

高梯度 250 keV 脉冲质子加速装置

预注入器室*

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文报道一台带有高梯度 Pierce 型加速管的脉冲质子加速装置, 能量 250 keV, 脉冲质子流强度最大 240 mA, 脉宽 100 μ s, 重复频率 10 pps, 能量稳定度 $\pm 0.06\%$ 。在 180 keV, 120 mA 质子流下, 测得归一化束流发射度 0.36π cm-mrad。文中描述了高压发生器、电压稳定系统, 高梯度加速管和双等离子体离子源的设计、结构和试验结果。这台装置用于 BPS 的预注入器的研制工作。

一、概 述

为了研制 BPS (Beijing Proton Synchrotron) 的 750 keV 预注入器, 我们研制了一台 250 keV 的模型装置。根据 750 keV 预注入器的性能要求^[1,2], 研制的主要目的是: (i) 研制在无束流和有束流期间高电压的稳定系统——前者称“慢”稳定系统, 后者称“快”稳定系统。稳定度都优于 0.1%。(ii) 研制脉冲强流、低发射度的质子源。(iii) 研制高梯度

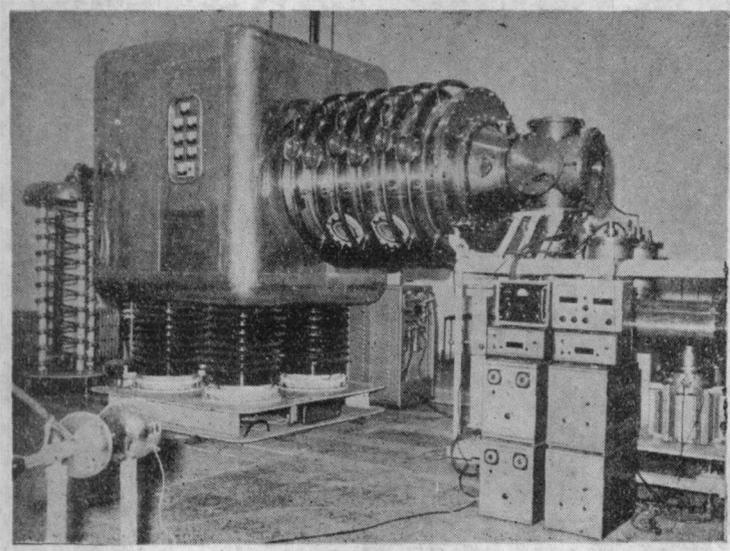


图1 高梯度 250 keV 脉冲质子加速装置

本文 1981 年 5 月 27 日收到。

*由丛冶炳执笔。

加速管,研究离子源与高梯度加速管的匹配特性。

图 1 是这台模拟装置的照片。它安装于长 15 米、宽 12 米、高 9 米的实验厅内,大厅六面都以镀锌铁皮或铁丝网屏蔽,形成全屏蔽六面体。外电网先经过 100 kVA 三相调压器,使电压稳定在 $\pm 1\%$,再经由三相低通滤波器向控制室和实验厅供电。总耗电量约 40 kVA。厅内的“高电平地线”和“低电平地线”分别接到各自相应的设备和仪器上,两条地线最终汇于一个公共的接地桩上。接地电阻为 0.26Ω 。

本装置于 1979 年 10 月调整出束。工作能量 250 keV,最大脉冲质子流 240 mA,脉冲宽度 $100\ \mu s$,重复频率 10 pps,在 180 keV,120mA 质子流下,测得的归一化束流发射度 $0.36\pi\ \text{cm-mrad}$ 。

二、高压发生器及其电压稳定系统

高压倍加器及其稳压系统的方框原理图示于图 2。为了减小高压倍加器的纹波电压,采用双边对称电路,中频 6 kc 供电,其性能和参数列于表 1。

由 RC 振荡器产生 (3—10) kc 正弦电压,放大后推动推挽功放级向双边对称高压塔供电。直流高压经过 $2M\Omega$ 保护电阻 R_s (碳膜电阻串联浸油)送至高压仓,使储能电容 C_2 (2700pf) 充电。束流脉冲通过加速管时, C_2 经高压仓和加速管放电。为了限制加速管的微放电,使用浪涌电阻 R ($35k\Omega$) 与 C_2 串联。

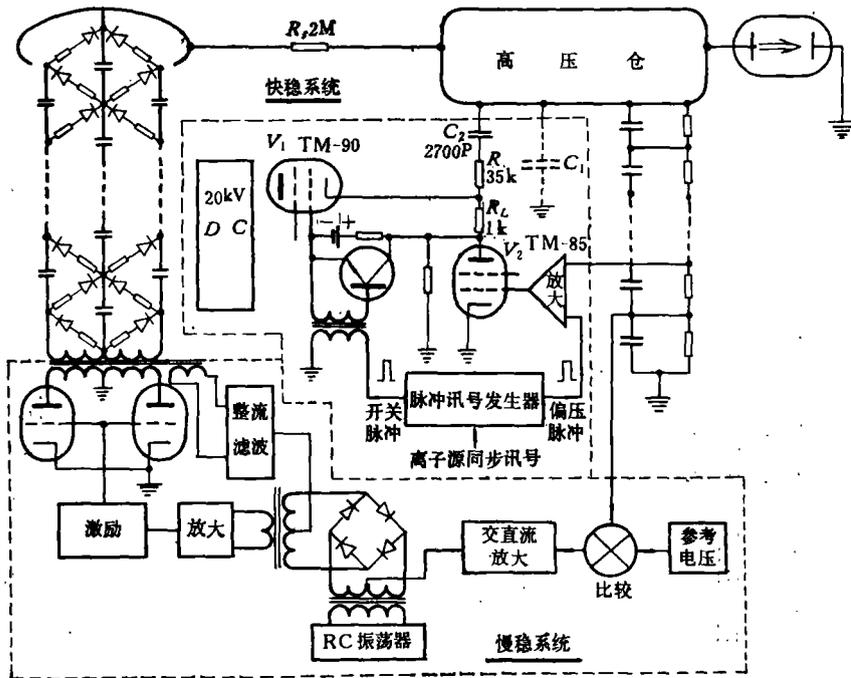


图 2 高压倍加器及其稳压系统原理图

高电压“慢”稳定系统有两条回路:由阻容分压器取得电压信号与参考电压(10V)比较、放大后调制功放级的激励栅极;另一条由中频变压器的第三绕组取得电压信号进行反

表1 高压倍加器性能及参数表

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 电路形式 | 双边对称倍加电路 |
| 倍加级数 | 10级 |
| 供电频率 $f(\text{kc})$ | 3-10 |
| 供电电压 $V_0(\text{kV})$ | 30 |
| 倍加滤波电容 $C(\mu\text{f})$ | 0.047(0.10) |
| 电容器数量 | 30 |
| 整流元件 | 高频硅堆, 10kc, 35kV/100mA |
| 额定电压 $V(\text{kV})$ | 250 |
| 平均输出电流 $I(\text{mA})$ | 3(最大6) |
| 负载电压降落 $\Delta V(\text{V})$ | 450 |
| $\Delta V/V$ | $\sim 2 \times 10^{-3}$ |
| 纹波电压 $\delta V(\text{V})$ | 13 |
| $\delta V/V$ | $\sim 5 \times 10^{-4}$ |
| 电压效率 F | 98%(理论值) |

馈调制。在无束流时,这套“慢”稳定系统的稳定度为0.1%。

当束流脉冲通过加速管时,将产生电压跌落。考虑分布电容 C_1 的影响后,电压跌落为^[3]

$$\Delta V_{\text{acc}}(t) = -\frac{I}{C_1 + C_2} \left[t + \frac{C_2^2 R}{C_1 + C_2} \left(1 - e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R} t} \right) \right] \quad (1)$$

其中 I 为束流强度(A), R 为浪涌电阻(Ω), C_1 为分布电容(f) C_2 为储能电容(f), t 为由束流脉冲开始时起算的时间(s)。对高压“快”稳定系统分析、计算后可知,当补偿电压 $\Delta V_i(t)$ 满足

$$\Delta V_i(t) = I \left(R + \frac{t}{C_2} \right) \quad (2)$$

时,即可达补偿上述电压跌落的目的。“快”稳定系统是由调整管 V_1 (TM-90) 和 V_2 (TM-85) 组成的双管调制系统。无束流脉冲时, V_1 和 V_2 都处于截止状态;与离子源

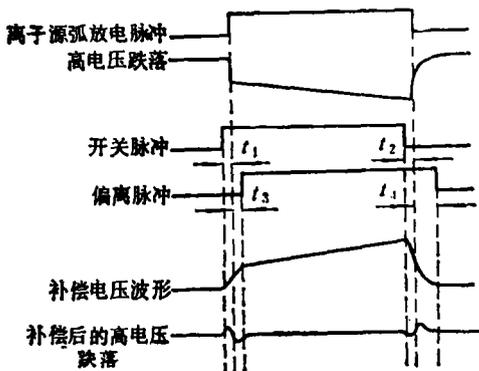


图3 “快”稳系统双管调制时诸脉冲分析

弧放电脉冲同步的开关脉冲和偏压脉冲分别使调整管 V_1 和 V_2 导通,从而完成双管电压调制作用。由于十几千伏的补偿电压前、后沿较大,将严重影响束流脉冲前、后沿期间高电压的补偿效果,为此须使开关脉冲提前输入,偏压脉冲延后输入。图3示出诸相关脉冲间的时间关系。

当束流脉冲结束后,调整管 V_1 和 V_2 又恢复至截止状态,储能电容 C_2 重新充电,加速管上的电压将按下式变化

$$V_{\text{acc}}(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{1+K\beta}{R_m C_2} t} \right) + V_e e^{-\frac{1+K\beta}{R_m C_2} t} \quad (3)$$

其中 V_0 为高压塔的额定电压; V_e 为束流脉冲结束时加速管上的电压; t 为由束流脉冲

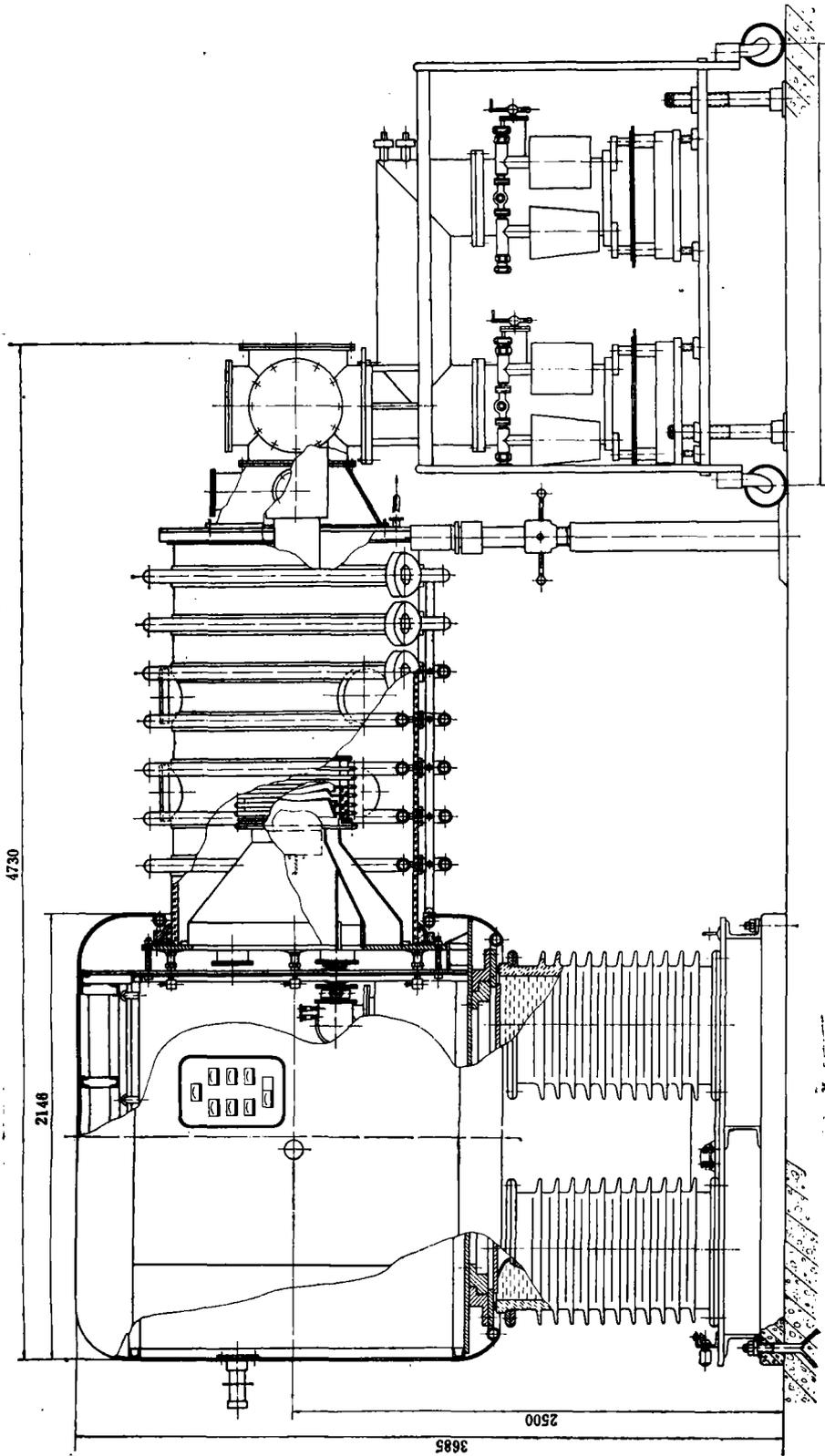


图 4 高压舱、加速柱和真空系统结构图

结束时起算的时间; K 为整个回路的总放大倍数; β 为阻容分压器取样反馈系数; $R_m = R_s + R + R_L + R_C$ 为 C_2 充电回路的总电阻值; C_2 为储能电容。

电路的设计需保证在下一个束流脉冲到达之前, 加速管上的电压须稳定在额定值上。

三、高压仓和离子源

高压仓、加速柱和真空系统的结构示于图 4。高压仓由 5mm 厚铝板制作, 外形尺寸为 $2M \times 2M \times 2.2M$ 。它由四只瓷套式隔离变压器支持, 既作高压绝缘支撑, 又向高压仓供电。高压仓内装有离子源(及其附属设备)和分子泵系统。仓的顶部和底部有排风孔, 五只风扇装于仓顶向外排气。

双等离子体离子源安装于高梯度加速管的入口处, 其引出电极就是加速管的第一加速电极。源体的主要几何参数示于图 5。引出电压 (40—50)kV, 直接由加速管上分压获得。使用掺钨硼化镧阴极, 直径 $\phi 15\text{mm}$, 厚 1.5mm, 固定在钼筒上。这种阴极有较低的

发射温度和较好的抗中毒能力。以 $\phi 0.6\text{mm}$ 钨丝绕制成旁热式灯丝, 加热功率为 (300—400)W。一台超纯 H_2 发生器通过针阀向离子源放电室供 H_2 气, 工作气压约为 0.2 托。离子源采用弧脉冲调制, 弧脉冲电源采用闸流管—人工线电路, 输出脉冲弧压(空载) 1600V, 弧流 80A。使用一套红外光发射—接收装置将触发信号传送到弧脉冲电源。磁场电源 (30V, 0 ~ 10A) 和供气电源 (5V, 0 ~ 4A) 的稳定度都为 $\pm 0.1\%$ 。典型的离子源运行参数列于表 2。

表 2 脉冲离子源运行参数

| | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 灯丝电流 I_f | (16~18)A |
| 灯丝电压 V_f | (18~20)V |
| 脉冲弧放电电流 I_a | ~40A |
| 脉冲弧放电电压 V_a | (650~750)V |
| 磁场电流 I_M | (4~5)A (2000—2500 安匝) |
| 供气电流 I_H | 1.5A |
| 偏置电压 V_C | -45V |
| H_2 气供气气压 P_{H_2} | (0.1~0.2)Torr |
| H_2 气耗量 Q | <2.5cc · atm/min |
| 脉冲质子流 I_p | 240mA ¹⁾ |
| 质子流脉冲宽度 τ | 100 μ s |
| 脉冲重复频率 f | 10pps |
| 归一化束流发射度 θ_s | 0.36 π cm-mrad ²⁾ |

1) 在加速管末端测量值。

2) 180keV, 120mA 质子流下, 在加速管末端的测量值。

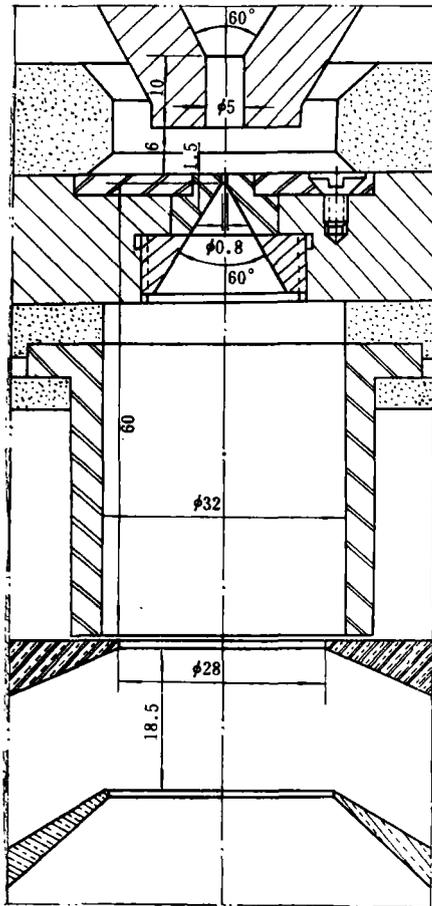


图 5 双等离子体源的主要几何参数

四、高气压加速柱和高梯度加速管^[4]

本装置采用高气压型加速柱结构和高加速梯度 Pierce 型加速管(见图 4)。Pierce 型加速管理论^[5]考虑了克服强流条件下空间电荷的发散效应。假设带电粒子的发射面是半径为 r_0 的平板;发射的粒子流密度均匀;粒子的初始速度为 0,则可计算出 Pierce 电场的分布如下:

在束流内部 ($r \leq r_0$)

$$V(r, z) = \left(\frac{9j}{4\epsilon_0 \sqrt{2\eta}} \right)^{2/3} z^{4/3}; \quad (4)$$

在束流外部 ($r \geq r_0$)

$$\frac{V(R, Z)}{A_j^{2/3}} = Z^{4/3} + \int_0^\infty \frac{4}{9\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)} \cdot \frac{1}{K^{7/3}} [U(R) - 1] e^{-KZ} \cdot dK, \quad (5)$$

其中 j 为粒子流密度; ϵ_0 为真空介电常数; r, z 分别为粒子的径向和轴向位置坐标; $V(r, z)$ 为规范化电位; η 是粒子的荷质比; $R = r/r_0, Z = z/r_0, r_0$ 是束流半径;

$U(R) = \frac{\pi K}{2} [J_1(K)Y_0(KR) - Y_1(K)J_0(KR)]$, J_0, Y_0 和 J_1, Y_1 分别为零阶和一阶的第一类和第二类贝塞尔函数。

我们编制了 PIERCE 静电场程序,用计算机计算出 Pierce 电场形状,其相应的等位面即是加速电极的形状。计算参数选为:总加速电压 $V_0 = 250 \text{ kV}$; 质子束流强 $I_p = 250 \text{ mA}$; 束流半径 $r_0 = 14 \text{ mm}$ 。

计算结果表明,最大加速电场 $(E_{acc})_{max} = 34 \text{ kV/cm}$, 加速管内最大电场 $(E)_{max} = 98 \text{ kV/cm}$ 。

Pierce 加速管总长 363 mm, 由 7 个瓷环和 6 个电极粘接而成。加速电极用钛合金 (Ti6Al4V), 以数控车床精密加工, 中心孔径 $\phi 28 \text{ mm}$ 。屏蔽电极亦用钛合金 (Ti6Al4V) 制造。封接电极和两只端法兰用不锈钢。绝缘环为高压电瓷材料, 外径 $\phi 500 \text{ mm}$, 内径 $\phi 430 \text{ mm}$, 高 35 mm。用聚醋酸乙烯脂作胶粘剂, 加垫钢丝保证真空密封。在加速管外部设有两排放电球隙。

高气压绝缘筒由有机玻璃制成, 直径 $\phi 1160 \text{ mm}$, 高 1719 mm。筒体上有六个手孔供安装和检修使用。沿筒壁安装有六对内、外均压环, 两串分压电阻 (250 kV 时分压电流 1 mA) 和两排放电球隙, 该绝缘筒使用前曾经过 2 大气压(表压)水压试验。

加速管的出口端有一只受压缩的 $\phi 320 \text{ mm}$ 不锈钢波纹管, 使加速管承受约 500 kg 的预压力, 以抵消充进 SF_6 气体(允许使用到 1.2 atm) 时而产生的拉力。

一台 450 l/s 的分子泵安装于加速管的高压端, 在加速管的末端有两台 1000 l/s 的钛球升华泵和两台 500 l/s 的钛离子溅射泵, 它们都是交替使用的。离子源工作时, 加速管末端真空度为 $(1-2) \times 10^{-5} \text{ Torr}$ 。当真空系统需要暴露大气时, 须充以干燥的氮气。

五、性能试验

1. 高梯度加速管的微放电 调试时曾使用“真空监测”，“辐射剂量监测”和“分压电流监测”三种手段共同监视微放电。一年多的运行表明，在加速管的末端测试真空度的变化，能非常灵敏地反映加速管内部的微放电，其特点是：当微放电发生时，气压将增1—3倍——例如，由 1×10^{-5} Torr 增加到 3×10^{-5} Torr——当微放电结束后，气压是慢慢地恢复到原来的数值。

加速管无束流空载锻炼时，电压很容易地升至 220 kV，但有束流以后，频繁地发生微放电，4 小时后微放电次数降至 (3—5) 次/小时，8 小时降至 1 次/小时。由 220kV 锻炼至 250kV，经过 30 多小时，微放电才降至小于 1 次/小时。

2. 高压跌落补偿试验 在束流脉冲期间，不使用“快”、“慢”稳系统，由阻容分压器取样，以示波器测试的高压跌落波形如图 6 所示，其结果与理论计算基本一致。

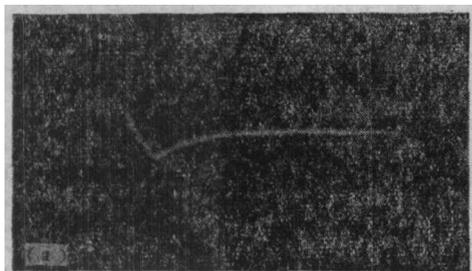


图 6 (a) 200 keV, 165mA 时无补偿电压跌落

$x: 100 \mu\text{s}/\text{格}$

$\Delta V_{acc} = 8\text{kV}$ $y: 5\text{kV}/\text{格}$

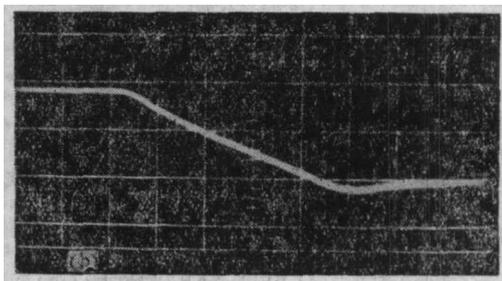
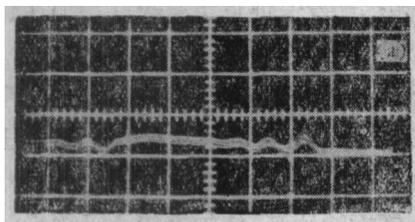


图 6 (b) 250keV, 220mA 时无补偿电压跌落

$x: 20 \mu\text{s}/\text{格}$

$\Delta V_{acc} = 10\text{kV}$ $y: 5\text{kV}/\text{格}$

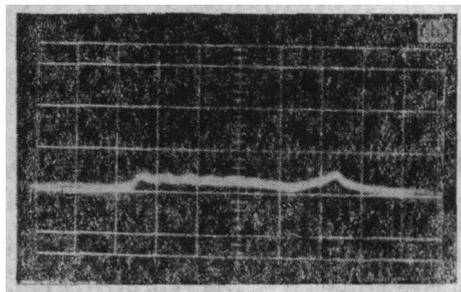
当两个稳定系统使用之后，高压跌落得到很好的补偿。补偿后的高压跌落波形示于图 7，250 keV，240 mA 下电压稳定达 0.06%。如果使用束流切割器切去束流脉冲的前、后沿，其中间部 ($>80 \mu\text{s}$) 的束流能量稳定度必定会好于 0.05%。



$x: 20 \mu\text{s}/\text{格}$ $y: 500\text{V}/\text{格}$

(a) 200keV, 165mA 时

$\Delta V_{acc} \leq \pm 200\text{V}$, $\pm \frac{\Delta V}{V} \leq 0.10\%$



$x: 20 \mu\text{s}/\text{格}$ $y: 500\text{V}/\text{格}$

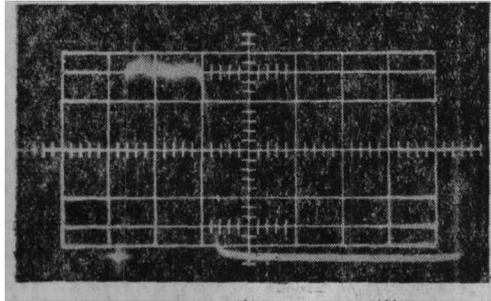
(b) 250keV, 240mA 时

$\Delta V_{acc} \leq \pm 150\text{V}$, $\pm \frac{\Delta V}{V} \leq 0.06\%$

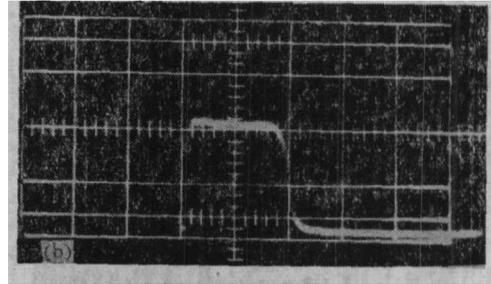
图 7 经过补偿后的高压跌落波形

3. 束流强度和束流发射度测量 使用狭缝板—酸敏变色片系统测量束流发射度。

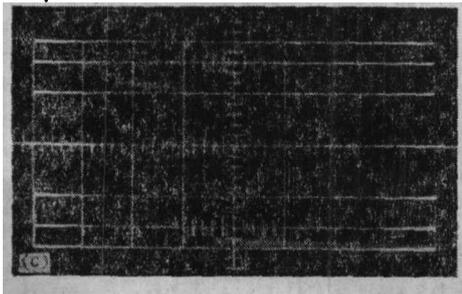
狭缝板有七条狭缝, 缝宽 0.17mm, 缝距 6mm, 狭缝板距酸敏变色片 130mm. 在狭缝板上串接 5k Ω 自给偏压电阻, 狭缝板前有电子陷阱电极 (-6kV), 次级电子可全部被抑制, 故狭缝板同时亦作法拉第筒使用, 所接收到的束流经积分器和示波器同时测量. 图 8 是示波器测到的不同能量下的束流波形, 250keV 时为 240mA. 图 9 (a) 是在质子束照射下狭缝的投影, (b) 是其发射度相图, 180 keV, 120mA 时, 归一化发射度 $\epsilon_s = 0.36\pi$ cm-mrad, (99% 束流) 亮度 $B = 1.9 \times 10^9$ A/m² · rad².



$x: 50\mu\text{s}/\text{格}$ $y: 20\text{mA}/\text{格}$
 (a) $E = 90\text{keV}$ $I_p = 80\text{mA}$
 $I_f = 17.5\text{A}$ $I_M = 3.0\text{A}$
 $V_f = 21.0\text{V}$ $V_c = -55\text{V}$
 $I_s = 40\text{A}$ $V_{ex} = 45\text{kV}$
 $V_s = 690\text{V}$ $P_{H_2} = 0.2\text{Torr}$



$x: 50\mu\text{s}/\text{格}$ $y: 50\text{mA}/\text{格}$
 (b) $E = 150\text{keV}$ $I_p = 100\text{mA}$
 $I_f = 17.9\text{A}$ $I_M = 3.0\text{A}$
 $V_f = 21.5\text{V}$ $V_c = -55\text{V}$
 $I_s = 43\text{A}$ $V_{ex} = 30\text{kV}$
 $V_s = 720\text{V}$ $P_{H_2} = 0.28\text{Torr}$



$x: 50\mu\text{s}/\text{格}$ $y: 50\text{mA}/\text{格}$
 (c) $E = 200\text{keV}$ $I_p = 165\text{mA}$
 $I_f = 18.0\text{A}$ $I_M = 4.4\text{A}$
 $V_f = 21.5\text{V}$ $V_c = -45\text{V}$
 $I_s = 48\text{A}$ $V_{ex} = 40\text{kV}$
 $V_s = 780\text{V}$ $P_{H_2} = 0.25\text{Torr}$

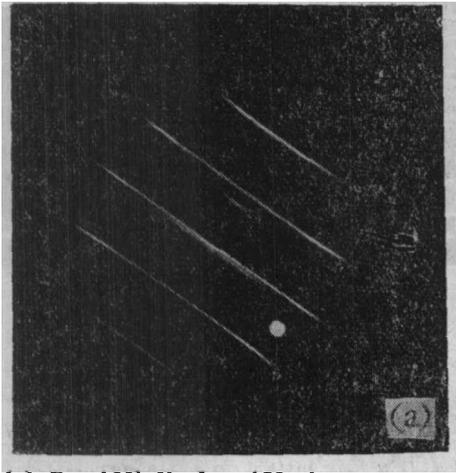


$x: 50\mu\text{s}/\text{格}$ $y: 50\text{mA}/\text{格}$
 (d) $E = 250\text{keV}$ $I_p = 240\text{mA}$
 $I_f = 15.7\text{A}$ $I_M = 4.5\text{A}$
 $V_f = 16.3\text{V}$ $V_c = -50\text{V}$
 $I_s = 48\text{A}$ $V_{ex} = 50\text{kV}$
 $V_s = 760\text{V}$ $P_{H_2} = 0.2\text{Torr}$

图 8 各种能量下的束流波形

调节离子源的磁场和弧放电参数, 改变了等离子体发射面的形状, 从而使离子源和加速管得到匹配. 当参数调节失配时, 束流波形的平顶将发生严重畸变. 因此, 束流波形顶部有无畸变, 可作为离子源与加速管匹配状态的定性指示.

4. 加速管与离子源的匹配 在加速器运行中, 要求可加速的束流的能量和流强范围越大越好, 但根据 Pierce 加速管理论设计的高梯度加速管, 仅在满足所设计的能量与流强之间的“三分之二次方”关系之下, 才有良好的发射度特性, 否则束流将会过聚焦或欠聚

(a) $E = 180\text{keV}$, $I_p = 120\text{mA}$

质子流时狭缝投影

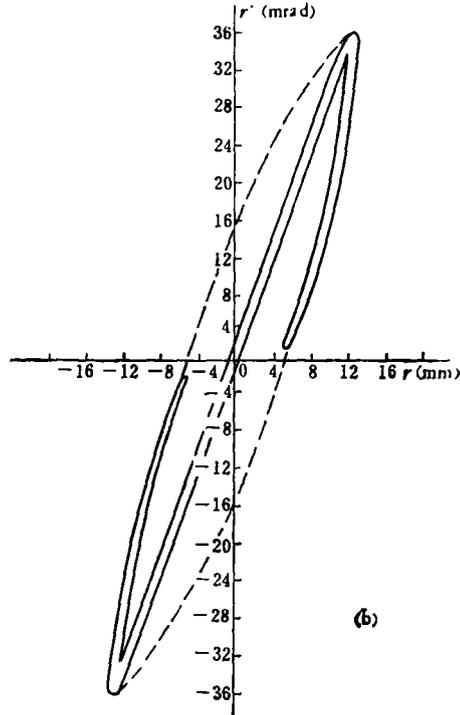
(b) 束流发射度相图总面积 $A = 569\text{mm} \cdot \text{mrad}$
归一化发射度: $\epsilon_2 = 0.36\pi \text{cm} \cdot \text{mrad}$
亮度: $B = 1.90 \times 10^9 \text{A/m}^2 \cdot \text{rad}^2$

图9 束流发射度测量结果

焦。在我们的装置中, Pierce 加速管是按 250keV , 250mA 质子流设计的。仔细调节离子源参数,可在 130keV (85mA) 至 250keV (240mA) 范围内得到良好的束流波形;若将第二和第三加速电极短接,则可得到 60keV (40mA) 至 90keV (80mA) 范围内良好的束流波形。能量和流强之间近似地满足 $V \propto I^{2/3}$ 关系。

六、结束语

这台 250keV 脉冲质子加速装置的设计、加工和调试为 BPS 的 750keV 预注入器的研制提供了全面的经验。其高梯度加速管、脉冲离子源,高电压的“快”、“慢”稳定系统等,可直接的或按比例放大后使用于 750keV 的预注入器上。

本装置在设计、加工和调试过程中,力一教授曾给予不少的指导和鼓励。设计时曾得到潘惠宝、张仲木、盛树刚和刘雪光同志的帮助;王顺发、过叙根等同志协助解决了大部分制造工艺上的困难,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] “预注入器” BPS 初步设计草案第二册。
[2] C. W. Wheeler, Proc. 8th Inter. Conf. on High Energy Accel. CERN 1971, p. 531; C. R. Emigh

- et al., Proc. 1970 Proton Linac Accel. Conf., V. II, p. 1007.
- [3] V. J. Kovarik and Th. J. M. Snyters, BNL-50120, p. 251.
- [4] C. R. Emigh, E. A. Meyer and D. W. Mueller, *IEEE*, NS16, No. 3(1969), 46.
- [5] C. R. Emigh, LA-3609, p. 398.

A HIGH GRADIENT 250keV PULSED PROTON BEAM ACCELERATING EQUIPMENT

THE DEPARTMENT OF PREINJECTOR*

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Up to 240 mA of pulsed proton beam has been extracted at 250 keV from an accelerating equipment with a high gradient "Pierce" accelerating tube. Normalized beam emittance is 0.36π cm-mrad (at 180 keV, 120 mA 100 μ s, 10pps). The design parameters and some preliminary test results of this equipment including a 250 kV C-W high voltage generator, an accelerating tube and a duoplasmatron are reported in this paper. This equipment is built for BPS preinjector study.

* Writing by Cong Zhi-bing.