

高温超导电子束离子阱 SL-EBIT 的研制与高电荷态氩离子精密谱测量 *

周晓鹏¹⁾²⁾ 刘鑫³⁾ 汶伟强^{1)2)†} 袁洋¹⁾²⁾ 刘畅⁴⁾ 黄忠魁¹⁾²⁾
汪寒冰¹⁾²⁾ 张啦¹⁾²⁾ 黄新华¹⁾²⁾ 肖君^{3)‡} 张少锋¹⁾²⁾ 马新文¹⁾²⁾

1) (中国科学院近代物理研究所, 重离子科学与技术全国重点实验室, 兰州 730000)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (复旦大学现代物理研究所, 核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 200433)

4) (中国科学技术大学近代物理系, 合肥微尺度物质科学国家研究中心, 合肥 230026)

高电荷态离子发射光谱的精密测量在等离子体诊断、量子电动力学检验、核结构探索及光学原子钟研制中具有关键作用。电子束离子阱 (EBIT) 可在实验室条件下产生并约束任意元素的高电荷态离子, 兼具离子源与光源双重功能, 是开展高电荷态离子光谱精密测量的理想平台。基于此, 本文研制了一套高温超导 EBIT 装置——上海-兰州电子束离子阱 (SL-EBIT)。该装置由电子枪、漂移管、离子引出电极、高温超导磁体及液氮冷却系统构成, 并集成了差分注气系统、光谱探测接口及共轭光学光谱校刻系统。其中, 一对高温超导线圈产生轴向约束磁场 (最高 0.24 T), 电子束能量范围为 80–8000 eV, 束流半径小于 65 μm , 最大束流达 10 mA。为验证装置性能, 在 SL-EBIT 中对 Ar^{9+} 的 $1s^2 2s^2 2p^5 {}^2P_{3/2} - {}^2P_{1/2}$ 磁偶极跃迁进行了光谱测量, 测得波长为 553.3274(54) nm, 与已有高精度实验和理论结果高度吻合。测试实验表明, SL-EBIT 具备开展高电荷态离子精密光谱研究的能力, 为后续电荷态选择引出、阱外激光光谱学和超精细结构测量研究奠定了实验基础。

关键词: 电子束离子阱, 高电荷态离子, 精密测量, 禁戒跃迁

PACS: 07.77.Ka, 32.30.-r, 41.75.-i, 07.90.+c

1 引 言

高电荷态离子是原子失去多个电子后形成的多电荷态体系,随着电荷态的提高,剩余电子所感受到的原子核库仑场显著增强,相对论效应、量子电动力学效应以及核有限尺寸效应等随之增大,使高电荷态离子成为在强库仑场中检验相对论、量子电动力学和研究原子核结构的有力探针^[1-7]。同时,高电荷态离子由于其结构紧凑、极化率低且对外场干扰不敏感的特性,被认为是下一代光学原子钟极具潜力的候选体系^[8-12],尤其是其光学跃迁具有极高的相对论敏感性,为探索基本常数 α 随时空变化^[13-17]、检验局域洛伦兹不变性^[18,19]以及探索超越标准模型的新物理^[20]提供了重要实验平台。此外,高电荷态离子广泛存在于恒星内部^[21]、活动星系核及星系际介质^[22,23]等极端天体物理等离子体^[24-26],以及人造聚变等离子体环境中^[27-30],对其谱线特性的研究为等离子体参数诊断及相关理论模型的基准检验提供了重要依据。

电子束离子阱(electron beam ion trap, EBIT)是实验室中产生并研究高电荷态离子的重要装置。它通过高能电子束轰击中性原子分子或低电荷态离子产生高电荷态离子,并利用电磁场约束使得离子在势阱区内近乎静止。这一特性显著抑制了离子高速运动带来的多普勒效应,为开展精密谱研究创造了理想条件^[31]。该装置的基础概念可追溯至20世纪60年代电子束离子源(EBIS)的发明,它证明了用聚焦的电子束能够产生并约束高电荷离子^[32,33]。基于EBIS原理,20世纪80年代,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室成功研制了首台EBIT装置^[31,34-36],在高电荷态离子的产生、囚禁和高精度光谱测量技术取得了重大突破。EBIT可产生高电流密度的聚焦电子束,将原子逐级电离至高电荷态,兼具体积小、效率高、光谱分辨率好等优点,同时具备离子产生、囚禁与光谱测量三项核心功能。目前,EBIT已成为从可见光到X射线的宽谱段范围研究高电荷态离子^[7,37-42]的理想平台,为原子结构理论、量子电动力学等前沿领域提供了不可或缺的精密实验数据。

过去十余年,紧凑型、低电子束能量EBIT系统的快速发展推动高电荷态离子高分辨率光谱学与精密测量研究不断取得突破。东京大学搭建的CoBIT系统^[43,44]率先完成少电子与多电子体系高电荷态离子中,对量子电动力学修正敏感的跃迁及超精细结构的激光光谱测量^[39,45-47]。作为早期低能紧凑型EBIT典型装置,采用高温超导磁体约束的上海高温超导电子束离子阱^[48]证实低电子束能量下可稳定产生高电

† 通信作者. E-mail: wenweiqiang@impcas.ac.cn (通信作者)

† 通信作者. E-mail: xiao_jun@fudan.edu.cn (通信作者)

第一作者. E-mail: zhouxiaopeng@impcas.ac.cn (第一作者)

* 国家重点研发计划项目(No. 2022YFA1602500)、国家自然科学基金项目(No. 12393824、No. 12334010、No. 12374228)

荷态离子, 并集成覆盖极紫外与可见光波段的互补光谱诊断模块^[49]。该平台已系统开展类硼、类铍等少电子高电荷态离子的精细结构与超精细结构测量^[41,50,51], 及相关极紫外光谱研究^[42], 凸显了紧凑型 EBIT 在精密谱学研究中的适用性。德国海德堡紧凑型 EBIT 以及 PTB-EBIT/PolarX-EBIT 平台^[52,53] 通过将离子阱和相干激光光谱技术相结合, 实现禁戒及高抑制光学跃迁的高精度探测, 在高电荷态离子光学原子钟实验中取得关键突破^[11]。中国科学院精密测量科学与技术研究院与复旦大学合作研制的 SW-EBIT 平台^[54] 完成了高电荷态 Ni^{12+} 离子的产生、引出并成功注入线性 Paul 阱, 首次在该类阱中实现了 Ni^{12+} 离子的库仑结晶, 推动了高电荷态离子的相干操控与冷却技术的发展^[12]。此外, 复旦大学基于永磁体的 CUBic-eBIT (CUBIT) 等装置也展示了高电荷态离子的高效产生与引出能力, 为下游精密光谱和计量实验提供了可靠离子源^[55]。韩国 UNIST EBIT 采用永磁体设计, 与浦项 XFEL 联用开展了时间符合测量研究^[56]。日本 JAXA-EBIT 装置依托 SPring-8 同步辐射, 开展高电荷态离子共振光激发实验, 为天体 X 射线光谱提供原子数据支撑^[57]。这些进展充分表明, 紧凑型、低能耗 EBIT 装置已成为高电荷态离子研究中的核心实验平台, 持续推动着高精度原子物理及相关交叉领域的发展。

表 1 各型 EBIT 装置关键参数对比

Table 1. Comparison of key parameters among various EBIT devices

装置	CoBIT	SH- HtscEBIT	HC-EBIT	SW-EBIT	CUBIT	UNIST EBIT	JAXA-EBIT	SL-EBIT
	(2008) [44]	(2013) [48]	(2018) [52]	(2019) [54]	(2023) [58]	(2024) [56]	(2025) [57]	(This work)
磁场类型	高温超导	高温超导	永磁体	高温超导	永磁体	永磁体	永磁体	高温超导
中心磁场 (T)	0.2	0.25	0.86	~0.21	0.56	0.84	—	$0.21^a/0.24^b$
电子束能量 (eV)	100–1000	30–4000	10000	30–4000	100–4500	—	200–5000	80–8000
最大电子束流 (mA)	10	10	80	9.29	10	10	—	10
束流半径 (μm)	~100	~65	72	320	30–60	—	—	< 65
离子引出能力	有	无	有	有	有	有	无	有
研究方向	太阳日冕诊断、 EUV 光谱	等离子体诊断、 QED 检验	量子逻辑光谱、 HCI 光钟	HCI 钟跃迁		XFEL 联用、 HCI 光钟	同步辐射联用、 天体 X 射线光 谱	精密光谱

^a 工作磁场; ^b 设计最大磁场.

在此基础上, 本文基于 SH-HtscEBIT 研制了新一代上海-兰州电子束离子阱 (SL-EBIT)。该装置使用高温超导线圈并将电子束能量范围从 3 keV 扩展至 8 keV, 覆盖低能 X 射线波段并可产生更高电荷态离子; 同时集成离子引出模块与 X 射线、可见光波段光谱探测及共轭光学定标系统, 用于支撑阱外精密激光光谱学与离子钟研究。表 1 汇总了各类紧凑型 EBIT 装置的核心参数与主要研究方向。本文系统阐述 SL-EBIT 的设计方案、电子束性能测试与光谱测量的结果。实验测得电子束在 40–5000 eV 宽能区的传输

特性：收集效率优于 97%，最大束流达 9.75 mA，束流半径小于 65 μm 。利用该装置产生并囚禁了 Ar^{9+} 离子，对其基态精细结构磁偶极跃迁开展高分辨率光谱测量，并结合共轭外校刻系统定标测量谱线，最终测得波长为 553.3274(54) nm，与现有高精度实验及理论计算结果高度吻合。实验结果证实，SL-EBIT 可胜任高电荷态离子精密光谱学研究，其内置离子引出功能为后续阱外激光光谱、超精细结构测量与光学原子钟研究提供了全新路径。

2 装置设计与结构

2.1 SL-EBIT 主体结构

上海-兰州电子束离子阱（SL-EBIT）装置的结构如图1所示，其主体由真空腔室与内部核心电极系统构成，用于高电荷态离子的产生、约束及光谱研究。装置主体真空腔室由 304 不锈钢制成，呈圆柱形，高 59 cm，外径 35 cm。腔室内部集成容积约 5 L 的液氮储罐，该储罐同样采用 304 不锈钢，为分体式空心圆柱结构，通过三根 DN16 管路连接并由顶部悬吊固定。储罐设有独立的注入口与排出口，以实现液氮的连续循环。一对高温超导线圈浸没于储罐液氮中，铜棒穿过支撑管路为其提供电气连接。为改善磁场环境，真空腔内壁覆盖镀镍软铁磁屏蔽层。腔室顶部配置 CF35 法兰用于连接离子束线；侧壁设有多处 CF35 接口，用于安装光学窗口、电气馈通、真空规及气体注入系统；底部通过 CF200 法兰连接主抽气泵，并作为核心电极的安装通道。

核心电极系统装配于上述真空腔室内部，沿电子束传输方向依次排布：电子枪、三段式漂移管（DT1，DT2，DT3）、离子引出电极、单透镜与电子收集极。其中，电子枪负责电子束的发射与初步聚焦；三段漂移管用以构建轴向静电势阱实现离子约束，亦可经电压切换完成离子引出；单透镜承担后续束流的操控任务。全部载流电极采用高导电无氧铜（OFHC）制备，高压绝缘部件选用 95% 氧化铝陶瓷，保障系统电学与热学性能稳定。

电子枪以 LaB_6 单晶作为阴极材料，该材料兼具高热稳定性、低功函数（约 2.69 eV）与优异场致发射性能，保证电子束持续稳定发射。枪体包含阴极、聚焦电极与阳极，聚焦电极与阳极均开有直径 1 mm 的中心孔，两电极间距 1.5 mm，阴极发射面处于聚焦电极上表面下方约 0.5 mm 位置。工作状态下，受热阴极发射电子，在阳极电压作用下被引出并加速。聚焦电极采用倒锥形孔径结构，通常施加与阴极接近的电位，可抑制离轴电子发射并完成电子束初步整形。独立调节聚焦电极偏置电压，即可实现发射电流的精准调控。

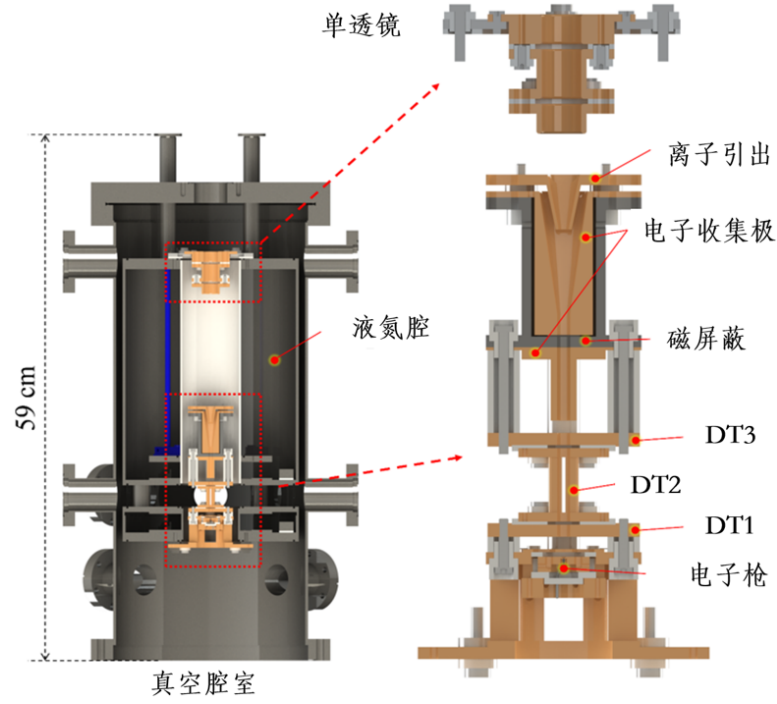


图 1 SL-EBIT 结构图。主体由 EBIT 核心（用于产生和引出高电荷离子）及真空腔室构成。高电荷离子在中心漂移管（DT2）中产生并囚禁。图中，DT1-3 为漂移管 1-3，分别对应第一、第二、第三个漂移管。

Fig. 1. Structure of the SL-EBIT. The main components are the EBIT core (for highly charged ion production and extraction) and the vacuum chamber. Highly charged ions are generated and trapped within the central drift tube (DT2). In the figure, DT1-DT3 are drift tubes 1-3.

电子枪发射的电子束，在枪体组件与漂移管系统的电位差作用下获得能量并加速。随后，电子束在静电聚焦与轴向磁场的协同约束下，沿轴向平稳穿过离子俘获区。漂移管组件由三段圆柱形电极组成，即 DT1、DT2、DT3，长度依次为 4 mm、24 mm、4 mm，内径统一为 4 mm。中心 DT2 漂移管侧壁开设四个 $18 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的矩形光阑，用于样品注入与光谱信号观测。

电子束的径向磁约束由高温超导线圈产生的轴向磁场提供。该组线圈沿束流轴线对称布设，几何参数如下：单线圈内径 60 mm，外径 127 mm，轴向高度 18 mm；两线圈中心间距 57 mm。本工作中，高温超导线圈浸没于液氮储罐中，工作温度约为液氮沸点（77.4 K）。线圈工作电流 20 A 时，中心漂移管区域轴向磁感应强度为 0.21 T，此为本文全部实验的工作磁场。线圈设计最大磁场强度为 0.24 T。该磁场可对电子束实现显著的径向压缩与轴向引导，使其以高密度、小发散角稳定穿过漂移管区域。

在中心漂移管（DT2）中，静电场势阱与轴向磁场的协同作用使电子束半径达到最小，从而获得高电流密度。高能电子束与注入的中性原子发生连续电子碰撞电离，逐级剥离核外电子。随着电离过程的进行，

离子电荷态不断提高，最终在电子碰撞电离与电荷交换之间建立动态平衡，形成稳定的高电荷态离子分布。这一机制使 SL-EBIT 装置实现高电荷态离子的高效产生、长期囚禁与精密谱学测量。

2.2 真空和注气系统

SL-EBIT 的主真空室由底部安装的 Edwards nEXT730D 涡轮分子泵（抽速 730 L/s）维持真空，该分子泵由一台 Edwards nXDS15i 涡旋泵（抽速：15.1 m³/h）作为前级泵支撑。在未使用液氮冷却的条件下，主真空室底部的本底压力可达约 1×10^{-9} Torr。运行期间，液氮冷却可将主室压力进一步降低至约 10^{-10} Torr。

气体注入系统如图2所示，系统由一个 CF35 高真空手动阀连接独立的气体注入室与主 EBIT 真空室。注入系统采用超高真空设计，配备 Edwards nEXT85D 涡轮分子泵（抽速 85 L/s），并由另一台同型号 Edwards nXDS15i 涡旋泵作为其前级泵。气体流量的精确控制由一个精密计量微漏阀实现。待测气态化合物经由该阀与一根长 28 cm、内径 4 mm（末端喷嘴处内径收窄至 2 mm）的不锈钢管，直接注入至中心漂移管（DT2）的中心位置。

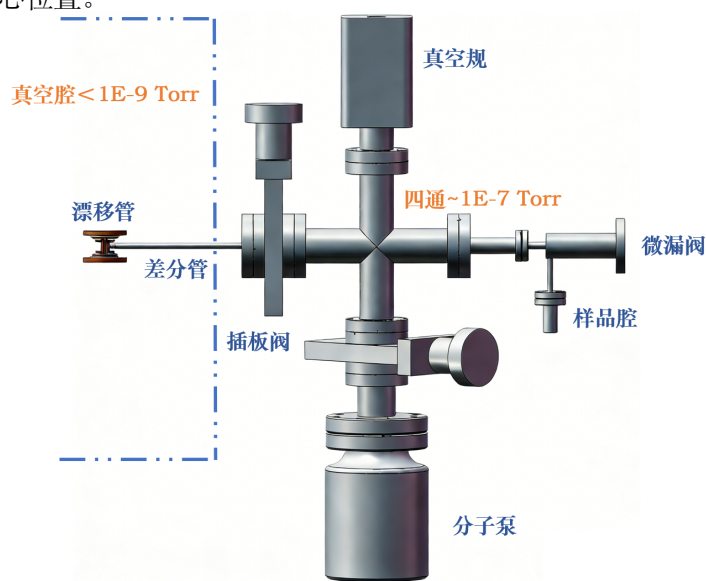


图 2 真空差分气体注入系统结构示意图。

Fig. 2. Schematic diagram of the vacuum differential sample injection system

EBIT 运行期间，气体注入室内的压力维持在 10^{-7} 至 10^{-6} Torr 范围内，具体取决于注入气体的种类和流速。压力可通过调节注入室涡轮分子泵入口处的插板阀进行控制。使气体注入室与主 EBIT 真空室之间存在 3 至 4 个数量级的压力梯度，保障气体注入过程中主室超高真空的稳定。

2.3 电源控制系统

SL-EBIT 的电源系统为电子束产生、离子约束及收集等关键过程提供独立可调且稳定的电压控制，其详细结构如图3(a)所示。电子枪部分，在 LaB_6 阴极施加-kV 量级的负高压，经通过热电子发射生成电子束；聚焦电极电压略高于阴极，用以优化束流轮廓并抑制电子横向发散；阳极相对阴极施加正偏压，将电子加速并注入中心漂移区域。发射电流由串联于阴极回路的万用表实时监测，为束流稳定性提供反馈依据。

三段式漂移管组件配设独立可调偏置电压，用于沿电子束轴向构建可编程静电势阱。常规工作模式下，DT2 电压通常低于 DT1 与 DT3，以此形成约束高电荷态离子的轴向势阱。为实现离子引出，各漂移管电压可经高压放大器动态调节，放大器由外部函数发生器驱动，可完成电极电压快速切换，通过瞬时改变轴向势阱分布，实现约束离子的脉冲式引出。精准调节电压脉冲幅值与时序，可控制特定离子沿束线向探测系统传输。

在系统的下游端，电子收集极相对于漂移管施加正偏压，实现透射电子的高效收集。收集极采用独立电源供电，其电流被连续监测，是电子束传输效率及系统整体运行状态的诊断指标。整套电源系统采用模块化设计，支持对电子束能量、势阱深度及引出条件进行灵活调控，为稳定的离子产生和高分辨谱学测量提供了可靠的电气基础。

2.4 电磁场和电子轨迹模拟

2.4.1 电场和磁场

为分析 SL-EBIT 的电场、磁场分布及电子束传输特性，采用 COMSOL Multiphysics^[59] 进行了有限元数值模拟。如图3(b)展示了沿束流轴向的静电电压分布，通过对漂移管组件电压的独立调控，使 DT1 与 DT3 电压高于 DT2，形成以 DT2 为中心的轴向势阱，并展示了线圈激励电流为 20 A 时得到的轴向磁通密度分布（蓝色曲线）和电子输运传输的模拟结果。模拟结果显示，中心漂移管（DT2）区域磁感应强度可达 0.21 T 左右，该场强为电子束的电离与俘获过程提供充足磁约束。受外围软铁磁屏蔽结构影响，轴向磁场分布存在一定非对称性，该效应在模拟中可清晰呈现。对 EBIT 内束流传输与离子约束性能做校准优化时，需充分考量这一非对称分布特征。

2.4.2 电子轨迹

基于同一软件，开展 SL-EBIT 中电子束轨迹的数值模拟研究，模拟以 LaB_6 阴极作为电子发射源，设置发射束流为 9 mA，阴极发射面直径为 0.3 mm。模拟结果表明，电子束在穿过阱区中心时仍保持良好的

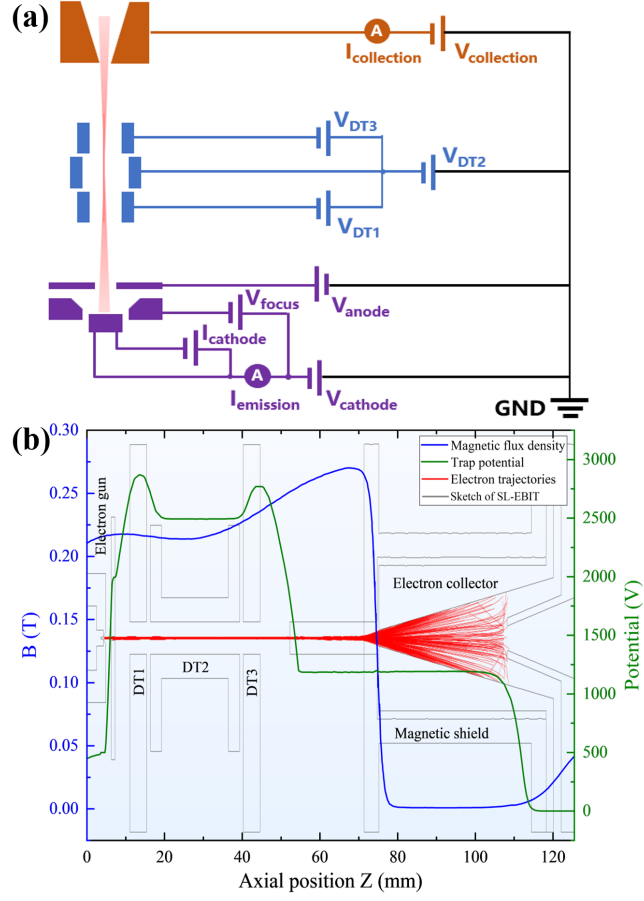


图 3 (a) SL-EBIT 电源配置示意图。(b) 沿束轴方向的模拟结果：轴向静电电位、磁通密度及电子束轨迹。DT1–DT3 的电压形成以 DT2 为中心的轴向势阱，用于约束高电荷态离子。超导线圈在阱中心产生约 0.21 T 的峰值磁场，实现电子束的磁压缩与稳定传输。

Fig. 3. (a) Schematic of the SL-EBIT power supply configuration. (b) Simulated axial distributions of electrostatic potential, magnetic flux density, and electron beam trajectories along the trap axis. Voltages applied to DT1–DT3 create an axial potential well centered at DT2 for trapping highly charged ions. The superconducting coils generate a peak magnetic field of about 0.21 T at the trap center, enabling magnetic compression and stable transport of the electron beam.

空间约束，束斑直径约 0.31 mm，涵盖超过 99% 的总束流强度。随着电子逐渐脱离阱区并向收集极运动，束流明显发散，该现象主要源于磁场梯度的下降以及离子引出区电极静电排斥的共同作用。

电子收集极位置经的设计，可有效接收发散后的束流包络。各级电极电压经优化，最大限度减小阴极与收集极间的电势差，降低功率耗散与热负荷。收集极整体置于液氮冷却的真空腔室内，保障长时间运行的热稳定性。

2.5 装置运行和电子束性能测试

SL-EBIT 的实验平台由主体真空室、气体注入系统、光谱测量系统和光谱定标系统共同构成。运行过程中，加热的 LaB₆ 阴极发射电子，在阴极与阳极之间的加速电压（0-2000 V 可调）作用下，形成能量连续可调的准直电子束。电子束进入由高温超导线圈产生的轴向磁场区域，在线圈工作电流 20 A、中心磁场 0.21 T 的条件下被有效径向压缩，束流在阱区内的传输效率和能量密度得以提高。

压缩后的电子束通过由 DT1、DT2、DT3 构成的静电透镜系统。其中 DT2 作为中心电离与离子俘获区域，其电位相对于 DT1 和 DT3 适当降低，在轴向形成深度可调的静电势阱。实验气体（如氩气、氪气等）通过精密微漏阀注入 DT2 区域，中性原子或低电荷态离子在高能电子束作用下经历多次碰撞电离，逐步提升至目标高电荷态（如 Ar¹⁶⁺、Kr³²⁺）。当需要将离子引出时，通过向漂移管施加纳秒量级的快速电压脉冲，瞬时改变势阱构型，使离子沿轴向从下游出口引出，输送至后续实验系统。

为系统评估电子束性能，在固定磁场强度为 0.21 T 的条件下，研究了引出电压（即阴极与阳极之间的电位差，范围为 0-2000 V）对电子束电流的影响。图4(a) 显示，电子束电流随引出电压升高呈单调增长，在 1300 V 时达到 9.75 mA。该结果证实，在较强加速电场下阴极发射能力增强，且电子光学系统具有高效率束流传输能力。

在固定电子束能量为 1000 eV 的条件下，通过改变阴极加热电流，进一步研究了电子的发射电流与收集极电流特性。如图4(b) 所示，两者均随加热电流的增加呈现近似线性增长关系。当加热电流超过 1.4 A 后，电子收集效率趋于稳定，并始终保持在 97% 以上，表明电子束具有优异的准直性和聚焦性能，同时验证了电子枪及其电子光学系统的有效性与运行稳定性。

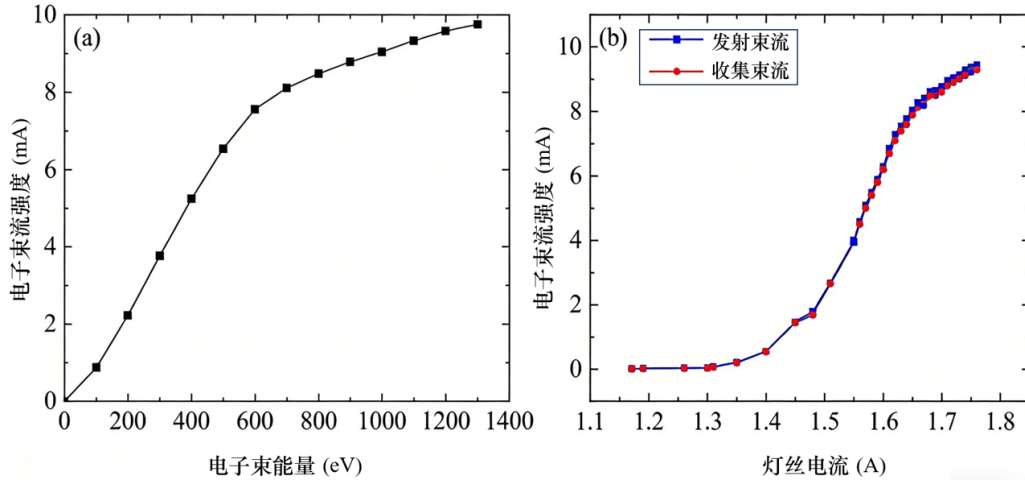


图 4 (a) SL-EBIT 中电子束电流与引出电压的关系。(b) 在 1000 eV 电子束能量下，发射电流和收集极电流与阴极加热电流的关系。

Fig. 4. (a) Electron-beam current as a function of extraction voltage in the SL-EBIT. (b) Dependence of the emission and collector current on the cathode heating current at an electron beam energy of 1000 eV.

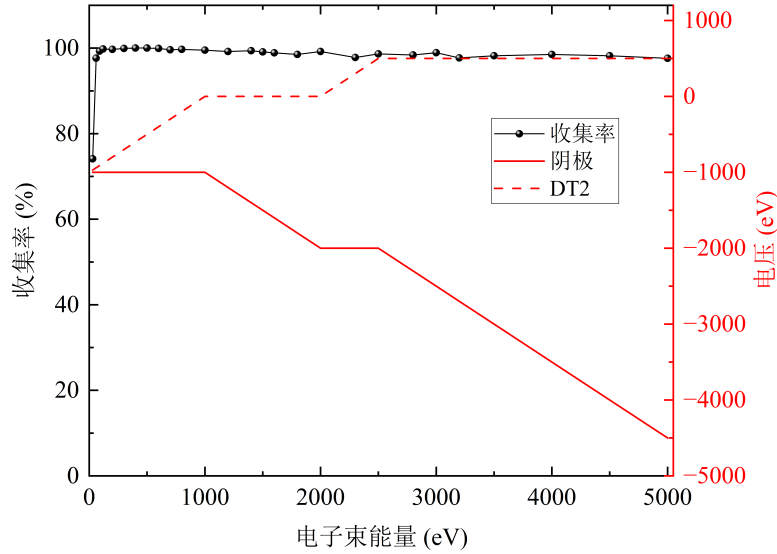


图 5 电子收集效率（黑色曲线，左轴）随电子束能量的变化，以及对应的阴极电压（红色实线，右轴）和 DT2 电压（红色虚线，右轴）。电子束能量 $E_e = V_{\text{DT2}} - V_{\text{阴极}}$ 。红色曲线的折线特征反映了宽能区测量中分段线性扫描的电压设置。

Fig. 5. Electron collection efficiency (black curve, left axis) as a function of electron beam energy, together with the corresponding cathode voltage (red solid line, right axis) and DT2 voltage (red dashed line, right axis). The electron beam energy is defined as $E_e = V_{\text{DT2}} - V_{\text{cathode}}$. The polyline characteristic of the red curves reflects the voltage settings of the piecewise linear scanning over the broad energy range.

在 40–5000 eV 的宽电子束能量区间内，采用分段步进方式联合调节阴极电压与 DT2 偏置电压，电子束能量定义为 $E_e = V_{\text{DT2}} - V_{\text{阴极}}$ ，对应的电压设置如图5红色曲线所示（红色实线：阴极电压；红色虚线：DT2 电压）。在整个能量区间内，电子收集效率（黑色曲线）均保持在 97% 以上，仅个别能量点由于束流光学条件的敏感性及空间电荷效应的影响出现了小于 1% 的微小波动。该结果表明，电子束在宽能区下仍具备良好的传输稳定性与聚焦特性，进一步验证了电子光学系统设计的稳定性和可靠性。

在装置运行过程中，所有关键参数（阴极与阳极电压、阴极加热电流、漂移管偏置电压、电子束能量及收集极电流）均通过控制系统实时监测与闭环调节。整个束流传输系统工作于液氮低温恒温环境中，有效抑制热噪声及气体吸附效应，使系统维持在约 10^{-10} Torr 量级的超高真空条件，从而显著降低本底气体碰撞概率，为高精度光谱测量及高电荷态离子研究提供了稳定的实验环境。

综上所述，电子束径向尺寸由阴极发射面直径、阴极温度、束流强度、轴向磁场强度和电子束能量等因素共同决定。SL-EBIT 通过选用小尺寸 LaB₆ 阴极（直径 0.3 mm）、控制工作温度约 1700 K、施加 0.21 T 轴向磁场以及使用高稳定电源，实现了优于 65 μm 的束流半径。宽能区、高传输效率的电子束为高效电离和低本底光谱采集奠定了基础。

2.6 光谱校刻系统及其测试实验

装置采用共轭光学光谱校刻系统实现高精度波长定标，原理如图6所示。系统以标准低压惰性气体笔式校刻灯为光源，在校刻光源与离子阱之间安装焦距 $f = 150$ mm 的平凸透镜，将定标光谱直接成像于离子阱中心区域（DT2）。校刻光源与光谱仪狭缝对称分布于透镜两侧的 $2f$ 处，满足共轭成像条件，确保校刻光源与离子发射区精确空间对准，有效消除光路偏移带来的系统误差。

为评估该共轭校刻系统的波长不确定度，采用标准 Ar 灯与 EBIT 中产生的 Ar 原子发射谱线开展比对测量。选取 Ar I 的 557.03 nm 跃迁线为校准对象，校灯灯模式下直接测量标准 Ar 灯谱线，气体注入模式下向 EBIT 注入高纯 Ar 气（注汽压 5.0×10^{-6} Torr），调节电子束能量 80 eV、束流 8.89 mA，经电子碰撞激发使 Ar 原子退激产生同波长光谱线。采用卓立汉光 Omni- λ 5008i 光谱仪测量谱线，该光谱仪配备三组可互换光栅，具体参数见表 2，选用 1200 线/mm 光栅（闪耀波长 500 nm）完成光谱色散，信号由 Andor DU971P-VB 型 CCD 探测器采集。离子辐射光经焦距 $f = 150$ mm 的透镜收集后耦合至光谱仪。光谱仪入射狭缝宽度为 30 μm ，单次测量时间为 1800 s。两种模式交替测量，共完成 8 组独立实验。对所得谱线进行高斯拟合，分别获得两种模式下谱线中心的像素位置，计算其像素差值的绝对值，取 8 组

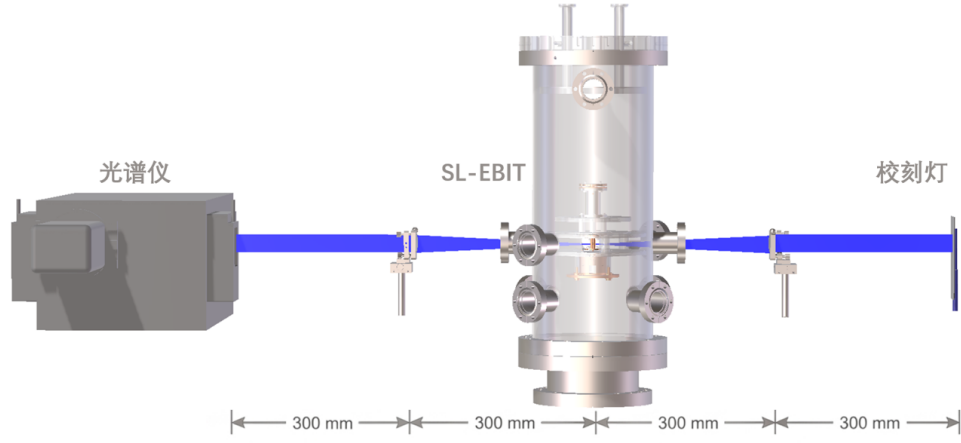


图 6 SL-EBIT 实验装置集成示意图。装置主体由 EBIT、光谱仪及外部共轭校刻系统组成。离子辐射光经透镜系统收集后耦合至 CCD 光谱仪。外部共轭校刻系统将定标灯成像于阱中心，再成像至光谱仪狭缝。

Fig. 6. Integrated schematic of the SL-EBIT experimental setup. The system mainly consists of the EBIT, a spectrometer, and an external conjugate calibration system. The ion emission light is collected by a lens system and coupled to a CCD spectrometer. The external conjugate calibration system images the calibration lamp onto the trap center and then onto the spectrometer slit.

测量结果的平均值作为校刻系统的像素偏移量，得到 $\Delta p = 0.0053$ 像素。根据光谱仪的色散函数，在该波长处的导数 $d\lambda/dp$ 换算得到 $\Delta\lambda = |d\lambda/dp| \cdot \Delta p = 1.78$ pm，该值表征了校刻光源与离子发射区空间对准的残余偏差及光路成像误差，即为共轭光学校刻系统的波长不确定度。

表 2 Omni- $\lambda 5008i$ 光谱仪光栅参数

Table 2. Grating parameters of the Omni- $\lambda 5008i$ spectrometer

光栅编号	刻线密度	闪耀波长	波长范围	分辨率
Grating No.	Groove density	Blaze wavelength	Wavelength range	Resolution
	(lines/mm)	(nm)	(nm)	(nm)
1	2400	300	250-600	0.045
2	1200	500	330-1000	0.110
3	600	500	330-1000	0.238

3 高电荷态氩离子的光谱测量

为验证 SL-EBIT 的精密光谱测量能力, 选取类氟 Ar^{9+} 离子作为研究对象, 对其基态磁偶极精细结构跃迁进行高精度波长测量^[60]。其实验原理如图7所示, 实验过程中, 热阴极 LaB_6 电子枪发射的电子束经高压差加速后进入漂移管, 被高温超导线圈产生的约 0.21 T 轴向磁场径向压缩至约 150 μm 。阱区本底真空维持在 1×10^{-9} Torr, 氩气通过差分注气系统在注汽压为 1.0×10^{-7} Torr 下注入 DT2 中心区域。电子束与中性氩原子发生碰撞电离, 核外电子被逐级剥离, 离子电荷态不断升高。产生的高电荷态离子受到三重约束: 电子束空间电荷效应的径向约束、磁场的径向约束, 以及漂移管偏压形成的轴向静电势阱约束, 从而被稳定囚禁于漂移管中心。

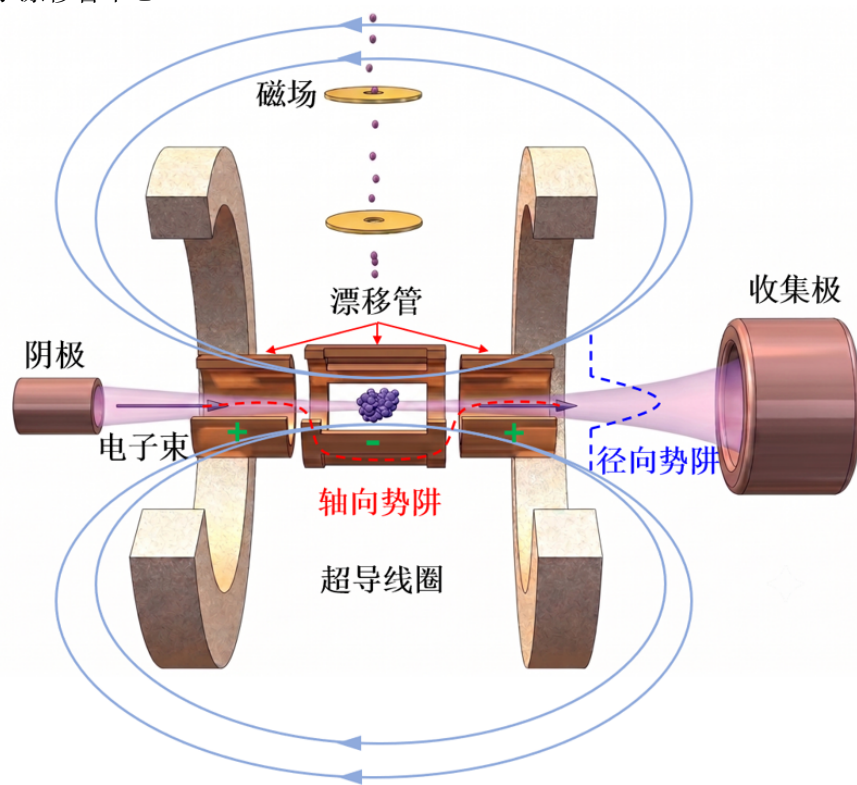


图 7 SL-EBIT 原理结构示意图。

Fig. 7. Schematic diagram of the SL-EBIT principle.

离子电荷态主要由电子束能量决定。产生 Ar^{9+} 所需的最小电子束能量为 422.60 eV。测量了不同电子束能量下 Ar^{9+} 发射谱线的强度, 结果如图8(c) 所示。在束流 8 mA、电子束能量为 480 eV 时, Ar^{9+} 离子的谱线强度最强。在此优化条件下, 对 Ar^{9+} 的 $1s^2 2s^2 2p^5 \ ^2P_{3/2} \rightarrow \ ^2P_{1/2}$ 磁偶极 (M1) 跃迁进行多次独立测量, 单次测量累积时间设为 8 h, 用以提升信噪比; 重复测量用于提高统计精度并检验结果的可重复性。

光谱仪采集的原始数据为二维谱 (像素行与列), 如图 8(a) 所示, 沿非色散方向 (纵向) 累加像素点计

数得到一维谱线（图 8(b)）；累加前需扣除宇宙射线产生的孤立高计数点。电子枪工作温度较高（约 1700 K），其热辐射经漂移管内壁反射后被 CCD 记录，导致谱线本底随波长增大而升高（基线”上翘”）。经本底扣除后得到处理后的谱线（8(d)），采用高斯函数对处理后的谱线进行拟合，结合多次测量结果的误差加权平均，确定 Ar^{9+} 的跃迁波长为 553.3274 nm。

同步测量校刻谱线并分析色散函数的误差，用于波长定标与不确定度评估，结果如图8所示。定标系统以标准低压惰性气体笔式校刻灯为光源，通过共轭光学系统将定标光谱成像于离子阱中心区域，确保定标光源与离子发射区空间对准。离子辐射光经焦距 $f = 150 \text{ mm}$ 的透镜收集后耦合至光谱仪，每次独立测量均用 Kr 标准灯对谱线独立校刻，以减小系统误差。

波长测量不确定度分析

对 Ar^{9+} 跃迁波长的总不确定度进行了系统评估，不确定度主要来源于四个方面：线型中心、色散函数、校刻谱线以及校刻系统的不确定度^[42,50]。各分量的评估方法如下：

线型中心不确定度。每条实测谱线及校刻谱线的质心均通过高斯拟合确定。中心位置的统计不确定度主要由有限信噪比导致。为减小该不确定度，对 Ar^{9+} 谱线进行了 12 次独立测量，采用加权平均（权重取拟合不确定度的倒数）计算谱线中心，得到线型中心不确定度为 0.9 pm。

色散函数不确定度。光谱仪的色散函数通过 Kr 校刻灯的多条已知波长谱线确定。如图8(f) 所示，测量校刻灯在 552–570 nm 波段内的发射谱线，对每条谱线进行高斯拟合得到像素中心 p_i ，以参考波长 λ_i 为因变量、 p_i 为自变量进行二阶多项式拟合

$$\lambda(p) = A + B \cdot p + C \cdot p^2,$$

其中 A, B, C 为拟合参数。该函数将像素坐标转换为波长。色散函数的不确定度源于校刻谱线的高斯拟合误差及多项式拟合的统计不确定度两个方面。如图8(g) 和 (h) 所示，分别采用一阶和二阶多项式拟合色散函数，计算拟合残差的标准差并给出 1σ 置信区间。比较残差分布可知，二阶多项式无明显系统偏差，故选用二阶多项式。色散函数的不确定度由拟合残差的标准差计算得出，并对多次校刻序列的结果取平均值，最终确定色散函数的不确定度为 3.4 pm。

校刻谱线不确定度。校刻谱线对应的不确定来源于其参考波长的标称不确定度。本工作所用谱线波长取自 NIST 原子光谱数据库^[61]，各校刻线的不确定度均小于 0.01 pm。为偏安全估计并涵盖潜在系统偏差，统一取 0.01 pm。

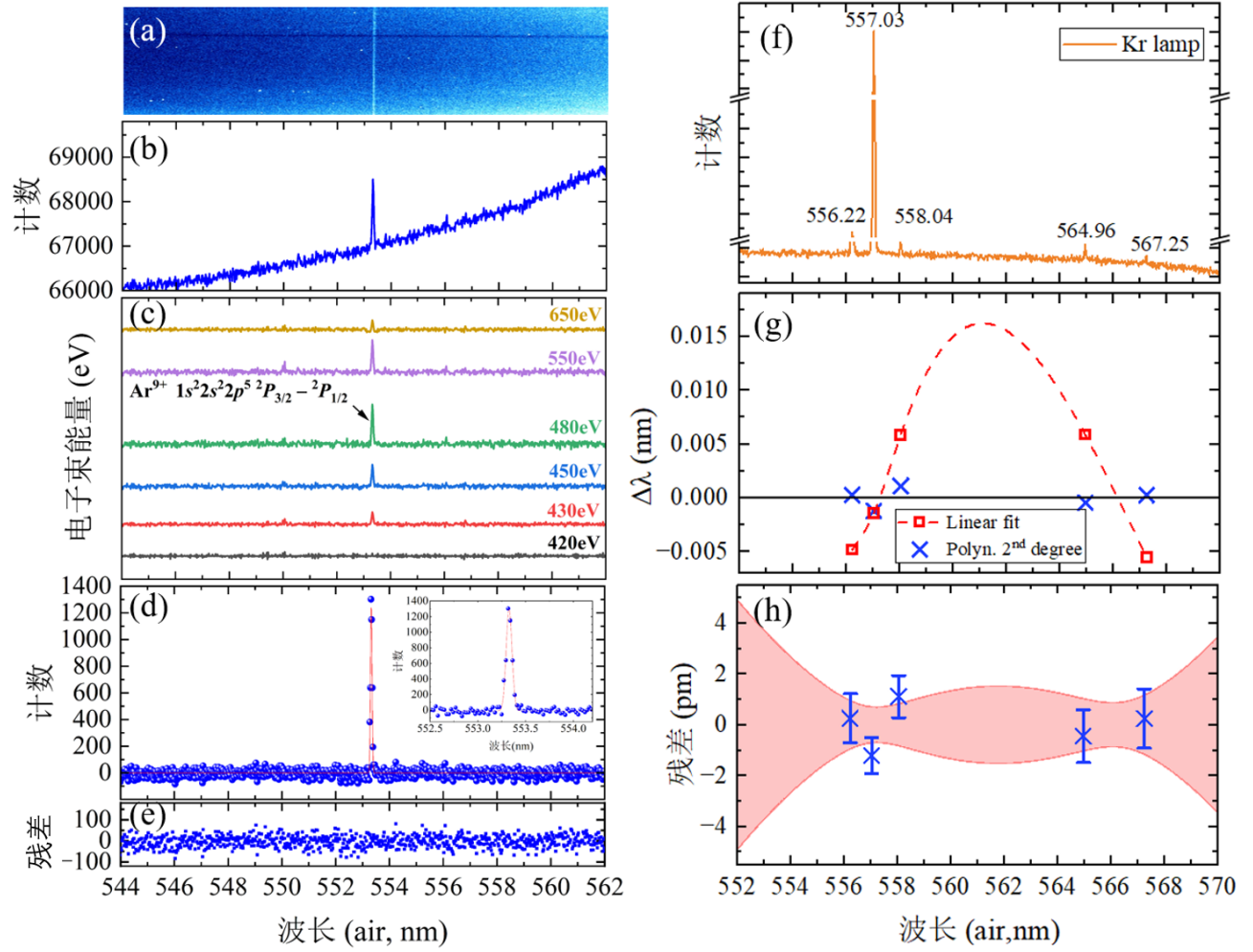


图 8 Ar^{9+} 离子 M1 跃迁发射光谱与校刻谱线。(a) 522-544 nm 波段的二维像素图；(b) 像素图纵向累加积分谱线；(c) 电子束能量分别为 420、430、450、480、550、650 eV 下的 Ar^{9+} 发射光谱；(d) Ar^{9+} 光谱高斯拟合结果；(e) 高斯拟合残差；(f) Kr 标准灯在 552–570 nm 波段的校刻光谱；(g) 校刻谱线一、二阶多项式拟合残差；(h) 放大残差与 1σ 置信带。

Fig. 8. M1 transition emission spectra and calibration spectra of Ar^{9+} . (a) Two-dimensional pixel image in the range of 522–544 nm; (b) Integrated spectrum by longitudinal accumulation of pixel image; (c) Emission spectra of Ar^{9+} at electron beam energies of 420, 430, 948, 400, 600, 1200 eV; (d) Gaussian fitting of Ar^{9+} spectrum; (e) Residuals of Gaussian fitting; (f) Calibration spectrum of Kr standard lamp within 552–570 nm; (g) First- and second-order polynomial fitting residuals of calibrated spectral lines; (h) amplified residuals and 1σ confidence bands.

校刻系统的不确定度。该分量即第 2.6 节给出的 1.78 pm，由标准 Ar 灯与阱内 Ar 谱线的像素差结合色散函数导数换算得到，表征空间对准与光路成像误差。

表3汇总了各项不确定度的贡献。总不确定度由线型中心的不确定度和色散函数的不确定度先均方根，再与校刻谱线不确定度和校刻系统不确定度线性相加，得到 Ar^{9+} 跃迁波长的总不确定度为 5.4 pm。

表 3 Ar^{9+} 跃迁波长测量不确定度分析

Table 3. Uncertainty budget for the measured wavelength of the Ar^{9+} M1 transition

不确定度来源	波长不确定度 (pm)
线型中心	0.9
色散函数	3.4
校刻谱线	0.01
校刻系统	1.8
总不确定度	5.4

最终确定 Ar^{9+} 的磁偶极禁戒跃迁波长为 553.3274(54)，与海德堡 EBIT [7] 测量结果 553.3260(2) 高度吻合，偏差小于 0.002 nm，在不确定度范围内。这一结果验证了 SL-EBIT 对中等电荷态离子的产生与约束能力，以及电子束控制、势阱配置和光谱收集系统的有效性。该装置在光学原子钟、等离子体诊断及基础物理检验等领域的高电荷态离子精细与超精细结构测量中具有重要应用前景。

4 结 论

本文报道了高温超导电子束离子阱 SL-EBIT 的设计、性能测试结果及其在精密光谱测量中的初步应用。该装置针对高电荷态离子精密谱学研究进行了优化，实现了电子束在 40–5000 eV 宽能量范围内的稳定运行，收集效率超过 97%，束流半径小于 65 μm ，最大束流达 9.75 mA。利用 SL-EBIT 实现了 Ar^{9+} 离子的产生及囚禁，并精确测量了位于 553.3274 nm 处的精细结构跃迁，测量不确定度为 5.4 pm。测得波长与已有高精度文献结果一致，最大偏差小于 0.002 nm，验证了装置的高精度光谱测量能力。

SL-EBIT 的核心特色是宽能区电子束 (80–8000 eV) 与全内置离子引出能力的集成。宽能区设计将精密光谱测量的能量范围从可见光拓展至低能 X 射线波段，并可将中等质量元素电离至类氢、类锂等高电荷态，从而为高电荷态离子精密谱研究提供宽波段实验平台。内置快速脉冲及单透镜模块使其兼有阱内光

源和阱外离子源双重功能。上述结果表明, SL-EBIT 已具备开展高电荷态离子精密光谱学研究的条件, 其电子束稳定性、真空环境及光谱定标系统均满足设计指标。装置内置的离子引出模块为后续开展电荷态选择引出、阱外激光光谱学及超精细结构测量研究奠定了坚实的实验基础。SL-EBIT 作为 SH-HtscEBIT 的升级装置, 进一步拓展了国内紧凑型 EBIT 在能量范围和离子操控方面的实验能力, 为后续开展阱外激光光谱、超精细结构测量等精密实验提供了新的平台。

5 致 谢

本工作得到国家重点研发计划(2022YFA1602500)、国家自然科学基金(12393824, 12334010, 12374228)。

参考文献

- [1] Gillaspay J D 2001 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **34** R93
- [2] Kozlov M G, Safronova M S, Crespo López-Urrutia J R, Schmidt P O 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 045005
- [3] Indelicato P 2019 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **52** 232001
- [4] Beiersdorfer P 2010 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** 074032
- [5] Volotka A V, Glazov D A, Andreev O V, Shabaev V M, Tupitsyn I I, Plunien G 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 073001
- [6] Shabaev V M, Glazov D A, Plunien G, Volotka A V 2015 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **44** 031205
- [7] Draganić I, Crespo López-Urrutia J R, DuBois R, Fritzsche S, Shabaev V M, Orts R S, Tupitsyn I I, Zou Y, Ullrich J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 183001
- [8] Derevianko A, Dzuba V A, Flambaum V V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 180801
- [9] Safronova M S, Dzuba V A, Flambaum V V, Safronova U I, Porsev S G, Kozlov M G 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 030801
- [10] Yudin V I, Taichenachev A V, Derevianko A 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 233003

- [11] King S A, Spieß L J, Micke P, Wilzewski A, Leopold T, Benkler E, Lange R, Huntemann N, Surzhykov A, Yerokhin V A, Crespo López-Urrutia J R, Schmidt P O 2022 *Nature* **611** 43
- [12] Chen S, Zhou Z, Li J, Zhang T, Li C, Shi T, Huang Y, Gao K, Guan H 2024 *Phys. Rev. Res.* **6** 013030
- [13] Schiller S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 180801
- [14] Berengut J C, Dzuba V A, Flambaum V V 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 120801
- [15] Berengut J C, Dzuba V A, Flambaum V V, Ong A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 210802
- [16] Windberger A, Crespo López-Urrutia J R, Bekker H, Oreshkina N S, Berengut J C, Bock V, Borschevsky A, Dzuba V A, Eliav E, Harman Z, Kaldor U, Kaul S, Safronova U I, Flambaum V V, Keitel C H, Schmidt P O, Ullrich J, Versolato O O 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 150801
- [17] Dzuba V A, Flambaum V V 2015 *Hyperfine Interact.* **236** 79
- [18] Pruttivarasin T, Ramm M, Porsev S G, Tupitsyn I I, Safronova M S, Hohensee M A, Häffner H 2015 *Nature* **517** 592
- [19] Shaniv R, Ozeri R, Safronova M S, Porsev S G, Dzuba V A, Flambaum V V, Häffner H 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 103202
- [20] Safronova M S, Budker D, DeMille D, Kimball D F J, Derevianko A, Clark C W 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 025008
- [21] Lisse C M, Christian D J, Dennerl K, Meech K J, Petre R, Weaver H A, Wolk S J 2001 *Science* **292** 1343
- [22] Shull J M, Smith B D, Danforth C W 2012 *Astrophys. J.* **759** 23
- [23] Nicastro F, Mathur S, Elvis M 2008 *Science* **319** 55
- [24] Beiersdorfer P 2003 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **41** 343
- [25] Shah C, Dobrodey S, Bernitt S, Steinbrügge R, López-Urrutia J R C, Gu L, Kaastra J 2016 *Astrophys. J.* **833** 52

- [26] Del Zanna G, Mason H E 2018 *Living Rev. Sol. Phys.* **15** 5
- [27] Edlén B 1984 *Phys. Scr.* **1984** 5
- [28] Iwamae A, Atake M, Sakaue A, Katai R, Goto M, Morita S 2007 *Phys. Plasmas* **14** 042504
- [29] Rosen A S, Reinke M L, Rice J E, Hubbard A E, Hughes J W 2014 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **47** 105701
- [30] Beiersdorfer P 2015 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **48** 144017
- [31] Levine M A, Marrs R E, Henderson J R, Knapp D A, Schneider M B 1988 *Phys. Scr.* **1988** 157
- [32] Donets E D, Ilushenko V I, Alpert V A 1969 In *Proceedings of the First International Conference on Ion Sources* (Saclay, France), p 635
- [33] Donets E 1985 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **9** 522
- [34] Levine M, Marrs R, Bardsley J, Beiersdorfer P, Bennett C, Chen M, Cowan T, Dietrich D, Henderson J, Knapp D, Osterheld A, Penetrante B, Schneider M, Scofield J 1989 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **43** 431
- [35] Knapp D, Marrs R, Elliott S, Magee E, Zasadzinski R 1993 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **334** 305
- [36] Marrs R E, Elliott S R, Knapp D A 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 4082
- [37] Henderson J R, Beiersdorfer P, Bennett C L, Chantrenne S, Knapp D A, Marrs R E, Schneider M B, Wong K L, Doschek G A, Seely J F, Brown C M, LaVilla R E, Dubau J, Levine M A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 705
- [38] Rudolph J K, Bernitt S, Epp S W, Steinbrügge R, Beilmann C, Brown G V, Eberle S, Graf A, Harman Z, Hell N, Leutenegger M, Müller A, Schlage K, Wille H C, Yavas H, Ullrich J, López-Urrutia J R C 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111**
- [39] Kimura N, Kodama R, Suzuki K, Oishi S, Wada M, Okada K, Ohmae N, Katori H, Nakamura N 2019 *Phys. Rev. A* **100** 052508

- [40] Epp S W, López-Urrutia J R C, Brenner G, Mäkel V, Mokler P H, Treusch R, Kuhlmann M, Yurkov M V, Feldhaus J, Schneider J R, Wellhöfer M, Martins M, Wurth W, Ullrich J 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 183001
- [41] Lu Q, Yan C L, Xu G Q, Fu N, Yang Y, Zou Y, Volotka A V, Xiao J, Nakamura N, Hutton R 2020 *Phys. Rev. A* **102** 042817
- [42] Zhou X P, Liu X, Wen W Q, Yuan Y, Huang H K, Huang Z K, Wang H B, Wan M Y, Xiao J, Kozhedub Y S, Malyshev A V, Shabaev V M, Li J G, Zhang S F, Ma X 2025 *Phys. Rev. A* **112** 062815
- [43] Motohashi K, Moriya A, Yamada H, Tsurubuchi S 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 890
- [44] Nakamura N, Kikuchi H, Sakaue H A, Watanabe T 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 063104
- [45] Kimura N, Priti, Kono Y, Pipatpakorn P, Soutome K, Numadate N, Kuma S, Azuma T, Nakamura N 2023 *Commun. Phys.* **6** 8
- [46] Kimura N, Miya Y, Ito D, Priti, Kato D, Baba M, Kuma S, Azuma T, Nakamura N 2024 *Astrophys. J.* **972** 12
- [47] Miya Y, Kimura N, Ito D, Priti, Baba M, Kuma S, Azuma T, Nakamura N 2025 *New J. Phys.* **27** 063203
- [48] Xiao J, Zhao R, Jin X, Tu B, Yang Y, Lu D, Hutton R, Zou Y 2013 In *Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference, IPAC2013* (Shanghai, China: JACoW), pp 434–436
- [49] Xiao J, Fei Z, Yang Y, Jin X, Lu D, Shen Y, Liljeby L, Hutton R, Zou Y 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 013303
- [50] Liu X, Zhou X P, Wen W Q, Lu Q F, Yan C L, Xu G Q, Xiao J, Volotka A V, Kozhedub Y S, Kaygorodov M Y, Huang Z K, Ma W L, Wang S X, Ma X 2021 *Phys. Rev. A* **104** 062804
- [51] Liu X, Qu F H, Wen W Q, Zhou X P, Volotka A V, Kozhedub Y S, Glazov D A, Zinenko D V, Li J G, Tu B, Yao K, Yang Y, Wei B, Ma X, Zou Y, Xiao J 2026 *Spectrochim. Acta B* **235** 107349

- [52] Micke P, Kühn S, Buchauer L, Harries J R, Bücking T M, Blaum K, Cieluch A, Egl A, Hollain D, Kraemer S, Pfeifer T, Schmidt P O, Schüssler R X, Schweiger C, Stöhlker T, Sturm S, Wolf R N, Bernitt S, Crespo López-Urrutia J R 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 063109
- [53] Bernitt S, Kühn S, Togawa M, Steinbrügge R, Shah C, Leutenegger M, Micke P, Stöhlker T, Crespo López-Urrutia J 2025 *J. Instrum.* **20** C03030
- [54] Liang S Y, Lu Q F, Wang X C, Yang Y, Yao K, Shen Y, Wei B R, Xiao J, Chen S L, Zhou P P, Sun W, Zhang Y H, Huang Y, Guan H, Tong X, Li C B, Zou Y M, Shi T Y, Gao K L 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 093301
- [55] Jiang Z H, Qian Y Y, Xu P C, Khan N, Meng S Y, Niu B, Zhang L, Ding X B, Huang L Y, Tu B S, Fu Y Q, Zou Y M, Yao K 2023 *Phys. Lett. A* **463** 128669
- [56] Park S, Shin B, Cosgun E, Han J, Chung M 2024 *J. Korean Phys. Soc.* **84** 337
- [57] Amano Y, Hirata L, Togawa M, Suzuki H, Sakaue H A, Kimura N, Nakamura N, Sawada M, Oura M, Danisch J, Goes J, Botz M, Crespo López-Urrutia J R, Yamaguchi H 2026 *Plasma Fusion Res.* **21** 2406003
- [58] Huang L Y, Niu B, Chen Z Y, Song J J, Ge Y H, He J Y, Zou Y M, Yao K 2026 *J. Instrum.* **21** P04034
- [59] 2017 *COMSOL Multiphysics Reference Manual 5.3a*, COMSOL, Inc.
- [60] Liu X, Zhou X P, Wen W Q, Huang Z K, Wang H B, Xiao J, Zou Y, Ma X 2026 *Rev. Sci. Instrum.* **97** 053301
- [61] Kramida A, Ralchenko Y, Reader J, Team N A 2024. [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd>

Development of the high-temperature superconducting electron beam ion trap SL-EBIT and precision spectroscopy of highly charged Argon ions*

ZHOU Xiaopeng¹⁾²⁾ LIU Xin³⁾ WEN Weiqiang^{1)2)†} YUAN Yang¹⁾²⁾
LIU Chang⁴⁾ HUANG Zhongkui¹⁾²⁾ WANG Hanbing¹⁾²⁾ ZHANG La¹⁾²⁾
HUANG Xinhua¹⁾²⁾ XIAO Jun^{3)‡} ZHANG Shaofeng¹⁾²⁾ MA Xinwen¹⁾²⁾

1) (*National Key Laboratory of Heavy Ion Science and Technology, Institute of Modern
Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,
China*)

3) (*Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application (MOE), Institute of Modern
Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

4) (*Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale, Department of
Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract

Precision spectroscopy of highly charged ions (HCIs) plays a crucial role in plasma diagnostics, tests of quantum electrodynamics (QED), exploration of nuclear structure, and the development of optical atomic clocks. Electron beam ion traps (EBITs) are capable of producing and confining HCIs of any element

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1602500), the
National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12393824, 12334010, 12374228)

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: wenweiqiang@impcas.ac.cn (Corresponding author)

‡ Corresponding author. E-mail: xiao_jun@fudan.edu.cn (Corresponding author)

The First Author. E-mail: zhouxiaopeng@impcas.ac.cn (First author)

under well-controlled laboratory conditions. By bombarding neutral atoms or low-charge-state ions with a high-energy electron beam, these devices utilize electromagnetic fields to keep the ions nearly at rest within the trap region, thereby suppressing Doppler broadening and serving as ideal platforms for precision spectroscopy. Here, we report on the design, commissioning, and first spectroscopic application of a newly developed high-temperature superconducting EBIT, designated as the Shanghai-Lanzhou Electron Beam Ion Trap (SL-EBIT).

The apparatus fundamentally comprises an electron gun, a three-section drift tube assembly, ion extraction electrodes, high-temperature superconducting coils, and a liquid nitrogen cryogenic system. A pair of high-temperature superconducting coils generates an axial magnetic field of up to 0.24 T, providing strong radial compression of the electron beam. The electron beam energy is continuously tunable from 80 to 8000 eV, with a beam radius better than $65\text{ }\mu\text{m}$ and a maximum beam current of 10 mA. The trap region is maintained at an ultra-high vacuum of $\sim 10^{-10}$ Torr via differential pumping and liquid nitrogen cooling, which effectively suppresses charge exchange between the produced HCIs and residual background gases. For wavelength calibration, the device is equipped with an innovative conjugate optical calibration system that images a standard emission lamp directly onto the trap center; this architecture inherently eliminates systematic geometric errors caused by optical path misalignment, enabling high-precision wavelength determination of emission lines in the visible range. In addition, dedicated spectroscopic access ports for both X-ray and visible wavelengths allow for precision spectroscopy of HCIs over a broad spectral range, laying a solid foundation for future experimental extensions toward the low-energy X-ray region.

To characterize the performance of the device, we produced and confined fluorine-like Ar^{9+} ions via successive electron-impact ionization of injected argon gas, and performed high-resolution wavelength measurements of the ground-state magnetic-dipole (M1) transition ($1s^22s^22p^5\text{ }^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$). The ion emission spectra were recorded using a 0.5 m spectrometer equipped with a 1200 lines/mm grating and a liquid-nitrogen-cooled CCD detector. The line centroid was extracted by a Gaussian profile fit to the line shape, and the absolute wavelength scale was calibrated against a standard krypton (Kr) lamp. The transition wavelength is determined to be 553.3274(54) nm, which is in excellent agreement with previous high-precision measurements of 553.3260(2) nm from the Heidelberg EBIT, yielding a residual deviation

of less than 0.002 nm. The total uncertainty of 5.4 pm is dominated by the dispersion function fitting (3.4 pm) and the calibration system stability (1.8 pm). These commissioning results demonstrate that the SL-EBIT achieves a spectroscopic precision comparable to that of leading international facilities.

The successful operation of the SL-EBIT establishes a novel, compact platform for precision spectroscopy of HCIs in China. Its integrated ion extraction capability opens up distinct possibilities for future trap-external laser spectroscopy, charge-state-selective manipulation, hyperfine structure measurements, and investigations of clock-relevant forbidden transitions. The device effectively bridges the gap between conventional low-energy compact EBITs and large-scale heavy-ion storage ring facilities, offering a versatile tool for both in-trap spectroscopy and extracted-ion-beam experiments.

Keywords: electron beam ion trap, highly charged ions, precision spectroscopy, forbidden transition