用于质子放疗剂量测量的大面积平板电离室性能研究

白浩博[1,2] 林 业[3] 陈 波[4] 何林锋[5] 谷帅喆[1] 张毅斌[6] 周 晖[6] 陈志凌[1,3]

1（中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800）

2（中国科学院大学 北京 100049）

3（中国科学院上海高等研究院 上海 201210）

4（复旦大学放射医学研究所 上海 200032）

5（上海市计量测试技术研究院 上海 201203）

6（上海交通大学医学院附属瑞金医院 上海 200025）

摘要 质子束的深度剂量分布作为治疗计划系统剂量计算的核心参数，其测量精度直接影响质子放疗实施的质量。为了精确测量质子束的深度剂量，研制了一种有效灵敏区域直径16 cm的大面积平板电离室。利用上海计量院^{60}Co γ射线辐射场和上海瑞金医院质子中心的国产首台质子治疗装置，对平板电离室的漏电流、饱和特性、重复性、剂量线性以及能量响应等关键参数进行了系统性测试。结果显示：平板电离室漏电流不超过53 fA，标准偏差小于6.4 fA；在工作电压400 V下，复合修正因子k_s为1.000 09，电荷收集效率为99.9%。在^{60}Co γ射线辐射场测试中，平板电离室重复性为0.15%，剂量响应偏差为−0.08%~0.04%。在质子束流测试中，平板电离室重复性为0.18%，剂量响应偏差为−0.06%~0.09%，能量响应的相对偏差为−0.72%~0.95%。测试结果满足IEC 60731标准对治疗水平平板电离室相关性能参数的要求，且平板电离室在医用质子束流能量范围内表现出了较好的能量一致性。测试结果表明，该平板电离室具备用于质子束深度剂量测量的应用潜力。

关键词 质子治疗，剂量响应，平板电离室，静电计

中图分类号 TL811$^+$.1

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250162

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250162

Characteristics study of a large-area parallel plate ionization chamber for proton radiotherapeutic dosimetry

BAI Haobo[1,2] LIN Ye[3] CHEN Bo[4] HE Linfeng[5] GU Shuaizhe[1] ZHANG Yibin[6] ZHOU Hui[6] CHEN Zhiling[1,3]

1(*Shanghai Institute of Applied Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai 201800*, *China*)

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

3(*Shanghai Advanced Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai 201210*, *China*)

4(*Institute of Radiation Medicine*, *Fudan University*, *Shanghai 200032*, *China*)

5(*Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology*, *Shanghai 201203*, *China*)

6(*Ruijin Hospital*, *Shanghai Jiaotong University School of Medicine*, *Shanghai 200025*, *China*)

上海市2022年度生物医药领域定向项目(No.22DX1900200)资助

第一作者：白浩博，男，1999年出生，2021年毕业于河南师范大学，现为博士研究生，研究领域为质子治疗

通信作者：林业，E-mail：liny@sari.ac.cn

收稿日期：2025-04-09，修回日期：2025-11-07

Supported by Biomedical Field Oriented Project of Shanghai City (No.22DX1900200)

First author: BAI Haobo, male, born in 1999, graduated from Henan Normal University in 2021, doctoral student, focusing on proton therapy

Corresponding author: LIN Ye, E-mail: liny@sari.ac.cn

Received date: 2025-04-09, revised date: 2025-11-07

Abstract **[Background]** The depth-dose distribution of proton beams, as a key parameter in the dose calculation of treatment planning systems, directly affects the quality and accuracy of proton radiotherapy. **[Purpose]** This study aims to develop and evaluate a large-area Plane-Parallel Ionization Chamber (PPIC) with an effective sensitive area diameter of 16 cm for precise measurement of proton beam depth-dose distributions. **[Methods]** The PPIC was systematically tested using a ^{60}Co gamma-ray field at the Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology and the proton beam of the proton therapy facility at the Shanghai Ruijin Hospital Proton Therapy Center. In the ^{60}Co gamma-ray field, the dose rate was 450 mGy·min^{-1}. For the proton beam tests, measurements were performed in the fixed-beam treatment room of the Ruijin Proton Center under medical proton beam conditions. The ionization charge generated was collected and quantified using an electrometer, and key performance parameters of the PPIC including leakage current, saturation characteristics, repeatability, dose linearity, and energy dependence were evaluated. **[Results]** Test results show that the leakage current of the PPIC does not exceed 53 fA, with a standard deviation of less than 6.4 fA. At an operating voltage of 400 V, the recombination correction factor (k_s) is 1.000 09, and the charge collection efficiency reaches 99.9%. In the ^{60}Co gamma-ray radiation field, the ionization chamber exhibits a repeatability of 0.15%, with dose response deviations ranging from −0.08% to 0.04%. Under proton beam irradiation, the repeatability is 0.18%, the dose response deviations fall within −0.06% to 0.09%, and energy response deviations ranged from −0.72% to 0.95% relative to the mean measured value. **[Conclusions]** These test results in this study fully comply with the performance requirements specified in the IEC 60731 standard for therapy-level parallel plate ionization chambers, and the PPIC demonstrated good energy consistency across the medical proton beam energy range. This indicates that the ionization chamber has the potential for application in proton beam depth-dose measurements.

Key words Proton therapy, Dosimetric response, Parallel plate ionization chamber, Electrometer

与传统放射治疗方式（光子放疗和电子放疗）相比，质子放疗基于布拉格峰（Bragg Peak）的剂量分布优势，能够在杀死肿瘤的同时最大程度地保护肿瘤周边正常的组织[1−5]。在质子放疗中，治疗计划系统（Treatment Planning System，TPS）用于设计和优化患者的治疗方案，其中质子束的深度剂量分布是TPS剂量计算的核心参数，其测量精度直接影响治疗方案的准确性以及质子放疗实施的质量。因此，为确保放疗的安全性和有效性，精确测量质子束深度剂量分布至关重要。

大面积平板电离室是质子束剂量测量的常用工具[6]。在临床中，束流深度剂量分布通常采用大面积平板电离室与自动化水箱配合的方式进行测量：由精密步进电机驱动平板电离室在水箱中移动，直接测量不同深度下的吸收剂量，从而得到束流的深度剂量分布。近年来，多种大面积平板电离室已被开发并应用于质子束流积分深度剂量（Integral Depth Dose，IDD）的测量，如PTW-34070（直径为8.16 cm）和Stingray电离室（直径为12 cm）等[7]。

相关研究表明，采用大面积平板电离室测量质子束流的深度剂量时，增加平板电离室的灵敏面积可以提高收集效率[8−11]。Bäumer等[8]发现，在质子束流IDD的测量中，当平板电离室直径从8.16 cm增加至12 cm时，收集效率提高3.5%。Farr等[9]的研究同样支持了这一结论，其研究结果显示直径14.7 cm的平板电离室在收集效率上优于直径12 cm的平板电离室。

此研究设计并研制了一种有效灵敏区域直径16 cm的大面积平板电离室。根据国际标准IEC 60731《医用电气设备-放射治疗中使用的电离室剂量计》（Medical electrical equipment-Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy）[12]对平板电离室性能参数提出的具体要求（国内已等同采用为医药行业标准YY/T 0976—2016）[13]，利用上海计量院^{60}Co γ射线辐射场和上海瑞金医院质子中心的国产首台质子治疗装置，对平板电离室的漏电流、饱和特性、重复性、剂量线性以及能量响应进行了测试，并将测试结果与国际上主流商用大面积平板电离室的性能指标进行了对比。通过深入研究此平板电离室的相关性能指标，为后续开展质子束深度剂量测量相关研究提供有力支撑。

1 电离室测量原理与结构设计

1.1 测量原理

当束流穿过平板电离室的灵敏区域时，气体介质被电离，产生自由电子和正离子。在外加高压的作用下，平板电离室内部形成均匀电场，自由电子向

阳极漂移，正离子向阴极漂移，并最终被对应电极板收集。静电计与平板电离室相连，用于测量电离过程中产生的电荷。测量到的总电离数与束流在平板电离室内沉积的能量有关，其关系由式(1)给出[14]。

$$n_{\mathrm{T}} = \frac{Q_{\mathrm{T}}}{e} = \frac{E_{\mathrm{dep}}}{W} \tag{1}$$

式中：n_{T}是总电离数；Q_{T}是静电计测量到的总电荷；E_{dep}是束流在平板电离室内沉积的总能量；e是电子电荷；W是平均电离能，即产生一对电子离子对所需要的平均能量。

1.2　结构设计

大面积平板电离室的有效灵敏区域直径为16 cm，其结构示意图及实物如图1所示。平板电离室的电极板由4 mm厚的聚醚醚酮(Poly Ether Ether Ketone，PEEK)制成，中心区域覆盖10 μm厚的低阻碳浆作为导电层，高压极板与信号极板的间距为2 mm。选用PEEK作为电极板材料是因为其主要由C、H、O元素组成，具有较好的水等效性。此研究采用基于Geant4的蒙特卡罗模拟程序TOPAS[15]对PEEK在不同质子能量下的水等效厚度比(Water Equivalent Ratio，WER)进行了计算，结果如表1所示。模拟结果显示，PEEK的WER为1.227~1.230，与Athar等[16]的实测数据有良好的一致性。模拟数据与实测数据之间的偏差主要源于模拟参数设置与PEEK厚度的差异。进一步计算表明，质子束流能量在70~200 MeV时，WER的相对标准偏差(Relative Standard Deviation，RSD)仅为0.095%，表明PEEK的WER与入射质子能量之间存在较弱的能量依赖。此外，PEEK还具有优秀的机械强度，能够保证平板电离室在常规水箱环境中稳定运行。平板电离室的输出信号通过低噪声三同轴电缆从侧面引出，以确保信号传输的稳定性和抗干扰能力。

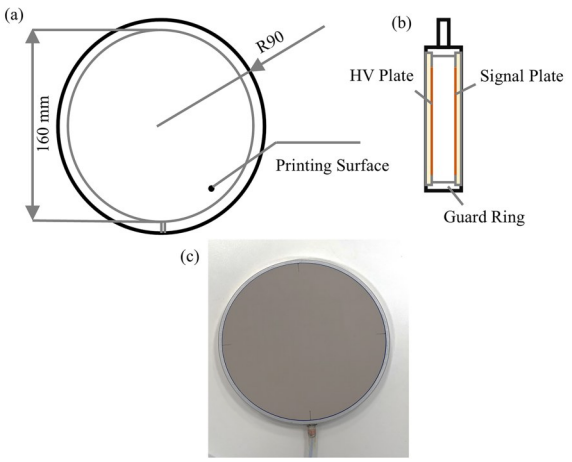

图1　(a) 平板电离室正面结构图，(b) 平板电离室剖面图，(c) 平板电离室实物图

Fig.1　(a) Front view of the PPIC, (b) cross-sectional view of the PPIC, (c) photograph of the PPIC

表1　PEEK在不同质子束能量下的WER

Table 1　WER of PEEK with different proton beam energies

质子能量 Energy / MeV	此文TOPAS模拟结果 TOPAS simulation results for this work (4 mm PEEK)	文献[16]实测结果 Experimental results for Ref.[16] (22.9 mm PEEK)
70	1.230	—
100	1.230	1.229
125	1.229	—
150	1.229	1.282
175	1.228	—
200	1.227	1.273

2　大面积平板电离室性能测试与技术指标对比

2.1　实验环境

在^{60}Co γ射线辐射场测试中，辐射剂量率为450 mGy·min^{-1}。平板电离室放置在距离^{60}Co γ射线源60 cm处。由于大面积平板电离室多用于小尺寸笔形束流的剂量测量，为匹配平板电离室的使用方式，将照射野尺寸设为4 cm×4 cm，且照射野中心与平板电离室几何中心对齐。实验环境温度、相对湿度和气压分别为23.4 ℃、40.8%和103.1 kPa。^{60}Co γ射线辐射场测试示意图如图2(a)所示。

在质子束流测试中，采用上海瑞金医院质子中心固定束治疗室的医用质子束流，束流垂直入射到平板电离室几何中心。表2为医用质子束流的相关参数[17]。质子束流测试示意图如图2(b)所示。

2.2　实验设备——静电计

此研究采用静电计对大面积平板电离室内产生的电离电荷进行采集和定量分析。此静电计为课题组自主设计并研制，型号为FD-1000E，其核心是由

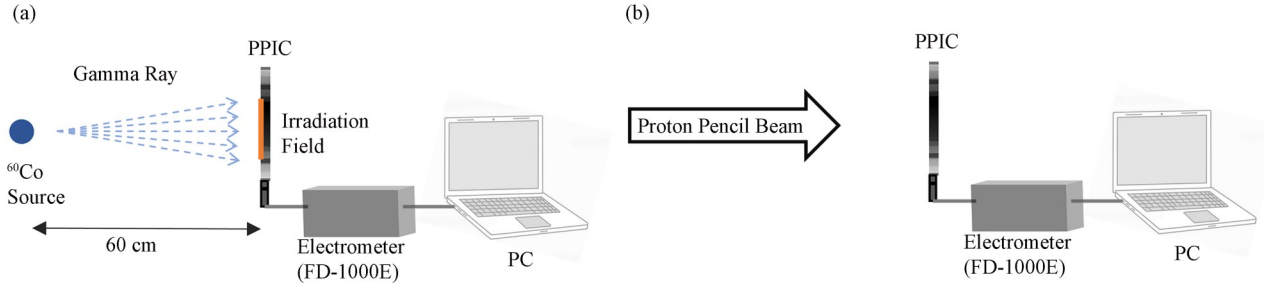

图2 ^{60}Co γ射线辐射场(a)和质子束流(b)测试示意图
Fig.2 Schematic diagram of the ^{60}Co γ irradiation field test (a) and the proton beam test (b)

表2 医用质子束流参数[17]
Table 2 Parameters of the medical proton beam[17]

参数 Parameters	值 Value
能量范围 Energy range / MeV	70~235
剂量率 Dose rate / Gy·min^{-1}·L^{-1}	1
剂量线性 Dose linearity	< 3%
剂量重复性 Dose repeatability	< 1%
剂量稳定性 Dose stability	1%
单点剂量误差(均方根) Single position error (Root Mean Square, RMS)	< 30 counts

场效应管(Field-Effect Transistor，FET)运算放大器、积分电容及低漏电流开关组成的电荷积分器。通过监测积分电容两端的电压，并利用式(2)计算平板电离室内产生的电离电荷。进一步地，利用其内置的数据采集模块将测量结果传输至计算机终端，实现数据的实时显示与存储。

$$V = \frac{Q}{C} \tag{2}$$

式中：V为积分电容两端电压；Q表示电容中累积电荷；C为积分电容。

此研究对静电计的重复性和线性响应进行了测试。采用Keithley 2401型数字源表作为电流源，利用三同轴线将数字源表输出端与静电计输入端相连。基于式(3)，通过改变数字源表输出的电流信号(固定电荷积分时间Δt=1 ms)，实现对输入电荷的精确控制。测试前对静电计进行零点校准，以消除零点误差对测量结果的影响。

重复性测试中，输入电荷固定为100 pC，对静电计进行12次重复测量。测量结果的RSD为0.007%。线性响应测试中，以5 pC为间隔，依次设置输入电荷为5~100 pC。拟合直线如图3所示，纵坐标为静电计输出信号，信号经简单处理，未换算为绝对物理量。其回归方程为y=2.963x，线性相关系数R^2=0.999 6，非线性误差为−0.08%~0.07%。上述测试结果表明静电计具有良好的重复性和线性响应，能够满足平板电离室性能测试对测量精度和稳定性的要求。

$$Q = I \times \Delta t \tag{3}$$

式中：I是电流信号；Q是静电计累积电荷；Δt是电荷积分时间。

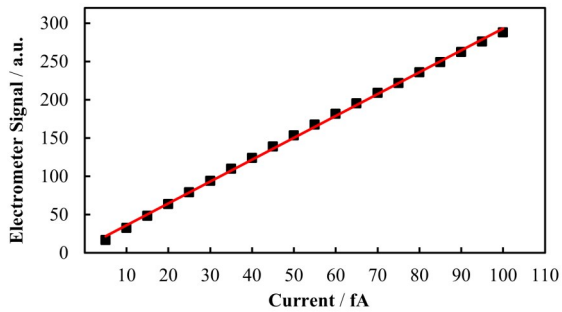

图3 静电计线性响应测试结果
Fig.3 Response linearity test results of the Electrometer

2.3 大面积平板电离室性能测试

2.3.1 漏电流

漏电流是指在无外部辐射场作用下，由于环境因素或外部电磁干扰等原因，在电极间产生的微小电流。由于漏电流会影响测量结果的准确性，因此需对平板电离室的漏电流进行测量与评估。在漏电流测试中，对平板电离室施加400 V偏压并进行40 min预热后，采用电荷积分法对漏电流进行了8次重复测量，如式(4)所示。计算结果表明平板电离室的最大漏电流不超过53 fA，其标准偏差小于6.4 fA。

$$I_{\mathrm{Leak}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{4}$$

式中：I_{Leak}为漏电流；ΔQ是静电计累计电荷量；Δt是电荷积分时间，每次积分时间不小于2 min。

在^{60}Co γ射线辐射场测试中，平板电离室的最

大漏电流不超过电离电流的0.000 8%，符合IEC 60731标准要求，即漏电流不超过辐射场剂量率下产生的电离电流的0.5%[12]。

2.3.2 饱和特性

在^{60}Co γ射线辐射场中，对平板电离室施加的电压分别为50 V、100 V、150 V、200 V、250 V、300 V、350 V和400 V，不同电压下的照射时间固定为1 min，并且每次改变电压后，等待2 min再开始测量。测量结果以400 V时收集到的电荷值进行归一化处理，如图4所示。

从饱和特性曲线上可以看出，当电压为200 V时，平板电离室处于饱和区。根据式(5)计算出的饱和区域的坪斜率为0.01%[18]。

$$S = \frac{2(N_2 - N_1)}{N_2 + N_1} \times \frac{100}{V_{\text{end}} - V_{\text{start}}} \tag{5}$$

式中：S为坪斜率(%/V)；V_{end}为坪区的终点电压；V_{start}为坪区的起点电压；N_2和N_1分别是坪区终点和起点电压对应的静电计读数。

在连续辐射场中，可采用双电压法计算复合修正因子k_s，如式(6)所示[12,19]。当取V_1=400 V时，复合修正因子k_s为1.000 09。根据电荷收集效率f=1/k_s计算得出，电荷收集效率为99.9%，满足IEC 60731标准对工作电压下电荷收集效率大于99%的要求[12,19]。因此，平板电离室的工作电压可以选择为400 V。

$$k_s = \frac{(V_1/V_2)^2 - 1}{(V_1/V_2)^2 - (M_1/M_2)} \tag{6}$$

式中：要求V_1/V_2=2；V_1是平板电离室工作电压；V_2为验证电压；M_1和M_2分别是电压为V_1和V_2时测到的电荷。

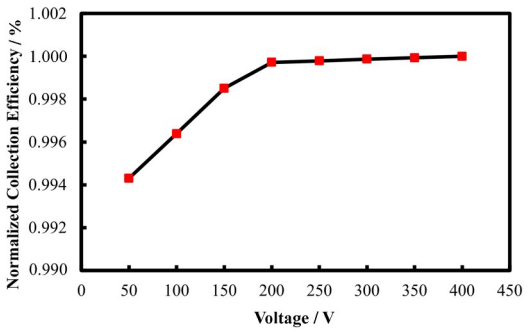

图4 平板电离室饱和特性曲线
Fig.4 Saturation characteristic curve of PPIC

2.3.3 重复性

在^{60}Co γ射线辐射场测试中，电离室电压设置为400 V，照射时间为18 s；在质子束流测试中，电离室电压设为400 V，束流剂量为10 MU(加速器剂量监督单元Monitor Unit，固定束治疗室中1 MU=20 nC[20])。不同辐射场下的10次重复性测试结果如图5、6所示，其中纵坐标表示单次测量结果与测量平均值的比值。

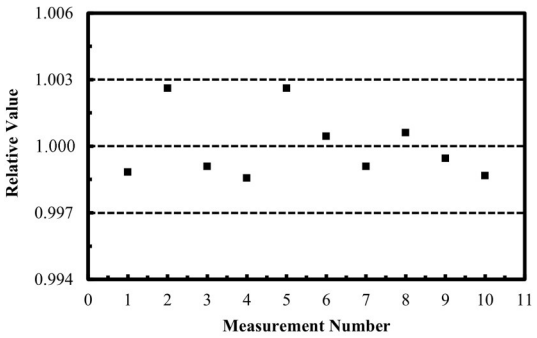

图5 ^{60}Co γ照射下平板电离室的重复性测量结果
Fig.5 Repeatability test results of PPIC under ^{60}Co γ irradiation

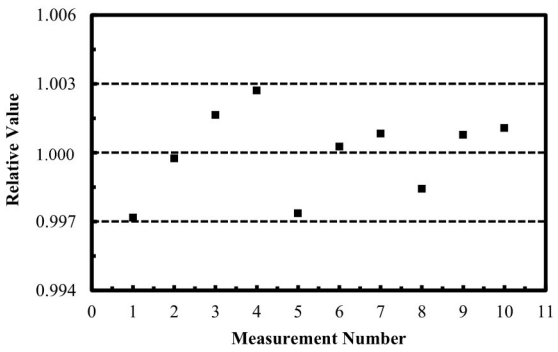

图6 质子束流下平板电离室的重复性测量结果
Fig.6 Repeatability test results of PPIC under proton beam irradiation

通过式(7)计算大面积平板电离室的重复性，其中R_i是第i次测量时静电计的读数，$\bar{R}$是静电计读数的平均值。计算结果显示，平板电离室在^{60}Co γ射线辐射场和质子束流下的重复性分别为0.15%和0.18%。测试结果表明，平板电离室重复性满足IEC 60731标准对重复性在0.3%以内的要求[12]。

$$\text{Rep} = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(R_i - \bar{R})^2}{10 - 1}} \times 100\% \tag{7}$$

式中：Rep代表“重复性”。

2.3.4 剂量线性

剂量线性是指平板电离室内产生的电离电荷与辐射剂量之间的线性关系，反映了在不同辐射剂量水平下电离室响应的一致性和准确性[18]。在^{60}Co γ射线辐射场测试中，电离室电压设置为400 V，照射时间分别为12 s、24 s、36 s、48 s和60 s。在质子束流测试中，电离室电压设置为400 V，照射剂量分别为

0.4 MU、1 MU、5 MU、10 MU、20 MU和30 MU。

大面积平板电离室的剂量线性响应如图7、8所示，纵坐标为静电计采集的电离电荷信号（未换算为绝对物理量），用于反映平板电离室在不同辐照条件下的响应变化。剂量响应偏差根据式（8）计算得到。在^{60}Co γ射线辐射场测试中，平板电离室的剂量响应偏差为−0.08%~0.04%；在质子束流测试中，其剂量响应偏差为−0.06%~0.09%。测试结果表明，平板电离室的剂量响应偏差满足IEC 60731标准对剂量响应偏差在±0.5%之间的要求[12]。

$$L_i = \left(\frac{M_i}{Q_i} \times \frac{Q_r}{M_r} - 1\right) \times 100\% \tag{8}$$

式中：L_i为第i个测量点的剂量响应偏差；M_i为第i个测量点的静电计读数；Q_i为第i个测量点的输入信号；M_r为参考点的静电计读数；Q_r为参考点的输入信号。在^{60}Co γ射线辐射场中，设置照射时间为36 s时的测量点作为参考点；在质子束流测试中，设置照射剂量为5 MU时的测量点作为参考点。

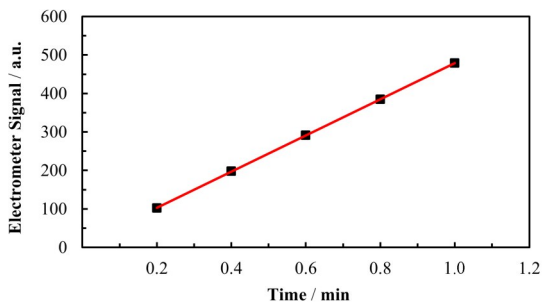

图7 ^{60}Co γ照射时平板电离室剂量线性测试
Fig.7 Dose linearity test of PPIC under ^{60}Co γ irradiation

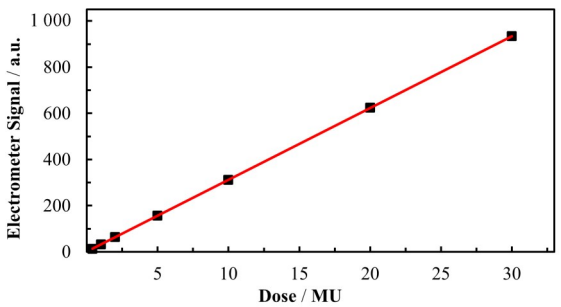

图8 质子束流照射时平板电离室剂量线性测试
Fig.8 Dose linearity test of PPIC under proton beam irradiation

2.3.5 能量响应

能量响应是指电离室响应随入射粒子能量变化而改变的特性。此研究测试了大面积平板电离室在医用质子束流能量范围内的能量响应特性。在质子束流测试中，电离室电压为400 V，单次照射剂量为10 MU，束流能量分别设置为82.4 MeV、122 MeV、152 MeV、187.8 MeV和235 MeV。平板电离室在不同束流能量下的响应如图9所示，其中纵坐标为每个能量下的测量结果相对于平均值的百分比偏差。

测试结果显示，在医用质子束流能量范围内，大面积平板电离室能量响应的相对偏差为−0.72%~0.95%。上述测量结果表明，平板电离室在医用质子束流能量范围内具有良好的能量一致性。

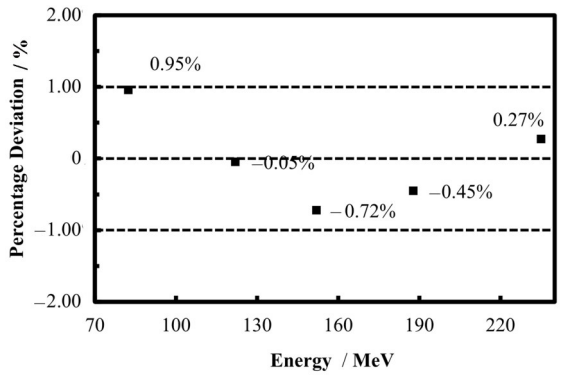

图9 质子束流下平板电离室的能量响应
Fig.9 Energy response of PPIC under proton beam irradiation

2.4 技术指标对比

目前用于质子束流剂量测量的商用大面积平板电离室包括PTW公司生产的布拉格峰电离室（Bragg Peak Chamber，BPC）34070、BPC 34080、BPC 34089及IBA公司生产的Stingray。此论文将大面积平板电离室的测试结果与商用平板电离室的相关技术指标进行了对比，如表3所示。相较于商用大面积平板电离室，该平板电离室在具有更大灵敏面积的同时，电荷收集效率为99.9%，漏电流不超过53 fA；工作电压为400 V，在合理的范围之内。商用电离室的性能参数来源于厂商公开技术资料，其辐射场条件主要为^{60}Co γ射线。不同平板电离室的测试条件可能存在差异，表3中的数据仅供参考。

3 结语

此研究设计并研制了一种有效灵敏区域直径16 cm的大面积平板电离室，并对其关键性能参数进行了系统性测试。利用上海计量院^{60}Co γ射线辐射场和上海瑞金医院质子中心的国产首台质子治疗装置，采用静电计对大面积平板电离室产生的电离电荷进行采集和定量分析。测试结果显示：平板电离室最大漏电流不超过53 fA，漏电流标准偏差不超过6.4 fA；工作电压为400 V，复合修正因子k_s为1.000 09，电荷收集效率为99.9%。平板电离室在^{60}Co γ射线辐射场测试中的重复性为0.15%，剂量响应偏差为−0.08%~0.04%。在质子束流测试中，其

表3　大面积平板电离室与商用大面积平板电离室技术指标对比
Table 3　Comparison of technical parameters of large-area PPIC with those of commercial ionization chamber

		大面积平板电离室（此研究）Large-area PPIC (this study)	BPC 34070[21]	BPC 34080 (Thin Window)[22]	BPC 34089[23]	Stingray[24]
灵敏区域 Sensitive region	面积 Area / cm^2	201	52.3	52.3	170	113
	直径 Diameter / cm	16	8.16	8.16	14.7	12
	极板间距 Depth / mm	2	2	2	2	1
材质 Materials	入射窗 Entrance window	4 mm PEEK 0.01 mm graphite	3.35 mm Polymethyl Methacrylate (PMMA) 0.02 mm graphite 0.1 mm lacquer	0.5 mm Polymethyl Methacrylate (PMMA) 0.02 mm graphite 0.1 mm varnish	0.29 mm Polycarbonate (PC) foil 0.1 mm Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) 2.47 mm Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) 0.03 mm graphite	Graphite Peek ELS
性能 Performance	漏电流 Leakage current / fA	⩽53	⩽±100	⩽±100	⩽±250	⩽±250
	工作电压 Operating voltage / V	400	400	400	400	150
	电荷收集效率 Charge collection efficiency	⩾99.9% (450 m Gy·min^{-1})	⩾99.5% (21 Gy·s^{-1})	⩾99.5% (21 Gy·s^{-1})	⩾99.5% (21 Gy·s^{-1})	

重复性为0.18%，剂量响应偏差为−0.06%~0.09%，能量响应相对于测量平均值的百分比偏差为−0.72%~0.95%。测试结果表明，该平板电离室满足IEC 60731标准对放射治疗用平板电离室的要求，并在医用质子束流能量范围内表现出了较好的能量一致性。

本文对该平板电离室与商用电离室在尺寸、漏电流、工作电压与电荷收集效率等方面进行了比较。需要说明的是，不同电离室的测试条件与校准方法在文献或厂家公开技术资料中存在差异，因此表3的对比结果仅供参考，不能直接等同为完全相同的测试条件下的性能差异。

研究结果表明，此平板电离室的性能能够满足质子束深度剂量测量的应用需求。论文工作在大面积有效灵敏区域设计（直径16 cm）、低本底控制和系统化验证流程方面进行了有益的工程实践，为后续质子放疗剂量测量设备的国产化提供了参考。未来将进一步对平板电离室的剂量率范围、辐照后漏电以及长期稳定性等性能指标进行评估，并开展质子束深度剂量测量相关研究，以获得更充分的数据，最终实现大面积平板电离室的国产替代。

致谢　感谢上海艾普强粒子设备有限公司吴小兵、王捷、余波、龚梁德等在实验和测试过程中提供的协助和技术指导；感谢吴小兵老师、张满洲老师对本文提出的修改意见。

作者贡献声明　白浩博负责实验研究，数据处理，撰写论文；林业负责平板电离室和静电计的设计与研制，实验流程设计，实验研究，指导论文修订；陈波提供理论指导；何林锋协助^{60}Co γ射线照射实验完成；谷帅喆提供模拟技术支持，指导论文修订；张毅斌、周晖协助质子束流照射实验完成；陈志凌统筹论文总体规划及修改。

参考文献

1　Isacsson U, Montelius A, Jung B, *et al*. Comparative treatment planning between proton and X-ray therapy in locally advanced rectal cancer[J]. Radiotherapy and Oncology, 1996, **41**(3): 263 – 272. DOI: 10.1016/S0167-8140(96)01851-8.

2　Newhauser W. International commission on radiation units and measurements report 78: prescribing, recording and reporting proton-beam therapy[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2009, **133**(1): 60 – 62. DOI: 10.1093/rpd/ncp005.

3　谷帅喆, 陈志凌, 林业, 等. 吸收体材料水等效厚度比的能量依赖对MLIC测量结果影响的模拟研究[J]. 核技术, 2024, **47**(11): 110201. DOI: 10.11889/j. 0253-3219. 2024.hjs.47.110201.
GU Shuaizhe, CHEN Zhiling, LIN Ye, *et al*. Simulation

study of the influence of water equivalent ratio energy dependence of absorber materials on measurement of multilayer ionization chamber[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(11): 110201. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024. hjs.47.110201.

4 潘灵婧, 顾先宝, 王远远, 等. 锥形闪烁体探测器在笔形束扫描式质子放疗系统质控中的应用[J]. 核技术, 2024, **47**(8): 080501. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024. hjs. 47. 080501.
PAN Lingjing, GU Xianbao, WANG Yuanyuan, *et al*. Application of cone-shaped scintillation detector for quality assurance in pencil beam scanning proton therapy systems[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(8): 080501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080501.

5 Ruan X Y, Li X F, Guo M Y, *et al*. Cone-beam computed tomography noise reduction method based on U-Net with convolutional block attention module in proton therapy [J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35**(7): 122. DOI: 10.1007/s41365−024−01495-1.

6 Musolino S V. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water; technical reports series No. 398[J]. Health Physics, 2001, **81**(5): 592 – 593. DOI: 10.1097/00004032-200111000 − 00017.

7 Karger C P, Jäkel O, Palmans H, *et al*. Dosimetry for ion beam radiotherapy[J]. Physics in Medicine & Biology, 2010, **55**(21): R193. DOI: 10.1088/0031-9155/55/21/R01.

8 Bäumer C, Koska B, Lambert J, *et al*. Evaluation of detectors for acquisition of pristine depth-dose curves in pencil beam scanning[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2015, **16**(6): 151 – 163. DOI: 10.1120/jacmp.v16i6.5577.

9 Farr J B, Moskvin V, Lukose R C, *et al*. Technical note: design and characterization of a large diameter parallel plate ionization chamber for accurate integral depth dose measurements with proton beams[J]. Medical Physics, 2020, **47**(7): 3214 – 3224. DOI: 10.1002/mp.14166.

10 Pedroni E, Scheib S, Böhringer T, *et al*. Experimental characterization and physical modelling of the dose distribution of scanned proton pencil beams[J]. Physics in Medicine and Biology, 2005, **50**(3): 541 – 561. DOI: 10.1088/0031-9155/50/3/011.

11 葛亚琼, 殷重先, 李珍, 等. 多层平板电离室优化设计[J]. 核技术, 2019, **42**(6): 060202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060202.
GE Yaqiong, YIN Chongxian, LI Zhen, *et al*. Optimization design of a multilayer ionization chamber [J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(6): 060202. DOI: 10. 11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060202.

12 IEC 60731: 2011. Medical electrical equipment - Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011.

13 国家食品药品监督管理总局. 医用电气设备放射治疗用电离室剂量计: YY/T 0976—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
China Food and Drug Administration. Medical electrical equipment - dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy: YY/T 0976—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

14 汪晓莲. 粒子探测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 24.
WANG Xiaolian. Particle detection technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 24.

15 Faddegon B, Ramos-Méndez J, Schuemann J, *et al*. The TOPAS tool for particle simulation, a Monte Carlo simulation tool for physics, biology and clinical research [J]. Physica Medica, 2020, **72**: 114 – 121. DOI: 10.1016/j.ejmp.2020.03.019.

16 Athar B. Proton beam evaluation of common implantable port materials[EB/OL]. (2021-09) [2025-5]. https://www.hmpgloballearningnetwork. com/site/iolearning/white-papers/proton-beam-evaluation-common-implantable-port-materials.

17 Zhang M Z, Li D M, Shen L R, *et al*. SAPT: a synchrotron-based proton therapy facility in Shanghai[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(10): 148. DOI: 10.1007/s41365−023−01293-1.

18 李毅华, 陆刚, 王坤, 等. 国产平板电离室剂量学参数测定与评价[J]. 计量科学与技术, 2024, **68**(5): 17 – 23. DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2024.0052.
LI Yihua, LU Gang, WANG Kun, *et al*. Determination and evaluation of dosimetric parameters of domestic parallel plate ionization chamber[J]. Metrology Science and Technology, 2024, **68**(5): 17 – 23. DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2024.0052.

19 Zankowski C, Podgorsak E B. Determination of saturation charge and collection efficiency for ionization chambers in continuous beams[J]. Medical Physics, 1998, **25**(6): 908 – 915. DOI: 10.1118/1.598269.

20 虢梦雅. 质子调强放射治疗中实施与质量保证优化[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2022.
GUO Mengya. Optimization of implementation and quality assurance in intensity modulated proton therapy [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.

21 PTW. Bragg Peak Chamber Type 34070 Waterproof plane-parallel chamber for dosimetry in proton beams[EB/OL]. [2025-1]. https://www. ptwdosimetry. com/en/products/bragg-peak-chamber-34070.

22 PTW. Bragg Peak Chamber Type 34080 Waterproof plane-parallel chamber for dosimetry in proton beams [EB/OL]. [2025-1]. https://www. ptwdosimetry. com/en/products/bragg-peak-chamber-34080.

23 PTW. Bragg Peak 150 Type 34089 Very large area plane-parallel chamber for dosimetry in proton beams [EB/OL]. [2025-1]. https://www. ptwdosimetry. com/en/products/bragg-peak-150.

24 IBA. Faster, more accurate relative dosimetry for TPS commissioning[EB/OL]. [2025-1]. https://www. iba-dosimetry.com/product/stingray.