arXiv:2603.09393v1 [physics.atom-ph] 10 Mar 2026

用于电子-离子交叉束实验的快速精细步进电子能量扫描系统的调试

B.Michel D¨ohring[1], [2*], Alexander Borovik Jr.[1], Kurt Huber[1],Alfred M¨uller[1], StefanSchippers[1,2]1*物理研究所，Justus-Liebig-Universität吉森，35392，吉森，德国。[2]黑森州FAIR 研究院（HFHF），GSI 重离子研究中心，64291，达姆施塔特，德国。

*通讯作者。电子邮箱：
michel.doehring@exp1.physik.uni-giessen.de；贡献作者：
alexander.borovik@physik.uni-giessen.de；
kurt.huber@strz.uni-giessen.de；
alfred.mueller@iamp.physik.uni-giessen.de；
stefan.schippers@uni-giessen.de；

摘要

本文介绍了用于测量电子碰撞电离截面的快速电子能量扫描系统的调试。吉森交叉束实验采用了一台近年来研制的高功率电子枪，可大范围调节束流参数。多电极设计使电子能量与电子密度能够彼此独立调节。本文还介绍了用于控制各电极电位的新控制系统及其主要技术特点。

关键词：电子碰撞电离、原子物理学、测量系统、数据采集、能量扫描

1 引言

离子的电子碰撞电离（EII）是一种基本的原子碰撞过程，决定着等离子体中的电荷平衡。要可靠地模拟并深入理解这类环境，必须准确测量电子碰撞引起的离子单重电离和多重电离截面。为此，吉森采用电子-离子交叉束方法已有四十年之久 [1, 及其中所引文献]。近期对 EII 截面的测量涉及极紫外光刻等离子体光源的建模 [2], 、聚变等离子体的建模 [3], 以及千新星的建模 [4], , 还研究了与 K壳层激发相关的共振电离 [5], , 并对量子理论截面计算进行了详细的基准检验 [6–8]。

吉森电子-离子交叉束装置能够成功投入使用，关键在于开发了强电子束 [9–13]。过去几十年来一直作为主力设备的电子枪，由一个电加热分配器阴极、四组电极和一个水冷阳极组成；这些电极用于限定电子-离子相互作用区的电势，并提供束流压缩能力 [14]。在最高电子能量为 1000 eV 时，该电子枪可提供高达 0.5 安培的电子电流，对应的粒子密度最高可达若干 10^8 cm^{-3}。受电子枪机械设计的限制，加速电压最高为 1000 伏特；尤其是各电极之间的距离，若在更高电压下运行，便会导致放电。

为了突破 1000 eV 的上限，同时保留产生极高电子电流的能力——这对于利用电子碰撞研究电离能高达 $\sim$1 keV 的高电荷态离子的电离过程尤为重要——研究人员设计、制造并投入运行了一种新型电子枪 [15], [16]。这种新设计基于 1000 eV 电子枪的设计 [14], , 将最高电子能量和最大电子电流分别提升至 3500电子伏特和 0.9 安培，显著高于原有水平。此外，如下文所述，与 1000 eV 电子枪相比，新电子枪配备了更多电极，从而可以更灵活地调节电子束性质。新型 3500电子伏特电子枪还作为 12.5千电子伏特电子枪的原型；后者目前用作重离子储存环 CRYRING@ESR 中的电子靶。该储存环由位于德国达姆施塔特的国际反质子与离子研究设施（FAIR）运行 [17]。

3500电子伏特电子枪已成功完成调试，用于测量绝对截面，其中采用了动态束流方法 [18–20] 。本文介绍了一种快速扫描技术的实现，该技术可测量相对EII 截面随能量的变化，且点与点之间的不确定度极低 [21]。这有助于分辨电子碰撞电离截面中的窄共振结构；我们已多次使用 1000 eV 电子枪对此进行了验证 [例如5, 21–23]。

本文的结构安排如下。第2 节介绍吉森电子-离子交叉束实验的总体特点。第3 节介绍3500电子伏特电子枪及电子束的主要特性，包括新型能量扫描系统。首次实验结果展示于第4节，用以表征扫描系统的性能。第5 节总结全文并展望未来。实验设备的更多细节汇集于附录中。

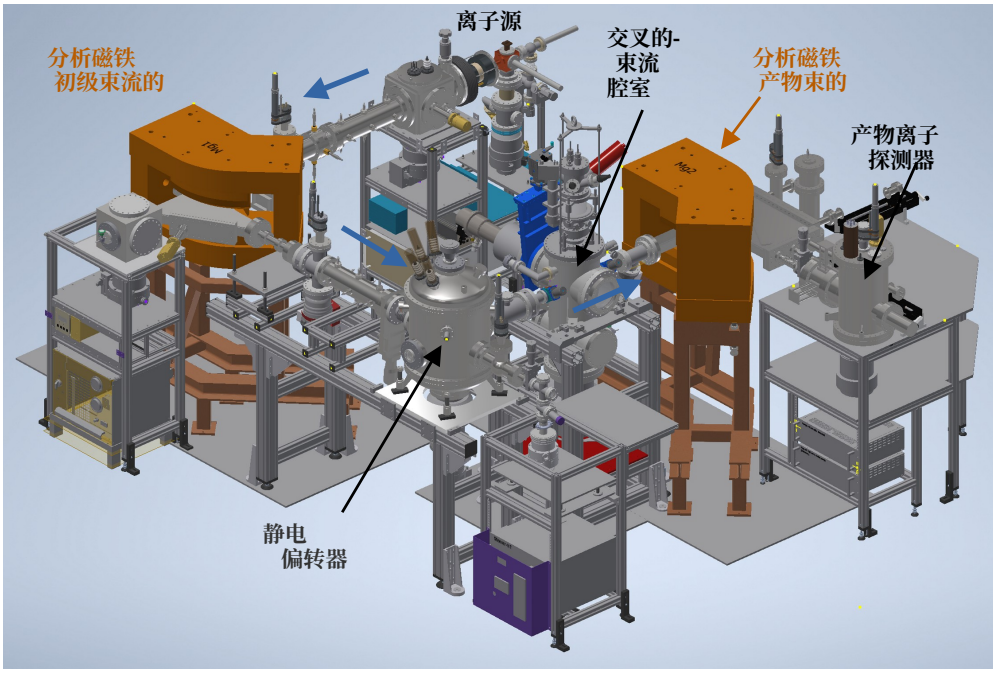

图 1 吉森电子-离子交叉束流装置的CAD图。蓝色箭头表示离子束在装置各部分中的行进方向。整个装置占地约为 4×4 米^2。

2 吉森电子-离子交叉束流装置

吉森电子-离子交叉束装置 [24–26] 已运行二十多年。图1 概述了目前的装置布局，该装置最近已搬迁至一间新实验室。现有多种（自制）离子源，可用于产生单电荷和多电荷离子，例如，10 GHz电子回旋共振（ECR）离子源 [27]、潘宁放电离子源 [28]，以及用于产生负离子的铯溅射离子源 [29]。离子源在通常为 U_{acc} 12 kV的电势下运行。离子被引出并射向电接地且抽空的束流管道，从而获得动能 eqU_{acc}，其中 e 和 q 分别表示基本电荷和离子电荷态。通过使离子束穿过磁场经过适当调节的二极磁铁，可选出具有所需质荷比 A/q的离子。进入交叉束流室前，离子束经静电偏转，随后由四爪狭缝准直，狭缝孔径可在0.1—1.6 mm范围内调节。电子-离子相互作用区前方的静电偏转旨在清除那些在与残余气体粒子碰撞时改变了电荷态的离子。

在交叉束流室中，离子束与上述电子枪产生的宽 6 厘米的带状电子束以 90° 交叉，该电子枪将在下文详细介绍。

离子 A^{q+} 的 n 重电子碰撞电离（EII）过程可表示为

$$\mathrm{A}^{q+} + e^- \rightarrow \mathrm{A}^{(q+n)+} + (n+1)e^-. \tag{1}$$

离开电子-离子相互作用区后，少量的安培$^{(q+n)+}$ 产物离子以与数量（仍多得多的）安培$^{q+}$ 初级离子相同的速度运动。第二块分析磁铁用于分离产物束中的各种离子组分，并将所关注电荷态的产物束引导至基于通道电子倍增器的单粒子探测器 [30]。初级离子由适当放置的法拉第杯收集，所产生的离子电流则由灵敏的静电计监测。到达电子枪收集极的电子电流也以类似方式测量。通过将测得的探测器计数率按离子电流和电子电流归一化，并考虑几何束流重叠，可得出绝对截面；几何束流重叠通过应用动态束流技术隐式确定[18–20] 如上文所述。绝对截面的系统不确定度介于 6.5% 和 10% 之间；在 95%置信水平下，统计不确定度通常低于 1%，但在信号水平较低的电离阈值附近除外。

测量绝对截面要求测量期间电子能量保持恒定。因此，绝对截面测量只能在各个数据点之间留有较大的时间间隔时进行，这样一来，高压电源缓慢漂移可能会导致几何束流重叠等因素出现额外的逐点变化。下文将介绍快速扫描技术 [21], ，该技术旨在通过快速扫描电子能量来平均掉这些缓慢变化；每个能量步的驻留时间仅为几毫秒。

2.1 实验控制与数据采集

用于实验控制与数据采集的自制电子设备安装在两个19英寸机箱中，分别称为控制路由 和数据路由。每个机箱均有20个用于安装欧卡模块的插槽。两个单元均通过通用串行总线（USB）连接与一台标准个人计算机（PC）通信。该计算机运行实时操作系统 VxWorks。相关硬件和软件历经30余年开发并不断扩展 [31]。

为控制电子枪的各种电压，位于控制路由中的并行转串行输出（PSO）卡将数字控制信号转换为二进制编码的串行光信号，并由适用于直径为 980-µm 光纤的光电二极管（SFH756V）产生（符合 JIS C 6863 标准）。使用光纤传输信号可确保电位隔离，并能在 1.5–20 m 长的光纤上实现可靠的信号传输。在光纤接收端，接收二极管（SFH551V）通过自行开发的现场可编程门阵列（FPGA）固件将信号送入 16 位（LTC2752）或 18 位（LTC2758）数模转换器（DAC）；该固件负责解码串行光信号。数模转换器最终为电源提供 0–10 V 的模拟编程电压。为实现对电子能量的精细控制，电子枪阴极电源的编程电压

由两个级联的 18位数模转换器提供。其余电子枪电极则由控制精度较低的 16 位数模转换器进行控制。

数据路由系统由模块化接口卡（计数器、时钟、模数转换器（ADC）等）组成，这些接口卡根据要输入数据采集系统的实验信号进行定制。每张接口卡都配有单独的控制器卡，以确保测量数据同步传输至PC系统。数据通过TCP/IP存储在Linux服务器的硬盘上。

3 3500电子伏特电子枪

图中展示了3500电子伏特电子枪的照片，见图2；图3概述了其各个电极。自首次调试以来 2017 [16],该电子枪经历了多项技术改进，包括重新设计的不锈钢水冷系统，该系统采用CF法兰和银垫片。与原始设计相比，这一改进降低了有时因冷却水流湍急而产生的振动。

电子枪的电极设计使得电势分布关于电子-离子相互作用区大体对称。阴极安装于聚焦电极P0并与之电气连接。阴极发射表面与电极P0的曲率已按电子光学模拟 [15]的预测选取，以实现最佳束流聚焦。阴极与P1电极之间的电位差 U_1决定电子发射电流 I_{cath}。对于空间电荷限制电子发射，后者遵循关系 $I_{\mathrm{cath}} = pU_1^{3/2}$ （导流系数为 p）。电子能量由阴极与电极INT1和INT2之间的电位差U_e 定义，电极INT1和INT2决定相互作用区的电势。引入有效导流系数 p_{eff}后，关系

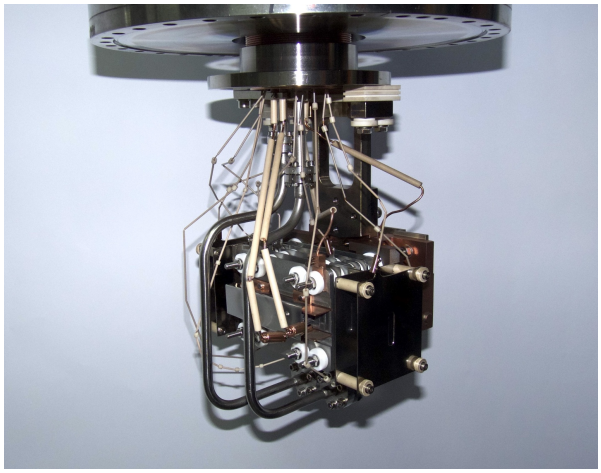

图2 3500电子伏特电子枪插入交叉束流室之前的照片（图1）。每个电极均单独进行电气连接。前景中的不锈钢管属于背景中阳极的冷却水回路。

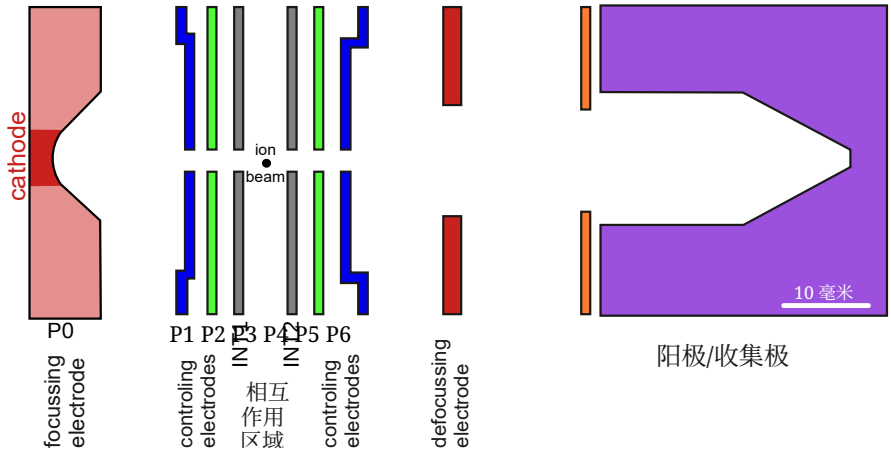

图3 沿电子束方向的剖面图，概览了3500电子伏特电子枪的各个电极。同色电极具有相同的电势。详细电路图见附录（图A1）。

介于 I_{cath} 与 U_e 之间者可近似表示为（图5a）

$$I_{\mathrm{cath}} = p_{\mathrm{eff}} U_e^{3/2}. \tag{2}$$

通常，INT1和INT2处于地电势（0 伏特），但也可以将它们设为较高电势，例如对来自相互作用区的产物离子进行“电压标记”。周围的控制电极P2和P3处于相同电势（与INT1和INT2不同），负责在相互作用区内对电子束进行整形。电子束通过相互作用区后，由电极P4、P5和P6逐步展宽，随后被导入接地收集极。

为尽可能准确地确定电子能量，并尽可能降低电子能量展宽，电源必须具备优异的规格，尤其是在重复性和残余电压波动方面。例如，阴极电源的低纹波（峰峰值）为20毫电子伏特加上设定电压的 10^{-5}倍。附录中的表A1列出了各电极所用全部电源的规格。

3.1 运行模式

总共十个电极的组合使电子能量与电子发射相互解耦，并可调节电子枪电极上的功率负载。在2017年调试期间，为各种电极设置电压时 [16]，我们参考了电子光学模拟 [15]，发现预测的电子枪性能与实验实现的结果吻合良好。然而，在随后将3500电子伏特电子枪用于电子-离子碰撞实验期间，我们观察到，某些电极电位组合会导致显著偏转

表1 电子枪的一些已测试运行模式。高能和高电流模式分别 обознач为 HE 和 HC。各电极上的电势均以阴极与相互作用区之间的电势差为基准给出。在本装置中，阴极和电极 P5 的电势为 -1。运行期间，根据最小化损失电流的需要，将 P6 的电势调节在 0.1 至 1.0 之间。'INT'同时指电极 INT1 和 INT2。标为'Col.'的列给出收集极的电势。所列有效导流系数（式2）通过实验确定（图5a）。

Mode	电极						有效导流系数
	P1	P2	INT	P3	P4	Col.	$[10^{-6}$ 安培伏特$^{-3/2}]$
HE10	0.10	0.10	0	0.10	0.10	0	4.44
HE15	0.15	0.15	0	0.15	0.15	-1	4.79
HC6	6.00	0.25	0	0.25	6.00	0	74.41

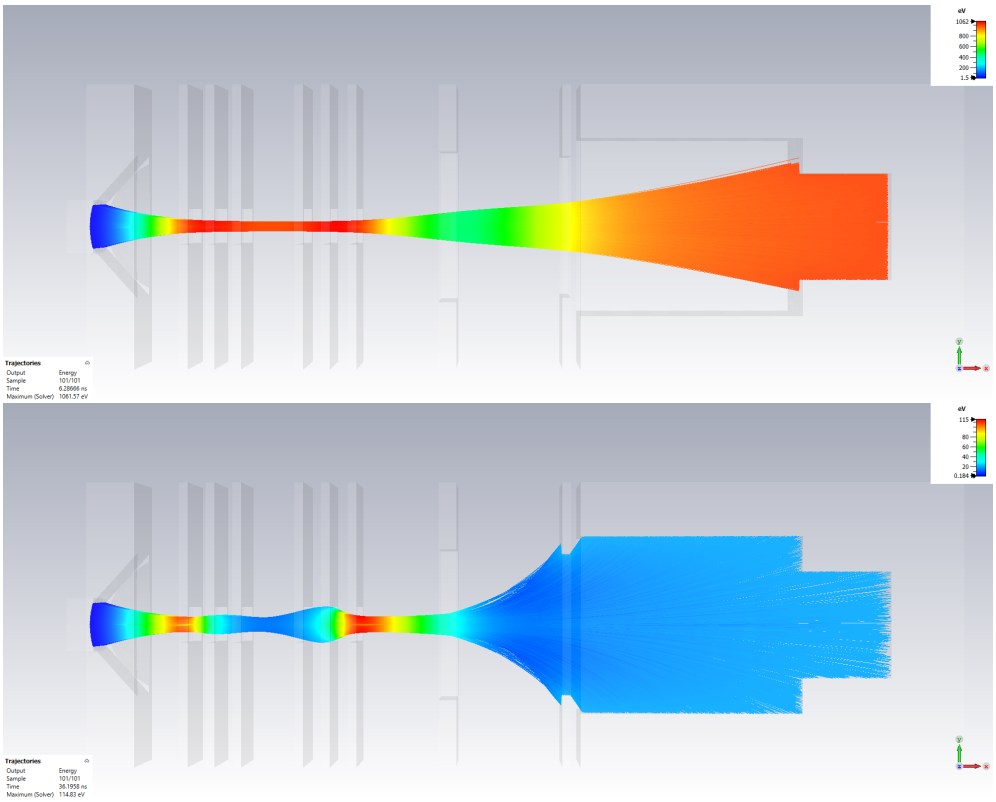

图4 3500电子伏特电子枪中的模拟电子轨迹。上图：HE10模式，$U_e = 1000$ 伏特和 $I_{\text{cath}} = 147.351$ 毫安。下图：HC6模式，$U_e = 20$ 伏特和 $I_{\text{cath}} = 7.14$ 毫安。颜色表示电子能量。模拟使用软件 CST Stu- dio Suite [32, 33]完成。

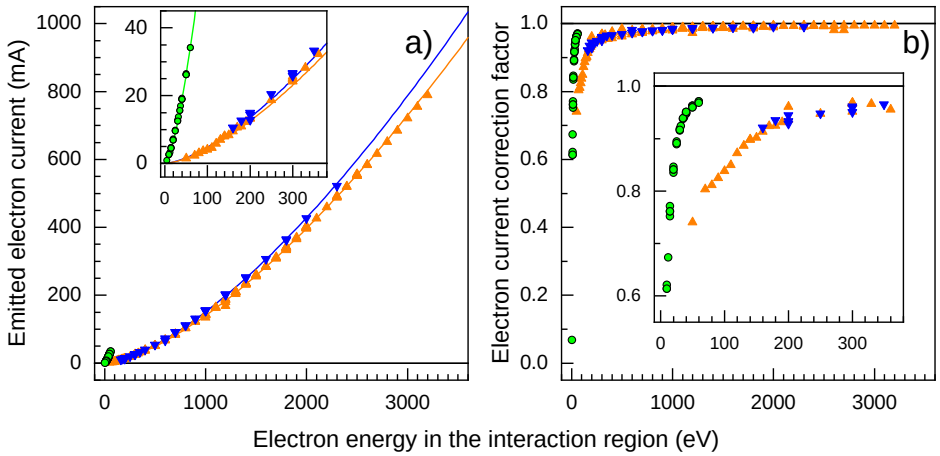

图 5 测得的（面板 a）发射电子电流 I_{cath} 和（面板 b）电子电流修正因子 f_{ecc}（式 4），随表 1所列运行模式下电子能量的变化情况，即 HE10（橙色上三角）、HE15（蓝色下三角）和 HC6（绿色圆圈）。插图放大显示了低能量区域。左侧面板中的实线表示对数据点进行式 2 拟合的结果，由此得到表 1中列出的有效导流系数数值。

在电子枪于动态束测量期间移动时的离子束，这影响了截面测量的绝对值。表1列出了一些电压设置（称为“运行模式”），这些设置提供了满足截面测量要求的条件。高电流模式 HC6 尤其适用于电子能量较低（最高 60 eV）时的测量。在更高能量下，应使用高能（HE）模式。图4 展示了电子光学模拟结果。据此，高能模式和高电流模式下的电子束轨迹截然不同。

3.2 损失电流监测

电子枪的灵活性使其能够在较宽的能量范围内运行，但也增加了中、高能电子产生损失电流的风险。过大的损失电流会部分转化为热量耗散，进而严重损坏电极以及用于使电极彼此电气绝缘的陶瓷间隔件。在3500电子伏特电子枪调试的早期阶段，我们观察到了这一现象。为降低损失电流引发损坏的风险，我们将电极材料由铜改为钼（收集极除外），并安装了紧急停机系统。该系统通过非接触式霍尔效应传感器（ChenYang 型号 CYCT03-xnS3 [34], 图6）监测电极连接线中的电流；收集极的量程为0–2000毫安，其他电极的量程为0–20毫安。霍尔效应传感器的0–10伏特输出电压经过滤波以消除噪声，随后由配备12位ADC芯片（Microchip MCP3208B）的ADC卡进行数字化。紧急停机系统会将测得的损失电流与可调硬件阈值进行比较，并

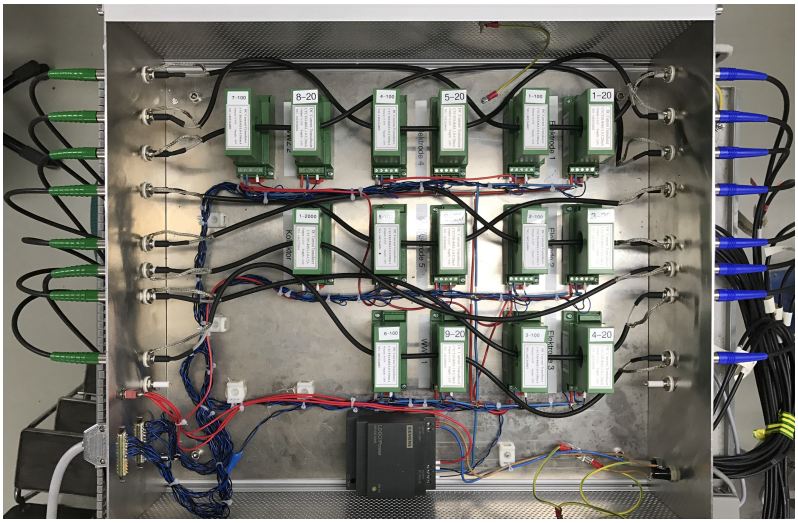

图 6 金属盒内部（已拆下上盖）的视图，盒内装有霍尔效应传感器，用于监测 3500电子伏特电子枪各电极上的损失电流。盒子外侧的 SHV 插头分别涂成绿色和蓝色，对应传感器的输入端和输出端。部分 20 mA 霍尔探头还串联了目前未使用的 100 mA 量程霍尔探头。

一旦发生电流超限，便会在半秒内自动关闭电子枪，以防止损坏。

软件控制系统还设有额外的停止和警告级别，通常低于硬件阈值，用于控制电子能量扫描期间的电压变化速度，以防变化过于剧烈而导致损失电流过高。对于需要持续数天甚至数周的扫描，这一点尤为重要；过去使用 1000 eV 电子枪进行扫描时就曾如此（参见例如 [23]）。

数据采集系统会记录持续监测的损失电流在截面测量期间的变化。这些数据可用于估算电子-离子相互作用区内的电子电流 I_e，这是确定绝对截面的关键量。其计算公式为

$$I_e = I_{\mathrm{cath}} - I_{\mathrm{P1}} - I_{\mathrm{P2}} - I_{\mathrm{INT1}} \tag{3}$$

其中，I_{cath} 是从阴极发射的电子电流，而 I_{P1}、I_{P2}和 I_{INT1}分别是在电极 P1、P2 和 INT1 处测得的损失电流（图3）。在电子能量较低、束流聚焦效果较差时，电子电流修正因子

$$f_{\mathrm{ecc}} = \frac{I_e}{I_{\mathrm{cath}}} = 1 - \frac{I_{\mathrm{P1}} - I_{\mathrm{P2}} - I_{\mathrm{INT1}}}{I_{\mathrm{cath}}} \tag{4}$$

远小于 1（取决于运行模式），但会随着电子能量的增加而迅速趋近于 1（图5b）。对于高能模式，当电子能量高于 800 eV 时，该因子基本保持恒定。

3.3 能量扫描系统

在预先选定的能量步进范围内进行能量扫描，需要对所有电极电源进行同步控制，使得每个能量步进时都能（近似）保持给定运行模式下的电压比（表 1）。原则上，这可以通过上述数模转换器实现（第 2.1节）。然而，电源的精度太低，无法确保在反复扫描预先选定的范围时，电子能量具有足够高的重复性。一次测量通常需要重复数百次，才能达到令人满意的统计不确定度。

为了提高电子能量的重复性，我们建立了一个反馈回路：通过分压器测量阴极和 P1 电极的电压，这两个电压决定电子发射电流；同时快速调节高压放大器的控制电压，使目标电压与读数电压之间的偏差在亚毫秒时间尺度内降至最低。聚焦电极和散焦电极上的电压精度要求较低。因此，相应的电源由数模转换器直接控制，无需反馈回路。

阴极的分压比为 1:400，P1 电极的分压比为 1:200。其高稳定性电阻的温度稳定性为每摄氏度 1 ppm，额定值的精度在 0.1% 以内。由于用于阴极和 P1 电极的两台高压放大器（Kepco BOP 100-1M）的输出范围仅为±100 伏特，因此如图所示，它们各自与一个基础电源电气串联。7 为阴极所示。控制器箱将分压器输出与设定值进行比较，据此生成高压分压器的控制电压。设定值由两个 18位数模转换器的输出相加得到：第一个覆盖 0–4000 eV 的电压范围，粗分辨率为 15.25885 毫伏；第二个覆盖 0–400 eV 的电压范围，细分辨率为 1.525885 毫伏。第三个数模转换器用于将基础电源的输出电压设定在扫描范围的大致中心。只要扫描的电压跨度小于 200 eV，第三个数模转换器就保持固定值。对于更大的扫描范围，则根据需要不时调整第三个数模转换器，以覆盖整个预选扫描范围。

为降低电噪声，所有关键连接均使用了类型和长度相同的电缆。此外，无源滤波器箱（图 A2）可抑制残余电噪声，同时不会影响电压反馈回路的亚毫秒级时间常数。上电后，高压控制单元需要 ∼2小时预热，才能达到稳定状态；这一点是通过对控制电压进行 24 小时监测确定的。我们还发现，环境条件的变化（例如开关门窗）会引起毫伏级扰动。为尽量减小此类影响，控制单元安装在配有温控通风的 19 英寸机架中。

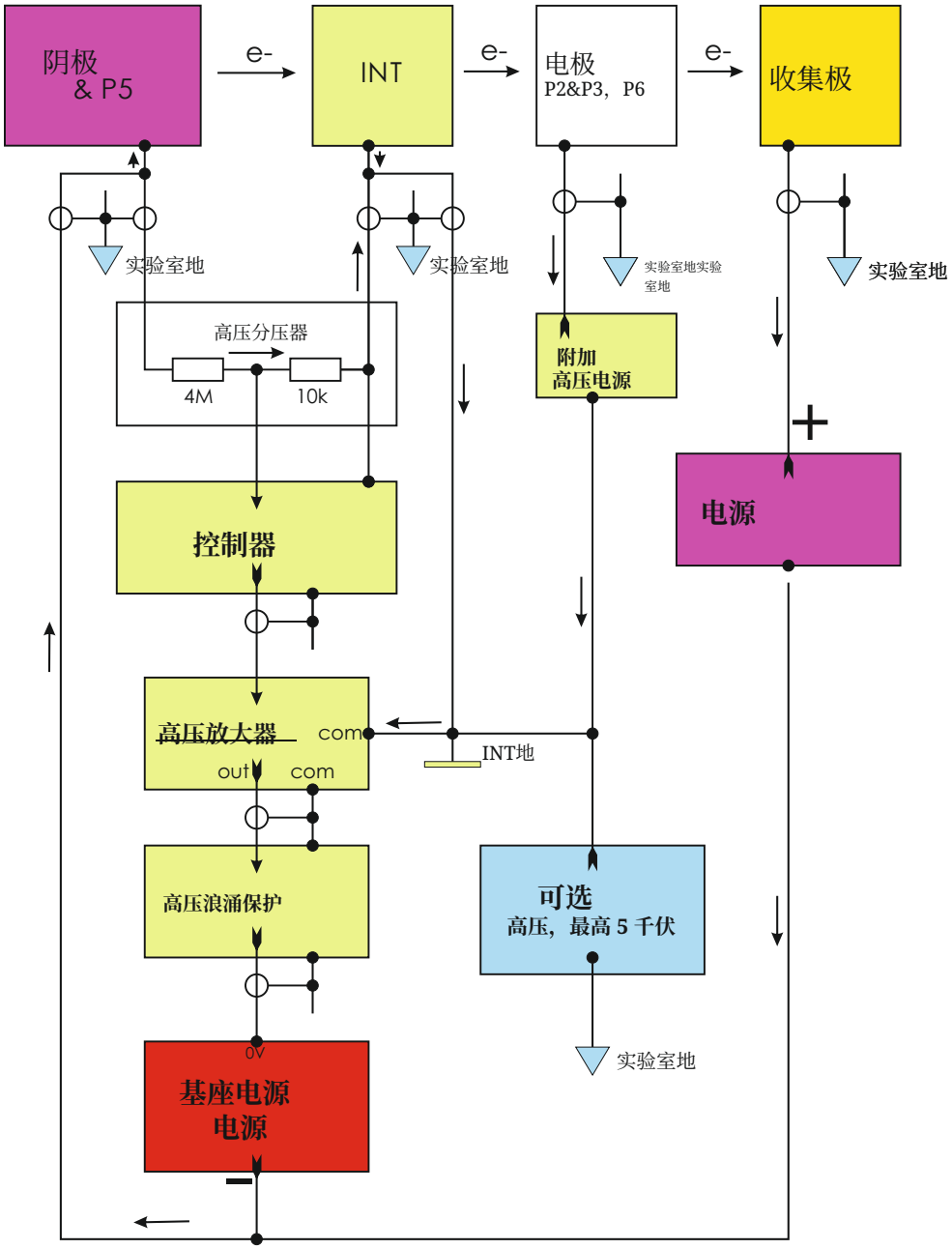

图 7 柔性电子枪的电压和电流流向概览。为使示意图简洁，图中未显示电极对 P1&P4 的高压控制。其电路与阴极与 P5 电极对的电路相同，但使用的是 1 : 200 分压器，而非 1 : 400 分压器（详见附录中的图 A2 ）。由于电极对 P2&P3 和电极 P6 的框图完全相同，为使图示简洁，仅给出其中一个。箭头表示负电流。所有模块均未绘制机壳接地。

高压放大器规定的电压转换速率为 11 伏特/μs，也就是说，放大器能够在远短于一微秒的时间内处理约 20 meV 的典型电压变化。实际上，电压变化后达到稳定状态所需的时间常数要长得多，因为它取决于电路中的各种电容。因此，在能量扫描中，我们会在设定新电压后等待一段时间，再开始数据采集。经验证，等待 0.3 ms 足以达到稳定状态。每个能量步的驻留时间通常为几毫秒。

4 能量扫描系统的性能

图 8 显示了氢样氦$^+$ 离子在电离阈值附近的电子碰撞电离相对截面，该阈值为 54.418 eV [35]。此类阈值扫描可用于校准实验能量标度。标称能量标度的实验不确定度相当大。除了分压器电阻器仅有 0.1% 的精度外，还存在（未知的）接触电势，以及电子束空间电荷造成的不确定性。

通常假设阈值截面 $\sigma_{\mathrm{thres}}(E)$ 遵循 Wannier 定律 [36]。因此，

$$\sigma_{\mathrm{thres}}(E) = S(E - E_{\mathrm{thres}})^{\alpha}, \tag{5}$$

其中 S 为整体缩放因子， E_{thres} 表示阈值能量，而常数 α 取决于离子电荷态 q。图 8中的实线是通过拟合得到的

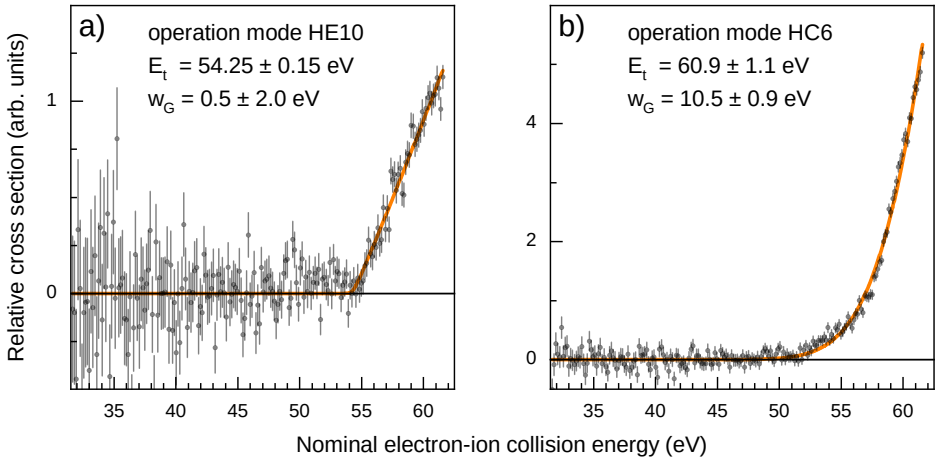

图 8 He 电子碰撞电离的相对截面（符号）$^+$ 随使用运行模式（表 1）HE10（面板 a）和 HC6（面板 b）测得的标称电子-离子碰撞能变化。每个数据点的总测量时间分别为 3.6 s 和 2 s。每个光谱由 201 个数据点组成。实线是对实验数据进行的公式 6拟合，即将 Wannier 阈值定律（公式 5）与归一化高斯分布进行卷积。每次拟合得到的阈值能量 E_t 和高斯函数半高全宽 w_G 及其拟合不确定度均随相应拟合结果给出。两个面板中的相对截面标度彼此独立。

公式 5 并取 $\alpha = 1.056$ 和 $q = 1$得到的。为考虑电子能量展宽，将公式5 与归一化高斯分布进行卷积，其半高全宽 (FWHM) 记为 w_G。实际用作拟合函数的卷积截面为

$$\sigma_{\mathrm{thres}}^{(G)}(E) = \frac{S}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{w_G}{\sqrt{4\ln 2}} \right)^{\alpha} \times \left[\frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{2} \right) {}_1F_1\left(-\frac{\alpha}{2}, \frac{1}{2}, -\varepsilon^2 \right) + \varepsilon\, \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2} \right) {}_1F_1\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2}, \frac{3}{2}, -\varepsilon^2 \right) \right], \tag{6}$$

其中， Γ 和 ${}_1F_1$ 分别为伽马函数和合流超几何函数，而无量纲量

$$\varepsilon = \sqrt{4\ln 2}\, \frac{E - E_{\mathrm{thres}}}{w_G} \tag{7}$$

是电子-离子碰撞能 E的函数。

在高能模式下，统计精度过低，无法为实验能量展宽获得足够小的拟合不确定度（图 8）。无论如何，高能模式下的能量展宽远小于高流强模式。此外，拟合得到的阈值能量存在显著差异。在高能模式下，拟合阈值与文献值在不确定度范围内一致。在高流强模式下，阈值出现在高出 6.5 eV 的标称能量处。这表明，高流强模式下电子束的空间电荷势显著高于高能模式。在这两种情况下，He^+ 电离截面都提供了一个有价值的校准点，其

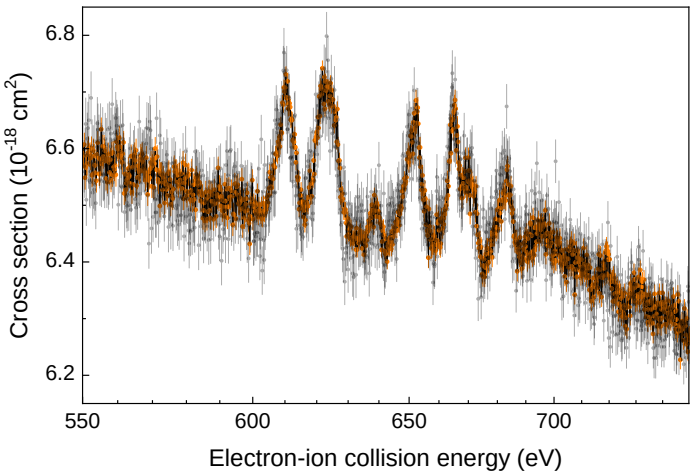

图 9 Xe^{9+} 离子的电子碰撞单电离实验截面。新型 3500电子伏特电子枪（黑色空心符号）的测量结果与早期使用旧型 1000 eV 电子枪（橙色符号）获得的结果进行比较 [37]。使用 3500电子伏特电子枪时，采用 HE10 运行模式。离子束被准直到 1.4×1.4 mm^2的尺寸。相互作用区内的离子电流和电子电流分别为 $I_{\mathrm{ion}} = 5.2$ nA和 $I_{\mathrm{e}} \approx 82.2$ 毫安。每个数据点的总测量时间为 134 s。

在 HE10（HC6）模式下，标定不确定度约为 0.2 eV（1.0 eV）。对于高能模式，通过积累更多统计数据，肯定可以提高标定精度。还可以通过对其他离子进行阈值截面测量，以类似方式获得更多校准点。

在较高能量下，图 9 比较了氙电子碰撞单电离的截面扫描结果$^{9+}$，这些结果分别使用旧款 1000 电子伏特电子枪 [37] 和新款 3500电子伏特电子枪测得。在 600–700 eV 的能量范围内，截面呈现出与一个 $3d$ 电子跃迁至较高壳层并俘获最初自由电子相关的共振特征。再加上随后发生的两步俄歇衰变，最终导致净单电离，这一过程称为共振激发–双重自电离（REDA）。除统计不确定度有所差异外，这两组共振谱彼此高度吻合。这表明我们新实施的电子能量扫描系统运行符合预期。特别是，旧电子枪和新电子枪的电子能量展宽大致相同，这一点从测得的共振宽度和高度极为相似便可看出。由于一个实验共振峰很可能包含多个原子共振，因此若没有对 REDA 共振的详细理论描述，就无法从测得的截面推导出实验能量。

5 总结与展望

基于我们使用旧的1000电子伏特电子枪的经验，我们已成功为我们的新3500电子伏特电子枪实现并调试了一套快速电子能量扫描系统。该电子枪比前一代具有更多电极，因此可以更灵活地运行。目前，我们已建立高能和高电流运行模式，其中后者可用于制备强流低能电子束。我们的首次测量表明，这会导致强烈的空间电荷效应，从而损害实验能量分辨率。当使用高能模式时，可恢复1000电子伏特电子枪的条件。

未来我们将探索更多可能性。更灵活的电极布局中一个有趣的方面是最初设想的 [15] 抵消电子束空间电荷势的可能性。这有望提供高得多的能量分辨率，对电离共振研究将特别有益。

致谢。 作者感谢Benjamin Ebinger和Florian Gocht分别在本工作早期阶段以及部分相关测量中提供的协助。本研究部分由德国联邦研究、技术与航天部（BMFTR）在ErUM-Pro资助计划下通过合同05P21RGFA1和05P24RG2资助。

数据可用性。 本研究中生成和分析的数据集可在合理请求下向通讯作者获取。

附录A 技术规格

表 A1 电子枪高压电源的规格（根据制造商提供的信息）。数值以“小于”形式给出，pp 是峰峰值的缩写。有关详细电路图，请参见图：A1。BOP高压放大器的制造商是 Kepco。所列出的其他所有电源均由 FUG 制造。提供这些信息仅为技术完整性考虑，并不意味着对类似产品进行任何评估、认可或偏好。

	设定值 分辨率	残余纹波	重复性
阴极/P0/P5			
HCP 140-3500 （3550 伏特 / 40 毫安）	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$ 峰峰值 $+ 20$ 毫伏$_{\mathrm{pp}}$	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$
Fine setting: BOP 100-1M （±100伏特 / 1 安培）	1.53 毫伏	< 10 至 30 毫伏$_{\mathrm{pp}}$	$\pm 1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
阴极加热			
NTN 350-20 (20 伏特 / 15 安培)	$\pm 1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$ pp	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$
电极 P1/P4			
MCP 140-2000 （2000 伏特 / 60 毫安）	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$ pp $+ 50$ 毫伏$_{\mathrm{pp}}$	$\pm 1 \cdot 10^{-4}$
Fine setting: BOP 100-1M （100 伏特 / 1 安培）	1.53 毫伏	< 10 至 30 毫伏$_{\mathrm{pp}}$	$\pm 1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
电极 P2/P3			
放大器 609E-6 (4000 伏特 / 20 毫安)	$1 \cdot 10^{-3}$	80 毫伏 rms	N/A
电极 P6			
HCN 140-6500 (6500 伏特 / 20 毫安)	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$ pp $+ 50$ 毫伏$_{\mathrm{pp}}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$
收集极			
HCN 4200-3500 (3500 伏特 / 1200 毫安)	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$ 峰峰值 $+ 200$ 毫伏$_{\mathrm{pp}}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$

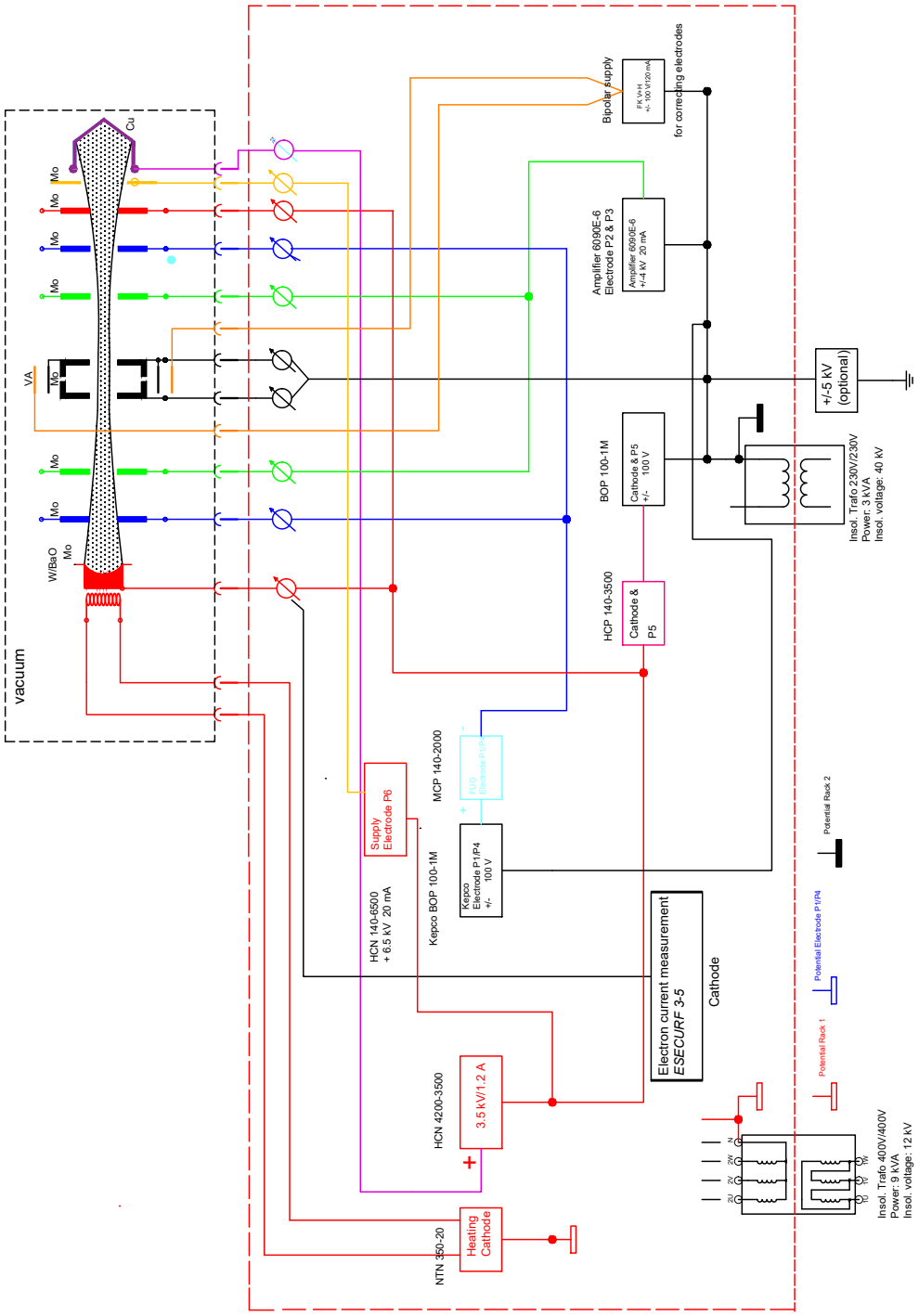

图 A1 3500电子伏特电子枪的电路图。红色虚线框内的所有部件均安装在两个 19 英寸机架中。阴极和 P1 电极的电压反馈回路（图 7）未显示。这些细节见图 A2

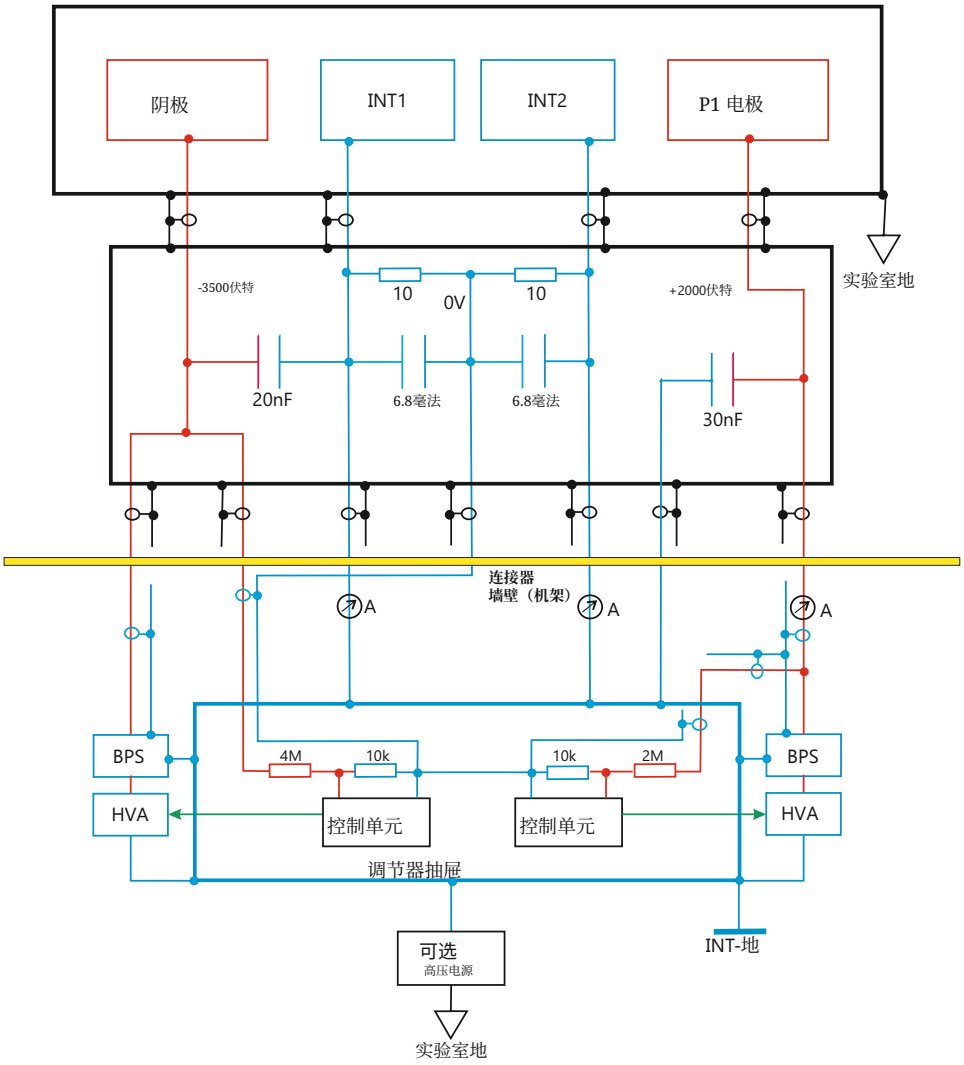

图 A2 阴极、P1 电极和相互作用区的详细接线图，展示了相应的分压器，以及与基础电源（BPS）串联的高压放大器（HVA）控制单元。可选的高压电源（HV-PS）可用于使整个装置相对于处于实验室地电位（Lab-GND）的离子束线具有一定电势。滤波箱用于抑制来自实验室环境的电噪声。时间常数经过选择，使控制单元仍能在亚毫秒时间尺度上发挥作用。

参考文献

[1]M¨uller, A.：电子-离子碰撞：应用研究关注的基本过程。Adv. At. Mol. Opt. Phys.**55**, 293(2008) https://doi.org/10.1016/S1049-250X(07)55006-8

[2]Borovik，Jr.，A.，Gharaibeh，M.F.，Hillenbrand，P.M.，Schippers，S.，M¨uller，A.：对N壳层锡离子的电子碰撞单电离截面及等离子体速率系数的详细研究。J. Phys. B**46**, 175201（2013） https://doi.org/10.1088/0953-4075/46/17/175201

[3] Schury，D.，Borovik Jr.，A.，Ebinger，B.，Spruck，K.，Jin，F.，M¨uller，A.，Schippers，S.：W^{q+} 离子：实验与理论，研究对象为 $11 \leq q \leq 18$。J. Phys. B **53**, 015201(2020) https://doi.org/10.1088/1361-6455/ab51e9

[4]D¨ohring，B.M.，Borovik Jr.，A.，Gocht，F.，Huber，K.，Schippers，S.：镧的电子碰撞单、双和三电离实验截面+。原子**13**,14（2025)https://doi.org/10.3390/atoms13020014

[5]Ebinger，B.，Liu，P.，Borovik Jr.，A.，M¨uller，A.,Zeng，J.，Schippers，S.：通过K壳层激发，铍样碳离子的共振和非共振间接电子碰撞单电离。J. Phys. B**52**, 035202（2019） https://doi.org/10.1088/1361-6455/aaf6cf

[6]Liu，P.、Zeng，J.、Borovik Jr.，A.、Schippers，S.、M¨uller，A.：Xe^{24+}的电子碰撞电离离子：理论与实验的比较。《Phys. Rev. A》**92**, 012701(2015) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.012701[7] Jin，F.，Borovik Jr.，A.，Ebinger，B.，Schippers，S.：采用混合亚组态平均和逐能级扭曲波方法处理W的电子碰撞单电离$^{15+}$ 和W^{16+}。J. Phys. B **53**,175201 (2020)https://doi.org/10.1088/1361-6455/ab9c34[8] Jin，F.，Borovik,A.,D¨ohring，B.M.,Ebinger,B.，M¨uller，A.，Schippers，S.：电子碰撞开4d壳层离子Xe的单电离和双电离实验与理论总截面$^{12+}$，Xe^{13+}，andXe^{14+} 的电子碰撞。Eur. Phys. J. D **78**，68 (2024)https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-024-00854-2 [9]M¨uller，A.，Frodl，R.：电子碰撞导致Ar离子多重电离的L壳层贡献$^{i+}$ （$i = 1,2,3$）.《物理评论快报》**44**,29 (1980)https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.44.29

[10] M¨uller，A.，Salzborn，E.，Frodl，R.，Becker，R.，Klein，H.，Winter，H.：电子轰击 O^+、Ne^+、Xe^+和 Ar^{i+}(i=1,...,5) 离子的绝对电离截面。J. Phys. B**13**, 1877 (1980年) https://doi.org/10.1088/0022-3700/13/9/018

[11] Achenbach,C., M¨uller, A., Salzborn, E., Becker, R：电子碰撞引发的 I^{1+} 和 Xe^{q+} ($q = 1，\ldots，4$) 离子的双电离：电子的作用，如同光电离中的情况。Phys. Rev. Lett.**50**，2070（1983） https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.2070

[12] Achenbach,C., M¨uller, A., Salzborn, E., Becker, R：电子碰撞使多电荷氩离子发生单电离。J. Phys. B17，1405（1984）
https://doi.org/10.1088/0022-3700/17/7/023

[13]Stenke, M., Aichele, K., Hathi-ramani,D., Hofmann,G.,Steidl,M.,V¨olpel, R., Salzborn, E.：用于keV能量下交叉束电子-离子碰撞研究的大电流电子枪。《核仪器与方法》98，573（1995）
https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00014-3

[14] Becker,R., M¨uller, A., Achenbach, C., Tinschert, K., Salzborn, E.：用于研究电子-离子碰撞的高密度电子靶。Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B9,385
(
1
9
8
5)https://doi.org/10.1016/0168-583X(85)90329-5

[15]Shi, W., Jacobi, J., Knopp, H.,Schippers, S., M¨uller, A.：用于电子-离子碰撞物理的大电流电子枪。Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B205，201(2003)
https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01948-1

[16]Ebinger, B., Borovik Jr., A.,Molkentin,T., M¨uller, A.,Schippers, S.：用于电子-离子交叉束实验的大功率电子枪的调试。Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B408, 317 (2017年)
https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.136

[17] Lestinsky, M., Andrianov, V.,Aurand,B.,Bagnoud,V., Bern-hardt,D.,Beyer, H.,Bishop, S.,Blaum, K., Bleile,A., Borovik, A., Bosch,F.,Bostock,C.J., Brandau,C., Br¨auning-Demian, A., Bray, I.,Davinson, T.,Ebinger, B., Echler,A., Egelhof,P.,Ehresmann, A.,Engstr¨om,M., Enss, C., Ferreira,N., Fischer,D., Fleischmann,A.,F¨orster, E.,Fritzsche, S.,Geithner,R.,Geyer, S.,Glorius,J.,G¨obel,K., Gorda, O.,Goullon, J.,Grabitz,P.,Grisenti,R.,Gumberidze, A.,Hagmann, S., Heil,M., Heinz, A.,Herfurth,F.,Heß, R., Hillenbrand,P.-M.,Hubele, R., Indelicato, P.,K¨allberg, A., Kester, O., Kise-lev, O.,Knie,A.,Kozhuharov, C.,Kraft-Bermuth,S.,K¨uhl,T., Lane,G.,Litvinov,Y.A.,Liesen, D.,Ma,X.W., M¨artin,R., Moshammer, R.,M¨uller, A., Namba, S.,Neumeyer,P.,Nilsson, T., N¨ortersh¨auser,W.,Paulus, G.,Petridis, N.,Reed,M., Reifarth,R., Reiß, P., Roth-hardt, J.,Sanchez, R.,Sanjari,M.S.,Schippers, S., Schmidt, H.T.,Schneider, D.,Scholz,P.,Schuch,R.,Schulz, M.,Shabaev,V.,Simon-sson,A., Sj¨oholm,J.,Skeppstedt,¨O.,Sonnabend, K.,Spillmann,U.,Stiebing, K., Steck, M.,St¨ohlker,T., Surzhykov, A.,Torilov, S.,Tr¨abert, E., Trassinelli, M., Trotsenko, S., Tu, X.L., Uschmann, I., Walker, P.M., Weber, G., Win- ters, D.F.A., Woods, P.J., Zhao, H.Y., Zhang, Y.H.：物理学手册：CRYRING@ESR。Eur. Phys. J. ST225，797(2016)
https://doi.org/10.1140/epjst/e2016-02643-6

[18] Defrance, P., Brouillard, F., Claeys, W., Wassenhove, G.V.：绝对截面的交叉束测量：一种替代方法及其在 He 电子碰撞电离中的应用+。《J. Phys. B》14，103（1981）
https://doi.org/10.1088/

0022-3700/14/1/013

[19]Brouillard, F., Defrance, P.：用于测量电子碰撞电离的动画交叉束。《Phys. Scr.》**T3**，68（1983）
https://doi.org/10.1088/0031-8949/1983/T3/015

[20]M¨uller, A., Tinschert, K., Achen- bach, C., Becker, R., Salzborn, E.：采用一种新技术测量交叉电子束与离子束的电离截面。《核仪器与方法》Phys. Res. B **10**，204（1985）
https://doi.org/10.1016/0168-583X(85)90235-6

[21] M¨uller, A., Tinschert, K., Hofmann, G., Salzborn, E., Dunn, G.H.：重金属离子电子碰撞单电离、双电离和三电离中的共振。《物理评论》Lett.**61**，70（1988）
https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.70

[22]M¨uller, A., Hofmann, G., Weiss- becker, B., Stenke, M.,Tinschert, K., Wagner, M., Salzborn, E.：Li^+ 离子电子碰撞电离中的关联双电子跃迁。《物理评论》Lett. **63**，758（1989）
https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.758

[23]M¨uller, A., Borovik, A., Huber，K., Schippers, S., Fursa, D.V., Bray,I.：双重K空位态在亚稳态双电子氮离子的电子碰撞单电离中的研究$^{5+}(1s\,2s\ \ ^3S_1)$ 离子。《Phys. Rev. A》**90**，010701（2014）
https://doi.org/10.1103/PhysRevA.90.010701

[24]Teng, H., Knopp，H.，Ricz, S., Schippers, S., Berrington, K.A., M¨uller, A.：直接通道与共振通道在电子碰撞电离C^{3+}离子中的干涉：统一R矩阵计算与实验。《Phys. Rev. A》**61**,060704
(
2
000)https://doi.org/10.1103/PhysRevA.61.060704

[25]Becker，C.，Knopp，H.，Jacobi，J.,Teng,H.,Schippers，S.，M¨uller, A.：电子碰撞引起的 Mg^+ 离子的单重和多重电离。J. Phys. B**37**，1503（2004）
https://doi.org/10.1088/0953-4075/37/7/011

[26] Jacobi,J., Knopp,H., Schippers,S.,M¨uller, A., Loch, S.D., Witthoeft, M., Pindzola, M.S., Ballance, C.P.：间接过程对Sc离子的电子碰撞电离截面有重要贡献。《Phys. Rev. A》**70**, 042717
(
2
0
04)https://doi.org/10.1103/PhysRevA.70.042717[27] Trassl, R., Hathiramani, P., Broetz, F., Greenwood, J.B., McCullough, R.W., Schlapp, M., Salzborn, E.：用于原子物理学实验的紧凑型10 GHz电子回旋共振（ECR）离子源的特性及近期改进。《Phys. Scr.》**T73**, 380
(
1
9
9
7)
https://doi.org/10.1088/0031-8949/1997/T73/126
[28]Baumann, H., Bethge, K.：法兰克福PIG离子源。《核仪器与方法》**189**，107 (1981)
https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90131-2[29] Middleton, R.：一种多用途高强度负离子源。《核仪器与方法》**214**，139 (1983)
https://doi.org/10.1016/

0167-5087(83)90580-X

[30] Rinn, K.,M¨uller, A., Eichenauer, H., Salzborn, E.：用于keV离子的单粒子探测器研制。《科学仪器评论》**53**，829 (1982) https://doi.org/10.1063/1.1137055

[31]Huber, K.：《VME 测量与分析程序使用说明》（德文）。K. Huber。 http://www.strz.uni-giessen.de/ExpHelp/index.html 访问时间：2025-10-07T16:15:00

[32]CST（Dessault Systemes）。 https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite

[33] Spachmann, H.，Becker, U.：使用 CST PARTICLE STUDIO 进行电子枪模拟。《核仪器与方法》物理研究 A**558**，50（2006） https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.075[34] ChenYang Technologies GmbH & Co. KG：直流电流传感器 CYCT03-xnS3。 http://www.cy-sensors.com/CYCT03-xnS3.pdf[35]Kramida, A., Ralchenko, Y.，Reader, J.，NIST ASD团队, NIST原子光谱数据库（5.12版）（2024） https://doi.org/10.18434/T4W30F[36] Wannier, G.H.：电子对原子或离子进行单电离的阈值定律。《物理评论》**90**，817（1953） https://doi.org/10.1103/PhysRev.90.817

[37]Borovik Jr., A., Gharaibeh, M., Schippers, S., M¨uller, A.：Xe^{q+} 离子（q = 8,...）电子碰撞电离的等离子体速率系数 **17).**《物理学杂志B》**48**,035203 (2015)https://doi.org/10.1088/0953-4075/48/3/035203