极、引出电极等,热油回到油箱,水通过热交换器将油中的热量不断带出,热油温度降低,经热交换后的油再通过油泵继续对上述部件进行冷却,如此循环往复,达到较好的冷却效果,对 ECR 离子源关键部件起到良好的保护作用,较大的改善了 ECR 离子源的工作状态。

2.5 微波功率在线测量装置

如图 6 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。测量装

置由定向耦合器、检波器、衰减器、光纤传输电路、微机、微波功率表等组成^[1]。

在微波频率相对较低的范围,波导的尺寸很大,用于微波测量的定向耦合器随之增大,对微波源的结构具有较大的影响。如果采用主副波导平行的宽边或窄边多孔耦合,则隔离端的内置负载长度会使纵向尺寸很大,如采用纵向尺寸较小的十字定向耦合器,又会使横向尺寸增大,简单的探针耦合器,无方向性,不能用于定向测量。现设计的波导耦合线式定向耦合器则克服了上述缺点,图中的箭头表示微波测量方向。在波导的宽边中央开一个耦合圆孔,在圆孔的上边是一个一端接 50 Ω 匹配负载,另一端接同轴接头的耦合线。采用波导中心圆孔耦合,对耦合孔上耦合线进行激励,产生激励信号。

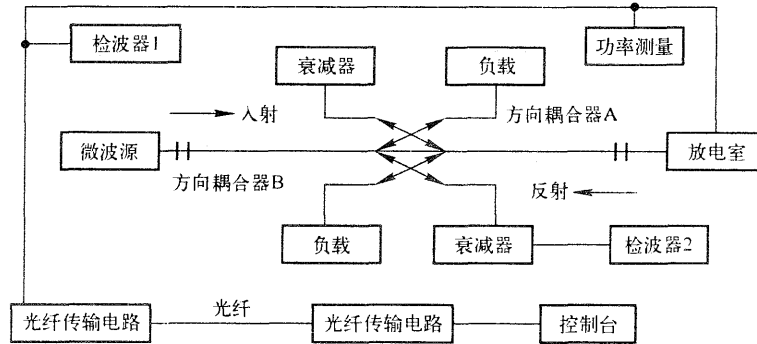


图6 微波功率在线测量装置原理框图

通过旋转耦合线与轴线之间的夹角,使之具有良好的方向性。把近似一个波导宽边长度内做成两个定向耦合器,使它们在相反方向取样,则构成小型化的入射方向耦合器 A 和反射方向耦合器 B。功率探头主要采用灵敏度高的微波晶体检波器,在研制过程中考虑了宽带匹配特性和灵敏度频率响应的平坦性。

2.6 离子成分及束流聚焦状态在线测量系统

图7是离子成分及束流聚焦状态在线测量系统框图。从离子源引出的离子束中多数离子都有横向速度,离子在传输过程中也可能与管道中的剩余气体分子进行碰撞而发生散射,这些因素使离子束呈发散状态,到达实验靶上的束流约几百 μA ,束斑直径很大。大部分离子则打到管壁上。我们在 90° 质量分析器和实验靶之间设置了一个螺旋管聚焦装置,对离子束产生会聚作用,实验靶上的束流最大时(13 mA),束斑直径最小可达到 10 mm。线圈电流大小的调节由控制台通过电源柜实现,束流聚焦状态的变化,最终由束斑直径决定。为了有效地测量束斑直径,在实验靶和螺旋管聚焦装置之间设置一个锥形光

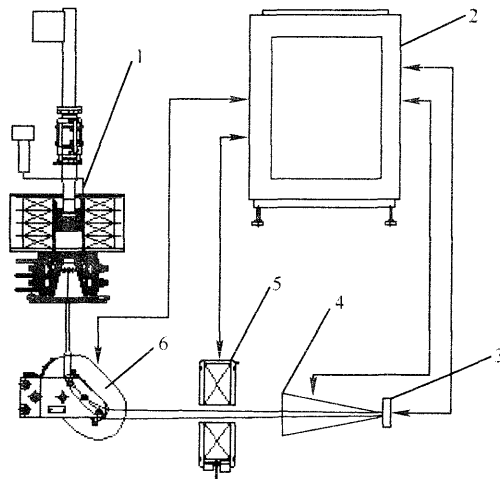


图7 离子成分及光学特性在线测量系统框图
1—ECR离子源;2—电源柜;3—实验靶室;4—锥形光阑;
5—螺旋管聚焦装置;6— 90° 质量分析器

阑,锥形光阑后部设有一个移动式收集极和移动式观察窗,通过比较收集极关闭前后的电流值、光阑上的电流值、靶上电流值,决定束斑直径的大小。用电视摄像系统也可观察到移动式观察窗上束斑直径的大小。通过调节磁场、引电极和聚焦透镜可以改善聚焦状态。

束流成分反映放电效果的优劣,90°质量分析器是在线束流成分检测的重要部件,它的作用是将离子束按质量数的不同分成几束,使所需要的原子离子束到达实验靶室,给出其所占比率(原子比),并将结果传送到控制台。质量分析器由励磁线圈和真空盒组成。质量分析的原理可由下式给出,

$$BR = \sqrt{2mE}/q \quad (2)$$

式中: B ——磁感应强度,T;

R ——离子偏转半径,cm;

m ——离子质量,kg;

E ——离子能量,keV;

q ——电荷量。

通过调节螺旋管磁透镜电流、气流量和质量分析器磁感应强度,可改变原子比,ECR离子源原子比成最好的结果为75%。

3 测量结果

将自研的设备与引进的微波源,分析磁铁等组合安装在一起,并进行调试。在调试中,用软铁进行有效屏蔽,解决了磁感应强度偏低,不能有效的约束等离子体的问题;通过改造磁控管直流电源使微波入射功率稳定;重新设计了引出电极尺寸和束流通道的“对中”,解决了直流束流偏小的问题;在放电室出口,采用了石英环,增大了离子密度,使引出束流增大了30%。主要参数的测试结果如下:

(1)用数字真空计测得系统的真空度为 9×10^{-5} Pa,超过设计要求;

(2)当两组磁场线圈A和线圈B的工作电流分别为30 A和28 A,用特斯拉计和轴向HOLL探测器测量了两组螺旋管透镜共生磁场,测得磁感应强度约0.089 T,图8是轴向磁场分布图;

(3)用郎缪探针系统测得最大离子体密度约为 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$;

(4)在直流束流为10 mA状态下,用在线微波功率测量装置测得微波输入功率最大值约为600 W左右,反射功率表最大值约为80 W左右,基本符合设计要求;

(5)在实验靶上,测得最大氢离子束流约13 mA;原子比为75%。

4 结 论

与国内外的ECR离子源相比,ECR离子源实验台主要着眼于中子发生器的模拟实验。在功能和结构上主要是小型化、平台化和具有在线参数测量系统。ECR离子源实验台的技

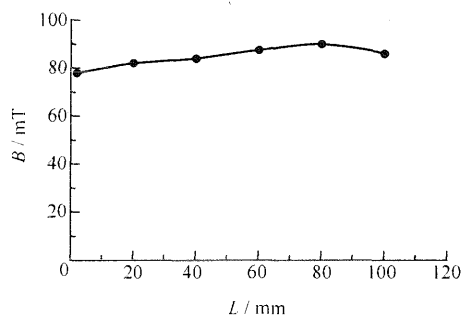


图8 微波信号源轴向磁场分布

术指标达到了设计的要求。在 ECR 实验台上调试和测试的数据已经成功地运用于强中子发生器。ECR 离子源实验台研制项目最近通过了国家级验收。

致 谢

中物院核物理与化学研究所的姜本超、伍春雷、黄瑾、刘湾、李艳、张钦龙等同志参加了部分研制工作,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 周长庚. ECR 离子源在线功率测量微波功率[J]. 强激光与粒子束, 2005, 9: 1394~1398