

超导技术在 ECR 离子源上的应用

孙良亭 赵红卫

(中国科学院近代物理研究所 730000)

一、ECR 离子源是怎么工作的

1. ECR 离子源的原理

ECR 离子源是一种磁约束微波等离子体装置。当微波频率与电子在磁场中的回旋共振频率相等时,等离子体中的电子为馈入微波电场所加热,荷能电子受离子源磁场约束,可以多次被微波加热从而获得更高的能量,离子受电子的空间电荷力约束,从而有足够的时间能够被高能电子通过逐级剥离达到高电荷态,高电荷态离子进入引出区被引出系统引出就形成高电荷态离子束。可以看出,高性能的 ECR 离子源核心技术主要由三个方面构成:微波技术、磁场技术、离子源专属技术,其中磁场技术就是要设计构建一个被称为“三维最小 B”或“min-B”的等离子体约束磁场(图 1),该磁场的构建从一定程度上来说直接决定了离子源的性能。

2. ECR 离子源的磁场结构

高电荷态 ECR 离子源的约束磁场是一种 min-B 构型的场型,它是由轴向螺线管线圈产生的磁镜场与径向多极磁铁(一般为六极)产生的径向多极磁场叠加而成, $|B|$ (三维总磁场)等势面彼此嵌套,并且 $|B|$ 由内向外逐渐增加。轴向磁镜场可以由多组室温水冷螺线管、永磁环以及超导螺线管产生,而径向磁场受经济性与可用性制约,只有永磁多极磁铁与超导多极场线圈两种解决方案,通过轴向磁镜场与径向多极磁场产生磁场技术的选择与组合,可以构建不同类型的 ECR 离子源,目前主要有 4 种:超导 ECR 离子源、混合超导 ECR 离子源、常温 ECR 离子源以及全永磁 ECR 离子源。

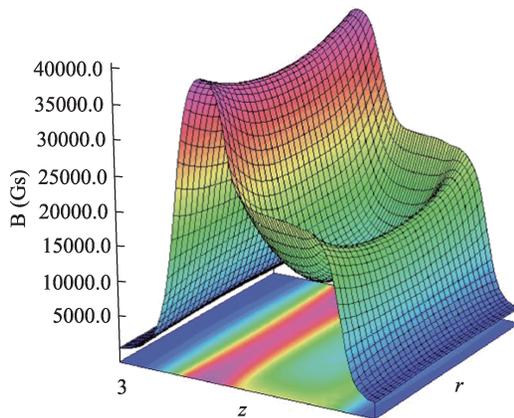


图 1 高电荷态 ECR 离子源的“min-B”等离子体约束磁场场型

3. ECR 离子源的应用举例

ECR 离子源目前主要作为离子加速器的注入器装置与离子束平台离子产生装置,基于核物理与原子物理研究的进展,产生了一系列重大应用与研究方向。在核物理基础研究方面,ECR 作为注入器离子源在兰州重离子加速器装置 HIRFL(图 2)、日本理化研究所 RIKEN 的重离子加速器设施 RIBF、美国稀有同位素束流装置 FRIB、法国大型重离子加速器设施 GANIL 等大科学装置上得到了很好的应用与发展。在新元素的探索方面,ECR 离子源为中国的超重元素合成装置 CAFE-2、俄罗斯的超重元素工厂 SHE、日本的超重元素合成装置 RILAC 等提供了 ^{48}Ca 、 ^{51}V 、 ^{54}Cr 等元素的强流高电荷态离子束流。重离子治疗是目前最有效的肿瘤放射性治疗方案之一,发展至今已近 50 年时间,尤其是在最近 20 年发展迅速,全球范围内已先后建成专用治疗装置数十台(图 3),主要分布在亚洲、欧洲,治疗方案所采用的碳离子,均由高电荷态 ECR 离子源产生。航

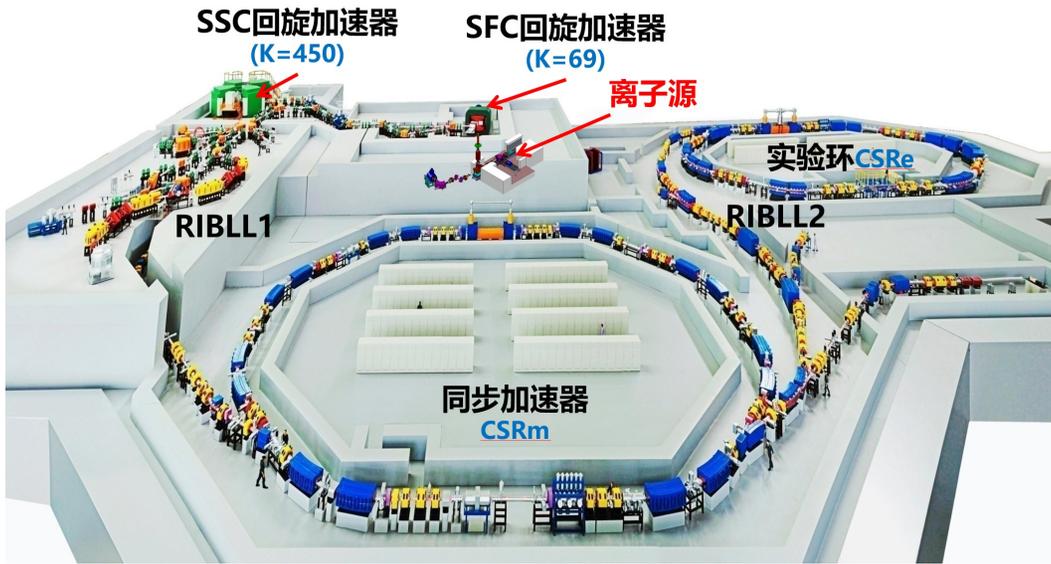


图2 兰州重离子加速器装置HIRFL

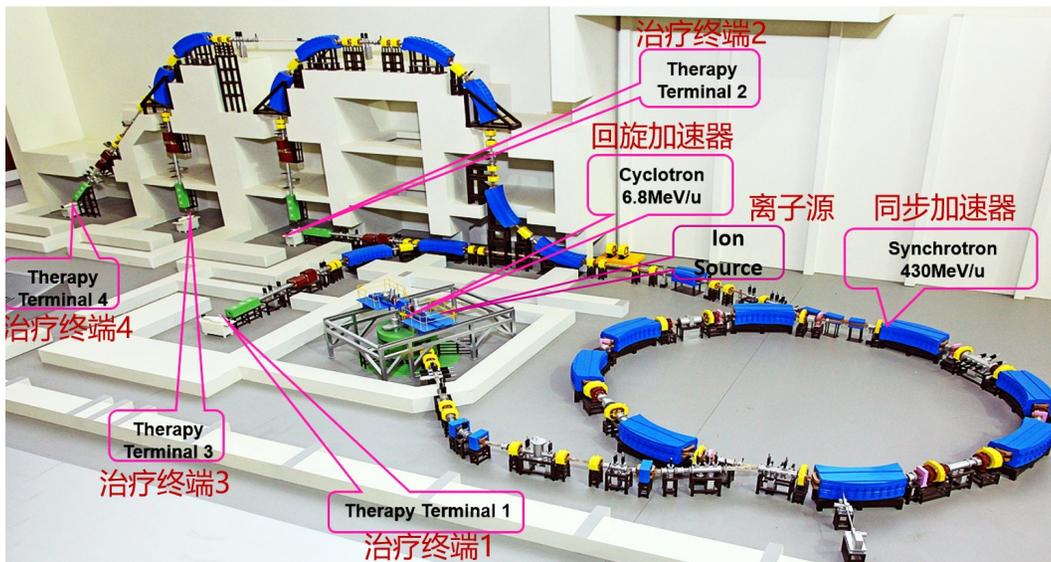


图3 国产重离子治疗装置HIMM

天器在复杂空天环境中的所有故障里,大约45%的故障是来自高能离子的单粒子效应所造成的,为实现全LET(Linear Energy Transfer)范围内的单粒子效应地面模拟检测,需要提供高电荷态的重离子,目前高电荷态ECR离子源的全离子(氢~铀)产生能力,为该项研究及应用提供关键技术条件。此外,高电荷态ECR离子源产生的重离子还大量用于先进材料探索、抗辐照材料快速评估、离子束诱变农作物育种等研究应用。

二、ECR离子源的发展与超导技术

1. ECR离子源在全球的发展与主要类型

ECR离子源由Richard Geller于上世纪60年代末提出并完成原型样机研制,早期的ECR离子源结构复杂,系统庞大,电功耗甚至达到3 MW,限制了其应用与发展。在探索发展性能更高、功耗更低、结构更紧凑的装置过程中,研究人员逐渐将铁钨技

术、永磁技术及超导技术应用到 ECR 离子源的发展中,并先后取得了极大成功,研发出以 CAPRICE、AEER、ECR4、NANOGUN 等为代表运行在 10~14 GHz 微波频率的高性能 ECR 离子源系列,这些离子源一般被纳入第二代高电荷态 ECR 离子源,其发展不仅使 ECR 离子源具备产生强流高电荷态离子束的能力,同时也使得 ECR 离子源物理与关键技术得到了进一步深化与提高,能够满足加速器运行的需求。这样,自 20 世纪 80 年代末,高电荷态 ECR 离子源陆续投入重离子大科学装置的运行,这些二代装置至今仍是国际上重离子加速器运行的主流注入器离子源。

2. 超导技术与 ECR 离子源结合的必然性

随着高电荷态 ECR 离子源投入更广泛的运行与使用,对更高电荷态、更高流强的重离子束流的需求愈发强烈。更高的电荷态可显著提高加速器的加速效率、降低加速器建造成本与规模,而更高的流强则可显著提高目标物理事件的产额与几率,从而显著提高测量的精度与准确性等。更高流强的获得需要制备更致密的等离子体,ECR 离子源是一种微波加热磁约束等离子体,其等离子体的截止密度正比于加热微波频率的平方,因此要获得更高的流强需要离子源工作在更高的微波频率,同时高电荷态离子的产生有赖于很好的磁约束,“min-B”磁约束构型要求轴向磁镜峰场与径向多极场要达到 2~4 倍于加热微波对应的电子回旋共振磁场,因而随着微波频率的提高,需要离子源磁体提供更高的约束磁场。当 ECR 源发展到 18 GHz 以上时,常温磁铁技术就无法满足有效磁约束的基本条件,必须借助于更强的磁场产生方式即超导磁铁技术,来推动高电荷态 ECR 离子源的发展,以获得更高流强的高电荷态离子束。

三、超导技术在 ECR 离子源上的应用

1. 超导技术在二代装置上的成功应用

早在 20 世纪 70 年代末,为研制更紧凑、更低功

耗的 ECR 离子源,在 Nouvain-la-Neuve、Karlsruhe、Jülich 等地的离子源研究室率先开展了超导技术的应用研究。但受限于当时的超导磁体技术发展水平,这些实验室研制的超导离子源并未实现预期目标。超导 ECR 离子源磁体研制的主要挑战在于励磁后复杂轴向磁镜场线圈与径向六极线圈间的作用力,以及对对应要解决的六极线圈研制工艺与集成装配技术。为规避该技术风险,诸多实验室着手研制混合型超导 ECR 离子源,即轴向磁镜场由一组超导螺线管提供,径向六极场则由永磁铁产生,代表性的是日本理化研究所 RIKEN 于 2000 年左右研制成功的 SHIVA 与 RAMSE 离子源。SHIVA 与 RAMSE 离子源可运行于 14.5 GHz 微波频率,超导螺线管采用无液氦传导冷结构,使用 GM(Gifford-McMahon)制冷机传导直冷,在实现较高性能运行的同时具有功耗低的优势。该类型的 ECR 离子源由于兼顾了较高的性能与运行经济性的优点,具有很好的应用前景,成为应用型高电荷态 ECR 离子源的一个发展方向,如法国 PANTECHNIK 公司研制的 PKISIS 离子源、INFN/Catania 研制的 Aisha。将高温超导线材应用于该类装置也获得了成功,法国 IN2P3/Grenoble 实验室就采用了 Bi-2223 超导线材,利用传导冷结构成功研制了可工作在 18 GHz 的 Phoenix V2 离子源。中国科学院近代物理研究所最新研制的 HECRAL 混合超导离子源利用最新的高剩磁 NdFeB 六极磁铁技术,结合 4 组轴向 NbTi 超导螺线管,研制成功了可运行于 18~24 GHz 的高性能 ECR 离子源,其主要高电荷态离子束产生能力已达到同频率全超导 ECR 离子源的水平,具备稳定产生 1 毫安强流 C⁴⁺离子束的能力,为我国第二代先进重离子治疗装置的发展提供关键技术条件。

2. 最先进的三代装置与超导磁体技术

基于下一代放射性同位素研究装置 RIA(即后来建成的稀有同位素束流装置 FRIB)项目需求,美国伯克利实验室 LBNL 启动了第三代 ECR 离子源的研制。该离子源命名为 VENUS,目标运行在 28

GHz微波频率,以期产生数倍于当时国际最高记录的高电荷态离子束流强度,特别是高电荷态 U^{33+} 、 U^{34+} 离子。在物理设计上充分借鉴SERSE离子源研究成果的基础上,VENUS采用了全新的技术路线来实现高场“min-B”磁场构型超导磁体的研制。VENUS设计采用高铜比的NbTi超导圆线(螺管的Cu/SC=4.0,六极线圈的Cu/SC=3.0),所有线圈都采用湿绕工艺。轴向磁镜由三组螺线管产生,径向六极场由6个近似于跑道形的六极线圈提供,导体励磁后最高磁场可达7.3 T,总储能0.715 MJ,采用被动失超保护。为实现复杂应力结构下线圈的可靠约束,VENUS上首次采用了Bladder & Keys的设计方案,并大获成果,结合铝壳结构实现了对冷体上预应力的精确控制与结构约束,磁体在励磁达到目标后,即使经过多次冷热循环,再次降温至液氮运行温度,励磁到工作点仍然很少失超,显示出该结构的可靠性与稳定性。VENUS离子源于2002年正式建成并开始调试,随后逐步从18 GHz运行频率升级到28 GHz运行频率,进一步推动了高电荷态ECR离子源的发展与进步,成为首台第三代高电荷态ECR离子源装置,引领了ECR离子源技术的发展,其中采用液态金属Bladder & Keys的预应力控制技术为西欧核子中心(CERN)HL-LHC升级项目的高场 Nb_3Sn 超导四极磁体装配技术所借鉴。美国FRIB项目的第一台超导ECR离子源也采用了VENUS的设计。

在VENUS超导离子源研发如火如荼的时刻,位于兰州的中国科学院近代物理研究所在中国科

学院“知识创新工程”的支持下,于2001年也适时启动了超导离子源的攻关研究。由于当时国内缺乏超导磁铁技术的积累,沿着VENUS类似的超导磁铁构型的技术路线,存在极大的挑战与不确定性,在此情况下,我们提出了一种反向磁体结构,也被国际同行称为“Outside-in”或“Reversed”的结构。这种结构将六极线圈外置(图4),超导螺管内置,并采用大量铁轭来提高励磁效率并降低漏磁,采用外部铝环热套,通过过盈量精确控制来实现对超导线圈预应力的控制,与VENUS的传统结构相比,可显著减小冷质量,减小六极末端作用力,避开了需要采用更为复杂精确装配技术的挑战。该设计在国际上一经报道,就引起了强烈的反响,大多是对该结构不看好,主要是认为它的反向结构产生的“min-B”磁场不利于高电荷态离子产生。为此,近物所开展了基于三维场构型的反复核算分析,确定可建立与传统结构一样的“min-B”磁场。该磁体于2005年研制成功,并于同年搭建离子源平台调试产生强流离子束,该离子源命名为SECRAL。自2006年开始,SECRAL离子源充分利用其超导磁体结构上的优势(紧凑、更短的束流引出系统),产生了多项强流重离子束流的国际记录,与美国的VENUS离子源开始了长期的“PK”模式,这种状态一直持续到了2016年。随着全新一代28 GHz超导ECR离子源SECRAL-II的研制成功,再加上以先进微波耦合技术、高温金属蒸发技术、微流道冷却弧腔等先进技术的突破,在强流高电荷态离子束产生方面取得全面超越的优势。回顾先进超导离子源技术的发

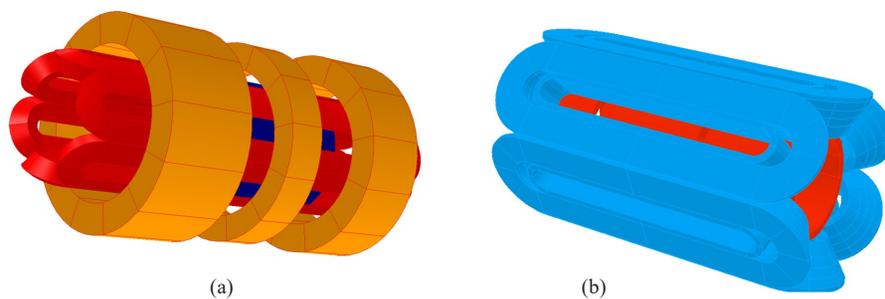


图4 传统超导ECR离子源磁体结构(a)和新结构的SECRAL磁体结构(b)

展,除了原始创新的技术突破,还需要一批优秀的超导技术企业的支撑。SECRAL的超导磁体受限于当年国内超导技术的发展,只能委托德国ACCEL公司进行加工,而10年后SECRAL-II的研制,近代物理研究所就联合西安聚能超导磁体科技有限公司成功完成了超导磁铁研制的技术攻关,基于该合作基础,SECRAL超导离子源已发展成系列,最新研制的SECRAL-III与IV离子源(图5)将于2024年底投入调试运行。



图5 SECRAL-III超导离子源磁体

四、下一代超导离子源磁体技术与挑战

1. 下一代ECR离子源超导磁体发展现状与挑战

核科学的发展需要更高流强的重离子束流,现有的三代装置已很难满足其日益增长的需求,为此拟工作于40~60 GHz的第四代装置研制被提上日程。现有的三代装置,以SECRAL为例,其储能达到0.7 MJ, NbTi导体最高载流系数已达到91%之高,这基本上接近了NbTi超导磁体可以长期稳定可靠运行的极限。为此,下一代超导磁体将优先发展基于更高磁场、更高载流能力超导体的超导磁铁

技术,综合技术成熟度与性价比, Nb₃Sn超导线材为最佳选项。基于LARP(LHC Accelerator Research Program)在Nb₃Sn超导四极铁研究方面的进展,美国LBNL实验室最早于2008年提出了基于Nb₃Sn Rutherford缆的四代离子源磁体结构设计概念,但由于多方面原因,该项目最后仅停留在初设阶段。近代物理研究所于2015年通过国家自然科学基金委的支持,正式启动第四代离子源FEER的研制。由于ECR离子源若采用传统Rutherford缆的方案,会面临高功率低温杜瓦、大电流电源(8 kA左右)等多方面的挑战,很难作为注入器离子源独立运行,技术瓶颈不可逾越,为此而采用单根股线的技术方案,但此方案也带来了其他的挑战。Nb₃Sn股线具有易损、应力敏感、失超传播速度慢等问题,采用单股线绕制的线圈,特别是六极线圈,在线圈制备过程中就存在结构尺寸不易保证、丢匝、填充系数低、易断裂等一系列工艺难点;同时由于采用股线绕制,同样的线圈需要更多的匝数,总电感大幅上升,失超保护时为在较短的时间内快速卸能保护线圈,需要选择较高的卸能电阻而导致卸能电压高达1.0 kV以上,这对工作于He氛围的超导线圈与引线而言挑战极高;由于Nb₃Sn对应力很敏感,因此要对预紧力的精确控制,需要发展精确的应力设计、分析方法,采用Bladder+Keys的精确装配技术,同时需要引入精确的应力应变监测手段来量化评估预应力加载效果。FEER的研制过程中,以上技术挑战都存在,目前已基本逐个攻克。磁通跳跃(即Flux Jump)是高场Nb₃Sn线材绕制磁体在励磁过程中出现的挑战,由于“min-B”构型磁场的特点,FEER在整个励磁过程中都存在很多大电流、低磁场区域,因而磁通跳跃现象会伴随整个过程,由于各线圈间存在互感,磁通跳跃会被叠加、放大,误触发失超与触发真实失超常有发生,因此需要发展有效的磁通跳跃规避技术,基于机器学习的智能识别分析技术或能提供有效的解决办法。

目前,第四代ECR离子源技术在全球范围内已进入新一轮的角逐期,在近代物理研究所开展FE-

CR 研制的同时,美国 FRIB 项目与 LBNL 实验室合作正在推进基于小缆(mini-cable)Nb₃Sn 六极线圈 ECR 离子源的研制。同时,LBNL 实验室的另一支团队,正在尝试采用基于“Ioffe-bar”全新磁体结构,用 NbTi 超导线材,研制建造可运行在 45 GHz 的超导 ECR 离子源 MARS-D。但无论按照哪一条技术路线推进,都存在对应的挑战与技术不确定性,因而合理研发策略的制定是事关成败的关键。近代物理研究所主导研制的 FECR 将按照三步走的技术路线,第一步,成功研制全 Nb₃Sn 的 1/2 长度样机(图 6),由于在其测试中发现了磁通跳跃与失超保护方面的挑战(当前无可靠解决方案),决定采用 Nb₃Sn 螺线管与 NbTi 六极线圈混合组装超导磁体的方式完成 28~45 GHz 超导离子源的研制;第二步,采用全 Nb₃Sn 股线绕制线圈,实现离子源磁体的性能升级;第三步,六极线圈将采用 Nb₃Sn 小缆,轴向螺管将采用 Nb₃Sn 股线的改进方案,以使超导磁体可以运行在更高的磁场与储能状态,且能将失超风险降至最低,此时 FECR 具备运行在 50~60 GHz 微波频率的能力。截至此文撰写时,第一步已顺利完成,磁体(含低温恒温器)已成功励磁至设计目标(图 7)。

2. ECR 离子源超导磁体发展展望

从前面的论述不难发现,高性能 ECR 离子源的发展离不开超导技术的支撑,高性能的超导 ECR 离子源基本上采用的都是最先进的超导磁铁技术,同时把超导磁体的可用性能推到极致,这需要非常完备的超导技术的支撑,同时在一定程度上推进了加速器超导磁铁技术的发展。如基于 FECR 在近物所的研制,我们发展了较为成熟的大电流超导电源技术、失超探测与保护技术、精确的线圈装配技术及测试技术等,为正在建设中的两个“十二五”大科学装置 HIAF 与 CiADS 中的超导磁铁研制提供了关键技术支撑,同时以复杂磁通跳跃问题解决为目标,可推动新的学科研究发展。另一方面,ECR 离子源技术仍在持续发展,需求依旧旺盛,更高频率 ECR 离子源的研制将寄希望于更高性能超导线材如高温超导材料的进步,或发展创新的、产生有效磁场效率更高的新型超导磁铁结构(图 8)。对于 Nb₃Sn 超导线材,当磁体最高场达到 16 T 以上就很难再继续使用它产生所需磁场,因而对于 60 GHz 以上的 ECR 离子源,则需要更高临界磁场/电流的超导体。近几年,以 YBCO 为代表的多种高温超导材料发展



图 6 FECR 超导离子源磁体 1/2 尺寸样机



图7 FECR超导离子源磁体

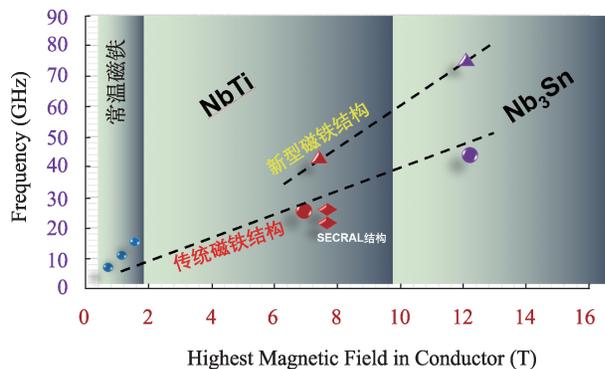


图8 下一代ECR离子源磁体技术的发展

迅速,并已有成功应用于高场磁铁研制的案例,这将为更高一代(>60 GHz)超导ECR离子源的发展提供可能。同时,类似于MARS-D所采用的能够充分利用线圈励磁磁场(提高在工作区的有效磁场为目标)的新磁体结构,一旦成功,也具备仅利用Nb₃Sn材料发起向60 GHz以上运行频率冲击的可能。

参考文献

- [1] R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasma*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1996.
- [2] D. Hitz, A. Girard, G. Melin, S. Gammino, G. Ciavola, and L. Ce-
lona, Results and interpretation of high frequency experiments at
28 GHz in ECR ion sources, future prospects, *Rev. Sci. Instrum.*,
2002, 73(2): 509.
- [3] T. Nakagawa, T. Kurita, M. Kidera, M. Imanaka, Y. Higurashi, M.
Tsukada, S. M. Lee, M. Kase and Y. Yano, Intense beam produc-
tion from RIKEN 18 GHz ECRIS and liquid He free SC-ECRISs,
Rev. Sci. Instrum., 2002, 73(2): 513.
- [4] D. Leitner, C.M. Lyneis, S.R. Abbott, D. Collins, R.D. Dwinell, M.
L. Galloway, M. Leitner, D.S. Todd, Next generation ECR ion sources:
First results of the superconducting 28 GHz ECRIS- VENUS, *Nu-
cl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*, 2005, 235: 486.
- [5] H. W. Zhao, L. T. Sun, X. Z. Zhang, et al., Advanced superconducting
electron cyclotron resonance ion source SECRAL: Design, con-
struction, and the first test result, *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, 77: 03A333.
- [6] C. Lyneis, Conceptual Design of a 56 GHz ECR Ion Source Mag-
net Structure, *Proceedings of ECRIS08, Chicago, IL USA*, [https://
accelconf.web.cern.ch/ecris08/talks/tuco-a01_talk.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/ecris08/talks/tuco-a01_talk.pdf).
- [7] M. Juchno et al., Shell-based support structure for the 45 GHz
ECR Ion Source MARS-D, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2022,
32(6): 4101005.
- [8] Liangting Sun, Wei Wu, Beimin Wu, et al., Development of a 1/2-
length prototype high field Nb₃Sn magnet for the 4th generation
ECR ion source, *Acta Mech. Sin.*, 2024, 40: 723376.