

320kV 低能重离子综合研究平台

李锦钰, 张桐民, 李军, 康龙, 周军军, 杨雅雯, 魏海元, 王富河

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 320kV 低能重离子综合研究平台是中国科学院近代物理研究所自主研发的低能、强流、高电荷态静电高压加速器装置, 应用于高能量密度物理、原子物理、低能核天体物理等基础前沿研究, 并在核材料研发及现役反应堆延寿方面支持国家发展战略。近年来, 为满足多学科科学实验需求并培育新的应用方向, 运维团队从实验功能开发、装置性能提升、实验效率提高等方面对平台开展了一系列改造工作。新开发了高温-应力材料辐照、低温环境材料辐照、脉冲离子束等实验功能; 提高了数据采集及样品切换效率, 提升了束流强度、离子电荷态等束流指标, 实现了溅射法产生高温难熔金属离子。为国内 80 余家高校及科研院所的科学实验提供了不可或缺的重离子技术服务, 服务成效显著。

关键词 高压加速器; 功能开发; 升级改造; 服务成效

中图分类号: TL52

文献标识码: A

The 320 kV platform for multi-discipline research with highly charged ions

Li Jinyu, Zhang Tongmin, Li Jun, Kang Long, Zhou Junjun,

Yang Yawen, Wei Haiyuan, Wang Fuhe

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: The 320 kV platform for multi-discipline research with highly charged ions is a kind of electrostatic high-voltage accelerator equipment with low-energy, high-current and high-charge, which was independently developed by the Institute of Modern Physics of the Chinese Academy of Sciences. The platform services basic frontier research such as high-energy-density physics, atomic physics, and low-energy nuclear astrophysics, and also supports the national development strategy in the research of nuclear materials and life extension of active reactors. In recent years, in order to meet the needs of multidisciplinary scientific experiments and cultivate new application directions, the operation and maintenance team has carried out a series of transformation work for the 320kV platform from the aspects of experimental function

development, device performance improvement, and experimental efficiency promotion. Experimental functions such as high temperature-stress material irradiation, low-temperature environmental material irradiation and pulsed ion beam have been newly developed to improve the efficiency of data acquisition and sample switching. The beam intensity, ions charged and other beam conditions were also promoted. It has provided indispensable heavy ion technical services for scientific experiments of more than 80 universities and research institutes in China, and the service has achieved remarkable results.

Keywords: high-voltage accelerator; function development; upgrading and renovation; service and effect

1 科研仪器应用

320kV 低能重离子综合研究平台（以下简称 320kV 平台）是中国科学院近代物理研究所自主研发的低能、强流、高电荷态静电高压加速器装置^[1]，该平台隶属于中国科学院近代物理研究所公共技术中心，面向全国用户开放共享。该平台的核心系统——兰州第二代全永磁 ECR 离子源（简称 LAPECR2）是我所自主研发的全永磁 ECR 离子源^[2]，该离子源曾在磁场强度、束流产额及离子电荷态等关键指标方面创造国际记录，ECR 离子源理论上可以实现全离子产生及加速，目前 LAPECR2 已经调试并实验供束三十余种元素的离子。基于先进的离子源性能，平台可提供总能量在 15keV 至 10MeV 的重离子束。平台建设有 6 个物理实验终端，用于开展高能量密度物理、原子物理、低能核天体物理等基础前沿研究^[3]，同时在新一代先进压水堆、聚变堆材料研发及现役反应堆延寿方面支持国家核能发展战略。

320kV 平台（如图 1 所示）实验机时长期供不应求，平台施行束流申请评审制度。用户年均申请实验机时 13000 小时左右，根据用户承担的项目类别、科学意义结合以往实验成果产出，由评审委员会对机时严格审核、统筹规划，年均批准实验机时约 5000 小时。为满足科学实验机时需求，平台实行 24 小时全天候连续运行的模式，年均开机超 7000 小时，为用户提供在靶时间约 5000 小时。

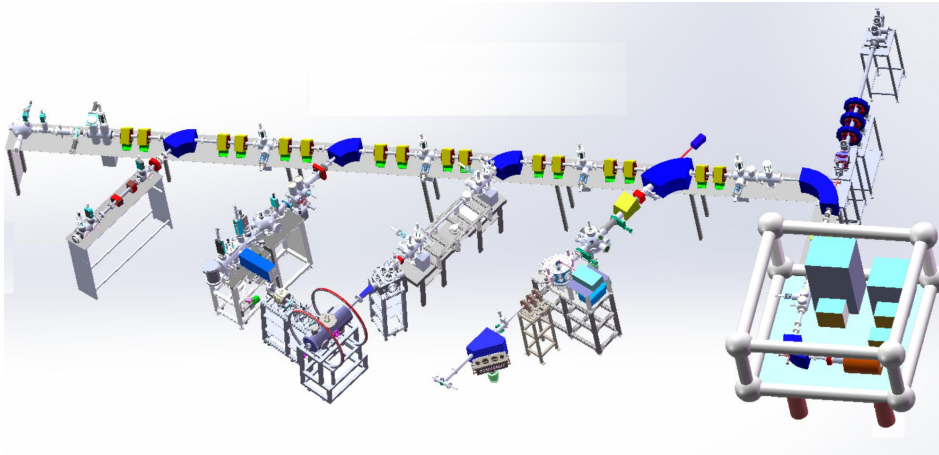


图 1 320kV 低能重离子综合研究平台布局图

2 320kV平台实验技术和方法开发

在实验运行及开放共享中，用户对 320kV 平台技术支持条件不断提出新的、更高的技术要求，如：各种元素的重离子束、更高的离子电荷态、更高的束流强度、更好的束流品质等。320kV 平台运维团队在现有条件基础上持续开展实验技术和方法开发，不断探索离子产生、束流调试及束流诊断的新技术、新方法，以满足实验用户的需求。

2.1 离子源（LAPECR2）离子产生方法探索

ECR 离子源产生离子的原理是将产生离子的气态物质注入离子源，利用高能电子（由微波加热、磁场约束）电离，由高压引出而产生。ECR 离子源产生金属离子是 320kV 平台运行工作的难点，其困难在于将金属单质或其化合物以气态形式注入离子源回旋共振区域。为满足用户对金属离子的实验需求，运维团队在金属离子产生方面进行了多种调试方法探索，如：开发了适配于 LAPECR2 离子源的溅射组件，利用辅助离子将金属靶材中的原子溅射至回旋共振区域电离引出，利用该方法在 320kV 平台上首次调试产生了 U 离子（调试谱图如图 2 所示）；开发了适配于 LAPECR2 离子源的高频高温感应炉^[4-5]（高频高温感应炉设计图如图 3 所示），将坩埚温度由 1200℃提高至 2000℃以上，解决了 Ti、Cr、Zr 等高熔点金属离子产生困难的问题。

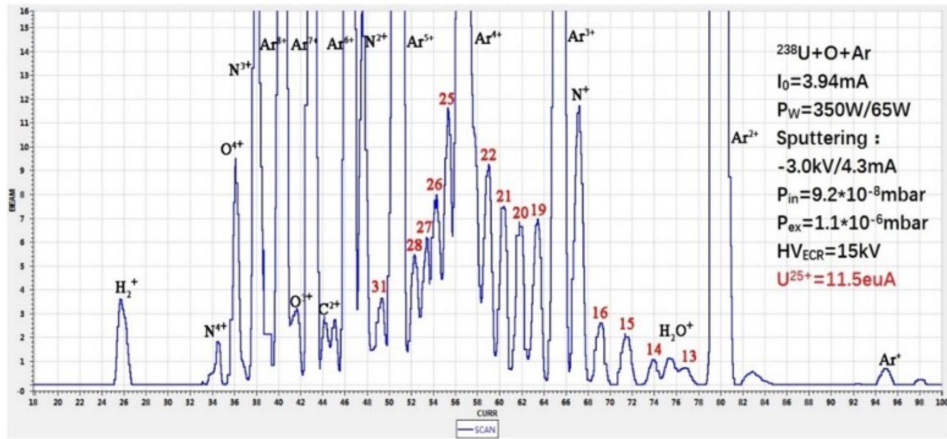


图 2 U 离子调试谱图

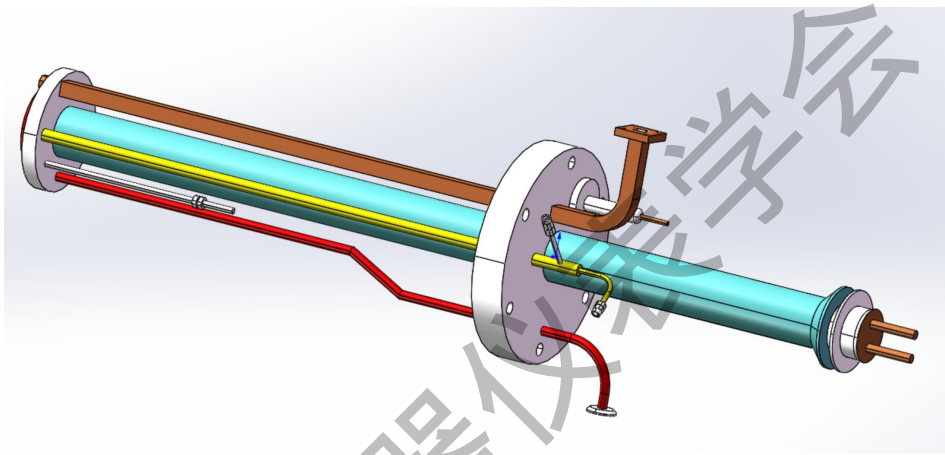


图 3 高频高温感应炉设计图

为提高 LAPECR2 离子源束流产额和电荷态指标，对平台微波功率放大及馈入系统进行升级改造，提高了微波功率及传输系统的可靠性；更换了因长期运行导致磁场减弱的六极磁铁，更换后离子源磁场明显增强。以上改造提高了离子源产生离子的电荷态指标，可以产生如 Xe^{30+} 、 Bi^{36+} 等高电荷态离子，离子源束流产额也得到大幅提升，如： $\text{Xe}^{20+}=180\mu\text{A}$ 、 $\text{Xe}^{30+}=11\mu\text{A}$ 、 $\text{Bi}^{28+}=35\mu\text{A}$ 、 $\text{Bi}^{36+}=10\mu\text{A}$ 。

2.2 脉冲离子束开发

脉冲离子束在等离子体物理、原子分子物理、材料科学及国防科研等前沿研究中得到越来越广泛的应用^[6]。320kV 平台原有束流条件为连续离子束，不具备脉冲离子束运行模式。平台运维团队依托原有条件，利用 chopper 工作原理建成一套低能重离子脉冲化系统，采用双电极双狭缝束流偏转系统，在偏转电极上加载脉冲高压，将连续束转换为脉冲离子束^[7]。脉冲束的宽度为 60ns 及以下，脉冲宽度 60ns 时占空比为 1.2%。该工作获批实用新型专利一项^[8]。

2.3 新型两维离子束轮廓探测器开发

为测量束流截面空间二维分布，提高束流调试效率，提高终端束流品质，实现弱束流准确测量定位，平台开发了由 128 通道皮安计系统加两维束流探头组成的新型两维离子束轮廓探测器，该探测器实现了 0.02nA 束流精确测量，束流截面位置分辨好于 1mm，具有高精度、高分辨、高稳定性、宽量程等诸多特点。该探测器可实时监测束流强度、束流位置、束流均匀性、束斑大小及轮廓；也可以配合电源参数优化束流品质。该工作发表 SCI 文章一篇^[9]，授权发明专利一项^[10]。

2.4 终端束流扫描系统开发

在材料辐照等实验中，要求束流辐照区域流强均匀，以便准确控制辐照剂量及后期表征。为满足用户对束流均匀性需求，在材料辐照终端前设置水平、垂直方向的扫描电极，通过加载在极板上的高频三角波电压产生扫描电场，将束流横向扫开，以提高束流均匀性，三角波电源频率在 0-2000Hz 区间连续可调，扫描电压在 0-2000V 区域连续可调，根据离子种类、电荷态及能量等参数匹配扫描电源参数，以达到束流均匀性需求，该系统可与其他实验终端匹配运行。

3 320kV 平台维护检修

320kV 平台由离子源、高压、微波、电源、控制、真空、磁铁、束诊、冷却、防护及六个实验终端等多个核心系统构成，涉及的专业领域广泛。为保障 320kV 平台的运行效率和服务水平，研究所重视平台运维团队技术能力培养，对运维人员进行仪器工作原理、实验操作等方面的培训，鼓励运维团队申请仪器功能拓展、性能提升方面的项目，考核运维人员仪器故障判断及故障解决方面的技术能力。320kV 平台形成了夏季集中检修及日常检修维护的常态化维护检修机制。

夏季检修是每年 8 月初（当地炎热气候导致平台运行不稳定），停机对 320kV 平台各系统进行全面的系统性检修维护。夏季检修是平台年度运维重点工作之一，需提前制定检修计划，包括检修需求、检修目标、实施方案、经费预算、外协计划等内容，方案经论证后由运维团队具体实施。夏季检修集中开展 320kV 平台各系统较大规模的维护、检修、升级改造及功能拓展任务。

日常检修是平台在运行服务中面临突发设备故障进行的应急处置和检修维护。320kV 平台涉及高压、微波、真空等系统，在突发故障处置中存在人身安全和设备安全风险，为此平台制定了一套行之有效的突发故障处置预案，提前培训宣贯，以保障人身及设备安全。为确保运行服务效率，发生设备故障时，运维团队第一时间开展检修工作直至故障排除。

4 功能开发及性能拓展

近年来，平台以用户实验需求为导向，持续开展了多项功能开发及性能拓展。例如：对高温环境材料辐照装置进行功能开发，显著提高了高温环境材料辐照装置的实验效率、温区范围、温控精度和自动化水平；开发了多场耦合环境下的材料辐照实验条件，用于模拟核材料实际服役工况环境。具体工作如下：

4.1 高温环境材料辐照装置

原高温环境材料辐照装置因每次只能安装一组样品，导致实验中抽、破真空及升、降温浪费大量机时，且原装置实验温区小，温控方式为手动操作。为解决以上问题，对高温环境材料辐照装置（如图 4）进行了功能开发。在真空腔体中设置样品库，利用机械手在真空中更换高温样品，节省了升降温及真空操作时间，将高温环境材料辐照综合实验效率提高 5 倍以上。同时将实验温区拓展至 RT~1200℃，温度控制采用 PID 动态反馈的控制方式，控制准确，操作便捷。该项功能开发工作授权实用新型专利两项^[11-12]。

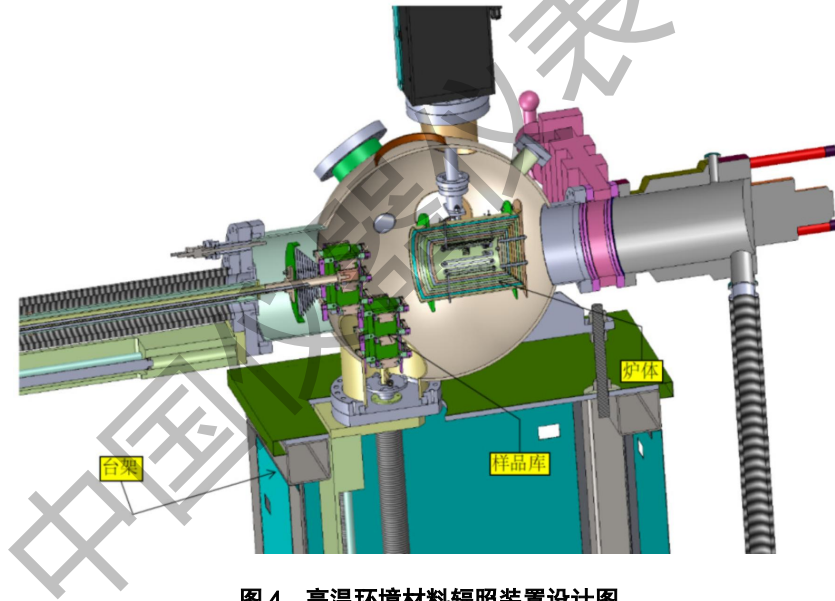


图 4 高温环境材料辐照装置设计图

4.2 多功能材料辐照装置研制

为支持国家核能源发展战略，开展现役反应堆延寿及新一代核材料研发相关实验，开发模拟实际服役工况条件下的材料辐照实验功能意义重大，需求迫切。平台研制了新型多功能材料辐照装置（如图 5），用于模拟核材料实际服役工况环境，实现了在服役温度条件下，对实验样品施加应力的同时开展辐照实验，同时在线测量样品表面、背面温度，并实时测量样品位移。本项研制工作授权发明专利一项^[13]。

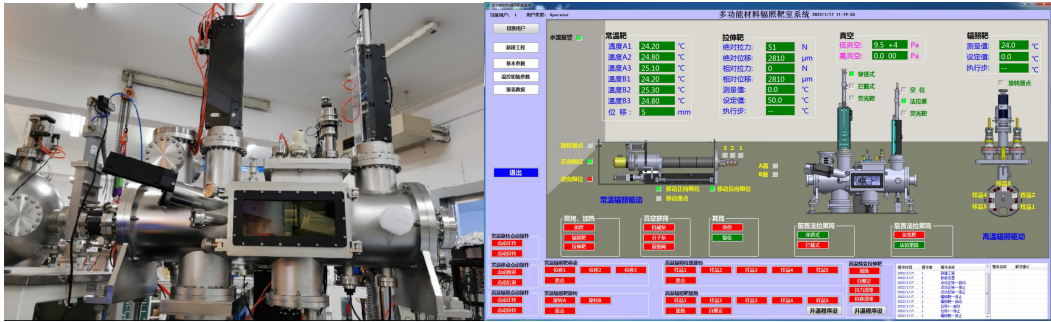


图5 新型多功能材料辐照装置及人机控制界面

4.3 低温环境材料辐照系统开发

低温环境可以限制材料中缺陷移动及相互作用，为减小其他因素造成的干扰^[4]，在重离子材料辐照机理研究中，低温环境重离子辐照实验条件具有独特的优势。另外，航天器件在太空服役的工作温区范围较大，有必要开发用于模拟航天器件服役的低温环境材料辐照装置，以开展相关研究工作。为满足以上实验研究需求，开发了基于液氮制冷技术的低温环境材料辐照装置(如图6所示)，将终端实验温区范围由 RT~1200℃拓宽至-150℃~1200℃。该项功能开发工作申请实用新型专利一项（申请号：202321795370.X）。



图6 低温环境材料辐照装置

4.4 控制系统改造

320kV 平台原有控制系统为模拟控制，功能简单、软件落后、操作卡顿；经长期服役，设备老化、可靠性差、故障频发；设备经多次改造，控制结构复杂、集成化低；部分设备为手动控制，设备调试不便，影响平台整体运行服务。

为保障平台高效运行，采用“总体规划，分布实施”的原则对控制系统进行了升级改造，软件采用加速器主流控制架构 EPICS，该系统可实现各受控系统（设备）分布式控制，互不干扰，人机交互友好、软硬件维护及设备扩展方便，故障率低。控制硬件采用最新网络控制设备，简化逻辑结构，全面实现平台由模拟控制向数字控制升级，彻底解决了原控制系统结构复杂、功能简单、故障率高等问题。本项工作培养博士研究生一名^[1]，发表文章一篇^[15]。

4.5 已完成的其他改造

1) 水质提升

冷却水系统（如图 7 所示）是 320kV 平台运行重要的技术条件支持系统，其运行工况为向 30 万伏高压端设备提供水冷保护，因此对水质、水压及循环系统可靠性有严苛的要求。为满足平台运行需求，便于随时检修维护，设计了一套独立运行的水冷系统，该系统通过水质提升装置对冷却水进行分级净化，将水阻由 $0.3\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 提升至 $5\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上；采用变频恒压控制技术，对循环水压进行动态调控。

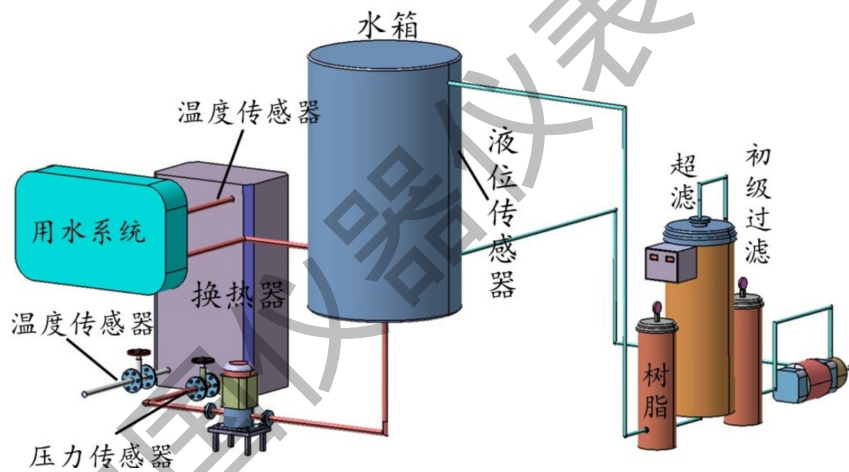


图 7 冷却水系统组成示意图

2) 电源系统改造

电源系统为平台提供重离子引出高压电场、重离子加速高压电场，束流分析、聚焦、偏转磁场，在重离子加速、离子束运输、聚焦等方面发挥至关重要的作用。电源系统的稳定性、可靠性及精度直接影响着平台的运行稳定性及束流品质。平台经规划论证，对老旧的高压电源、分析（偏转）磁铁电源、透镜电源、四极铁电源等电源系统分批次进行了升级改造，提高电源系统的稳定性、可靠性及精度，大幅提升了平台的束流品质（能散、聚焦、均匀性、流强及稳定性等）。

5 正在开展的功能开发工作

为保持 320kV 平台在低能、强流、高电荷态重离子束技术服务方面国内的特色和优势，保持高水平开放共享和技术服务，平台坚持开展功能拓展、性能提升，并培育新的应用方向，正在开展的功能开发工作有：

1) 为模拟测试宇航用太阳能电池在空间服役环境下光电转化效率，依托平台开发对太阳能电池在光源照射条件下的重离子辐照功能，同时测量太阳能电池的开路电压、短路电流密度等参数^[16]。本实验功能在宇航用太阳能电池材料开发方面应用前景广泛。

2) 固体润滑材料广泛应用于核设施和空间航天器，其服役环境涉及大量载能粒子辐照，因此模拟润滑材料服役工况的重离子辐照实验条件具有重要的意义^[17]。依托平台现有条件开发模拟润滑材料服役场景的重离子辐照实验条件，即在真空实验靶室中设置摩擦机，实现重离子辐照的同时开展摩擦实验。

3) 为准确、自动化控制辐照剂量，开发远程控制、自动化样品切换等终端实验功能，提高实验效率，对现有数据采集系统中束流积分仪进行升级改造。开发基于反馈式电流积分型 I-F 变换原理的束流积分仪，更好的满足实验需求；同时，研制配套的数据采集板，以深度开发远程控制、剂量监测及自动化换样等功能。

6 服务成效

320kV 平台以实现高科技支撑体系与科学研究深度融合为目标，不断创新发展科学实验支撑条件，为各学科实验提供个性化的实验支撑方案，深受国内外学者肯定。平台目前已与国内 19 个省市的 80 余家高校及科研院所建立了长期合作机制，科研用户团队达 400 多个。合作单位包括北大、清华、中科大、上交、北航、哈工大、西交、中科院高能所、中科院上海应物所、中科院金属所、中国工程物理研究院、中核集团、中国广核集团、国电投等用户单位。根据 2022-2023 年度束流申请材料不完全统计：2021 年平台实验支持用户发表 SCI 论文 50 余篇，其中 Physical Review Letters、Carbon、Acta Materialia、Applied Surface Science、Journal of Nuclear Materials 等 TOP 期刊文章 20 余篇。不完全统计平台累计支持用户发表文章 650 余篇，一区文章超 100 篇（根据历年束流申请材料统计）。

平台近年重点支持了国家自然科学基金、国家重点研发计划、中科院战略先导专项、中广核集团尖峰计划、国家科技重大专项及国际热核聚变实验堆专项（ITER）等项目。如：上海应用物理所承担的中科院战略先导专项 TMSR，中广核承担的国家重点研发计划“核电关键材料服役行为的高通量评价与预测技术”，近代物理所承担的国家重点研发计划“高电荷态离子非平衡动力学时空演化研究”项目等。平台用户在材料辐照效应、核能候选材料筛选、

原子分子碰撞动力学、低能核天体物理等科研领域取得了一系列原创性成果，多项科研成果发表在国际顶级期刊上。

因平台优越的性能和专业的运维服务，平台研发、运维团队曾获得首届“Richard Geller PRIZE”奖、中国工业防腐蚀协会科技进步一等奖、甘肃省科技进步二等奖、首届中科院“技术能手”等奖励和荣誉。320kV 平台作为主要参评仪器参加科技部大型科研仪器开放共享评价考核，近代物理研究所在该项考核中连续四年获得优秀。

参考文献:

- [1]常建军.320kV 实验平台 EPICS 应用及调束优化研究[D].北京: 中国科学院大学,2019.
- [2]孙良亭,李锦钰,王辉,等.强流高电荷态全永磁 ECR 离子源 LAPECR2 的初步调试[J].核技术,2007,(12):965-970.
- [3]马新文,320kV 高电荷态离子综合研究平台研制[Z].甘肃省,中国科学院近代物理研究所,2009-11-29.
- [4]吴清平,靖树君,王伟竹.感应加热炉的研制[J].煤矿机械,2000,(08):42-44.
- [5]黄维.强流高电荷态难熔金属离子的产生[D].合肥:中国科学技术大学,2017.
- [6]李和平,于达仁,孙文廷,等.大气压放电等离子体研究进展综述[J].高电压技术,2016,42(12):3697-3727.
- [7]Fang X,Yue X,Fu J Y,et al.Experimental study on factors affecting the end effect in gas viscosity measurement using capillary-tube viscometer[J].Review of Scientific Instruments,2019,90(7).
- [8]刘会平.一种低能脉冲离子束产生装置:CN202220559656.7[P],2022-09-02.
- [9]Li X,Liu J,Yu D,et al.A beam profile monitor for picoampere low-energy ion beams[J].Review of Scientific Instruments,2019,90(7).
- [10]刘俊亮.一种强流带电粒子束二维分布监测装置:CN201911017199.8[P],2021-10-08.
- [11]李锦钰.一种高温环境离子束辐照实验装置:CN201721383179.9[P],2018-08-24.
- [12]李锦钰.一种用于离子束辐照的高温加热装置:CN202022785496.1[P],2021-10-08.
- [13]李锦钰.一种模拟实际服役工况环境的材料辐照装置:CN202011284731.5[P],2023-06-30.
- [14]李邵军,谢振坤,肖亚勋,等.国际深部地下实验室岩体原位力学响应研究综述[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(08):2491-2509.

- [15]常建军,原有进,张玮,等.320 kV 全离子综合实验平台控制系统升级[J].原子能科学技术,2019,53(09):1612-1616.
- [16]颜媛媛.空间卫星用 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池辐照损伤效应研究[D].南京:南京航空航天大学,2020.
- [17]程心雨,刘荣正,刘马林,等.碳化物陶瓷材料在核反应堆领域应用现状[J].科学通报,2021,66(24):3154-3170.

中国仪器仪表学会