

# 超导高电荷态 ECR 离子源\*

## ——一个引进、消化、吸收、再创新的典范

中国科学院近代物理研究所

(兰州 730000)

关键词 超导高电荷态, ECR 离子源技术

由中科院近代物理研究所(简称近物所)承担的中科院知识创新工程重大项目“超导高电荷态 ECR 离子源”于 2006 年 10 月通过技术鉴定。包括方守贤等 7 位两院院士在内的专家鉴定委员会,审核和认可了由中国、美国、日本、俄罗斯 4 个国家专家组成的技术测试小组提交的测试报告,并进行了现场考察,一致认为该项目在高电荷态离子束流强度指标方面创造了多项国际记录,是当前世界上性能最好的高电荷态 ECR 离子源之一,在高电荷态 ECR 离子源技术方面处于国际领先,对 ECR 离子源技术发展起到了引导作用。

ECR(电子回旋共振)离子源,以其产生的离子种类多、束流强度大、电荷态高、束流品质好、稳定性和重复性高、可长期连续运行等优点,被国际上公认为当前产生强流高电荷态离子束最有效的装置。自上世纪 70 年代末在法国诞生首台 ECR 源以来,其发展非常迅速,竞争也很激烈。迄今,法国、德国、瑞士、美国、日本等国的著名核物理实验室已有近百台高性能 ECR 源为各类重离子加速器采用;同时,ECR 源的发展又为其它学科领域开辟了诸多新的研究方向,如高离化态原子物理、表面物理、材料科学研究等;除应用于基础研究外,ECR 源还广泛应用于离子注入、离子束刻蚀、薄膜技术、离子束

沉积、材料表面改性、辐照育种等工农业生产;在医学上可作为优良的紫外光源,用于消毒处理;它还是优良的 X 射线发射源,用于 X 射线相关应用领域。

ECR 离子源的研制走的是引进、消化、吸收、再创新的道路。1991 年,近物所从法国引进了 1 台微波频率为 10GHz 的 ECR 源装备到兰州重离子加速器(HIRFL)上,投入运行后立即扩展了 HIRFL 加速离子的种类、提高了束流强度,特别是 ECR 源可以长期连续运行,使 HIRFL 的运行效率从原来的 30%左右提高到 60%以上,充分显示出其优越性。

受此鼓舞,近物所的 ECR 源研究日趋活跃和深入,一直处于国际前沿。在对这台引进的 ECR 源进行改造使各项指标明显提高之后,1993 年自行研制成功我国第一台 10GHz 高电荷态 ECR 源,在国际上首次发现并成功应用了一种新的工作模式和新的磁约束场形,率先试验成功冷阴极电子枪,各项指标达到国际先进水平,获中科院科技进步奖二等奖和国家科技进步奖三等奖。1997 年后,又先后研制成功两台 14.5GHz 高电荷态 ECR 源,在国际上率先试验成功高磁场模式和大体积弧腔,使高电荷态重离子束流强度大幅度提高,并产生了多种金属高电荷态重离子束流,部分指标达到当时国际同类装置最高指标,2000 年获中科院科技进步奖一等奖。2005 年 6 月,HIRFL 首次

\* 收稿日期:2007 年 2 月 25 日



中国科学院

加速成功最重的铀离子束并用于实验研究,标志着 HIRFL 实现了全离子(质子到铀)加速,使之进入国际上为数不多的大型全离子加速器行列,这其中自主研发的高电荷态 ECR 源发挥了决定性的作用。近物所还用 ECR 源装备了两套主要用于原子物理、表面物理和材料科学的研究平台,一套已为 30 多项国内外实验研究提供了各种低能高电荷态重离子束流;另一套是国际上少有的 320 千伏高压全离子综合研究平台,为我国高剥离态原子物理等有关领域研究创造了先进的实验条件。另外,还为美国的一家高技术公司、中科院兰州化学物理所、兰州大学等单位研制了低电荷态强流 ECR 源和 2.45GHz 强流质子 ECR 源,用于多学科的应用研究。

世纪之交,近物所负责的国家“九五”最大的科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)开始设计建造,CSR 对作为注入器的 HIRFL 的束流强度提出了新的更高的要求。于是,研制 1 台流强更大的超导高电荷态 ECR 离子源(SECRAL)的任务提了出来。在中科院和科技部的支持下,这台离子源作为中科院知识创新工程重大项目于 2002 年开始建造设计。

SECRAL 是目前国际第三代高电荷态 ECR 离子源的典型代表之一。研制人员以创新的物理思想和技术路线,将高磁场、高微波频率、多频微波馈入、大体积弧腔、向 ECR 等离子体提供额外电子这 5 大新技术集成于一体,其创新点是:突破传统的 ECR 源磁体结构,采用了全新的超导磁体结构,创造性地把产生六极场的六极线包置于产生磁镜场的轴向线包外部,从而大幅度减小了超导线包之间的作用力,降低了加工和整体组装难度;在 ECR 源超导磁体中首次采用“冷铁”结构,利用铁磁元件作为夹具,既可固定超导线包,又可提高磁场,并使源体

结构紧凑,非常有利于强流高电荷态重离子束的产生和引出。SECRAL 全新的设计和结构开辟了高电荷态 ECR 离子源的一个新的发展方向。整个系统主要由超导离子源源体和外围系统构成,外围系统主要包括微波系统、氦液化站,金属离子产生装置,聚焦、分析、测量系统,控制、联锁、保护系统和电源系统等。目前,该离子源产生的  $^{16}\text{O}$ 、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{129}\text{Xe}$ 、 $^{40}\text{Ca}$ 、 $^{58}\text{Ni}$  及  $^{208}\text{Pb}$  等各种高电荷态离子束的电荷态和束流强度,均超过了设计任务书的预期目标;该离子源具有代表性的高电荷态离子束流强度,如  $785 \text{ e}\mu\text{A O}^{7+}$ 、 $505 \text{ e}\mu\text{A Xe}^{20+}$ 、 $287 \text{ e}\mu\text{A Ca}^{11+}$ 、 $90 \text{ e}\mu\text{A Pb}^{30+}$  等等,是目前国际上同类离子源的最高纪录;利用该离子源提供的高电荷态离子束连续进行两周的原子物理实验表明,离子源源体和辅助系统的运行是稳定可靠的。SECRAL 的研制成功,很好地满足了 HIRFL-CSR 大科学工程的要求。

超导高电荷态 ECR 源的研制实现了创新跨越,其项目组是一个敢于创新和善于创新的青年创新团队。该项目负责人赵红卫研究员,早在 1992 年就被他的导师、时任近物所所长的魏宝文院士派往俄罗斯杜布纳联合核子研究所,作为合作培养的博士研究生进行重点培养,1995 年学习结束时他获得该所科研成果一等奖和俄罗斯 Flerov 青年科学基金奖。回国后,他在 ECR 源研制中连续取得创新成果,组织完成 HIRFL 的几个改造项目;负责与俄罗斯合作研制的 CSR 电子冷却装置在国际上首次实现“空心”电子束等。在他的带领下,项目组与国内外同行进行充分的交流,对 SECRAL 的技术方案多次优化,对一些关键技术联合攻关,最终的调试结果及其优越的性能充分证明了 SECRAL 技术路线的科学性和合理性。

(相关图片请见封三)