第35卷 第7期　　物 理 学 报　　Vol. 35, No. 7
1986年7月　　ACTA PHYSICA SINICA　　July, 1986

X射线探测器的脉冲标定技术

孙 景 文
(西南流体物理研究所)

1985年8月9日收到

提　　要

利用强流电子束技术产生通量密度为 10^{18}—10^{19} X-ray photon/sr·s 的脉冲 CuKX 射线源，标定 PIN 型硅二极管半导体探测器对X光子的脉冲灵敏度. 用绝对X射线监测器——P 10气体脉冲电离室作为脉冲X射线通量密度的标准. 脉冲电荷自动测量仪由微处理机进行程序控制，并予以实时校准. 该电离室测量通量密度的精度为 ±5%，适用的能通量率范围可达 4×10^{-9}—2×10^{2} W/cm²，适用的光子能量范围为 1.5—10 keV，标定探测器的精度为 ±7.0%，并发现 PIN 型硅二极管的脉冲灵敏度比稳态X射线束标定的灵敏度高30%左右.

一、前　　言

精确地测定高温等离子体X射线的能谱与时间谱，对于高温等离子体的诊断是大为有益的. 有了高温等离子体所发射的X射线的准确的实验数据，又可用来检验计算过程中的计算机程序以及参数的选取是否合理，因此X射线测试早已作为高温等离子体诊断技术的重要组成部分. 高温等离子体X射线诊断的内容极为广泛，可以从它得到很多有用的信息，主要内容见表1.

表1　等离子体X射线诊断内容

测量种类	测量范围及内容
电子温度 T_e	10^2—10^4eV 连续谱、线谱强度
离子温度 T_i	10^2—10^4eV 谱线宽度 (Doppler 加宽)
电子密度 n_e	$n_e>10^{16}$cm^{-3}，谱线斯塔克加宽、双电子复合线强度
杂质	辐射损失，杂质离子分布及输运过程
等离子体位置	逃逸电子与 Tokamak 中限制器碰撞时发出的X射线
输运系数估计	X射线涨落测量
等离子体不稳定性的模式及内部磁力线分布	X射线涨落测量
原子物理参量	波长 λ、激发、电离与复合截面等主要谱线
辐射防护	X射线总剂量测量、超硬X射线测量等

但是，无论就热核聚变装置，还是激光聚变装置，或磁约束装置而言，在反应或运行期间都释放出大量的X射线，通量密度如此之高，以至于X射线现场实验中只能采用钝感的X射线探测器，即使如此仍可得到几安培的线电流输出. 然而在实验室中标定这种X射

线探测器过程中，由于国内缺乏低能X射线强源和脉冲X射线的剂量标准，即使采用先进的微弱信号检测手段——利用荧光X射线源与锁定放大技术也只能得到 10^{-14}—10^{-10} A 的信号电流．而在某些聚变试验中X射线探测器的输出电流为数安培，要把探测器的灵敏度线性外推 10—14 个数量级．所以这种在弱源下的直流标定，而在强度相差 10—14 个数量级的脉冲强源中使用，其可信程度令人怀疑[1]，因此我们在 1984 年实现的脉冲标定技术，不论是对惯性约束还是磁性约束装置的高温等离子体研究而言，都是相当重要的．许多实验物理工作者也同样期望有一个源强与实测对象相接近的X射线模拟源，以便对测试系统进行系统标定，而不是惯常使用的分解标定法．

为了实现脉冲标定技术，我们自行研制了一种充 P10 气体（90% Ar + 10% CH_4）的平行平板脉冲电离室作为脉冲X射线的绝对剂量标准，该电离室适用的能通量范围可达 4×10^{-9}—2×10^{2} W/cm^2，适用的光子能量范围为 1.5—10 keV．利用一种强流电子束技术产生低能脉冲X射线源，用这种半高宽为 55 ns，谱纯度为 85% 左右、通量密度为 10^{19} photon/sr · s 的脉冲X射线机的 CuK_α 特征辐射来标定离子注入式的 PIN 型硅二极管半导体探测器，用罗斯（Ross）平衡滤波片差分掉韧致辐射本底，发现探测器的脉冲灵敏度比直流标定的灵敏度高 30%，并可直接得出探测器的线性电流范围，而且脉冲电离室的记录系统采用 DJS-062 微型计算机控制，并可作系统灵敏度的实时标定与校准，脉冲电荷的测试精度可达 ±2%，记录方式有数字显示和打印机纸带记录两种．

二、实 验 装 置

脉冲低能X射线装置是由程念安同志设计的（如图 1 所示）．高压直流电源从 0—100 kV 连续可调，CYES × 100-0.06/5 型 Marx 发生器输出电容可在 0.012—0.3 μF 之间分级可调，输出电压可在 10—500 kV 之间调节．水介质脉冲形成线利用去离子水为介质，由三块平行的不锈钢板组成，电容在 11.5—40 nF 之间可调[3]．

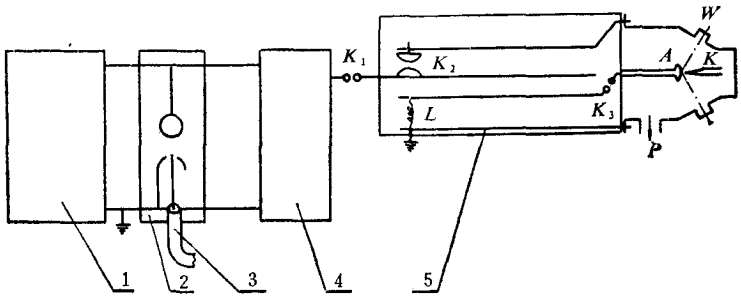


图 1　1 为正极性高压直流电源；2 为触发球隙；3 为触发电缆；4 为 Marx 发生器；5 为平行平板水介质脉冲形成线；A 为阳极；K 为阴极；W 为聚脂薄膜窗口；P 为接真空系统；K_1 为充电开关；K_2 为主开关；K_3 为预脉冲开关；L 为接地电感

对于薄靶而言，通过电子和靶的相互作用产生的韧致辐射其极大值在向前的方向上，而特征X射线发射是各向同性的，因此在与入射电子束方向成大的观测角（120°）方向上放置低能X射线探测器，对于整个探测器信号应使韧致辐射降至最小[2]．低能脉冲X射线

机具有四个探测窗口，均匀对称地布置在同一圆周上，探测孔轴线与X射线机阴-阳极轴线成 60° 角，探测孔用 10 μm 厚的聚脂薄膜作真空密封，距靶中心的距离为 15 cm，根据所需的特征辐射，可选用 Al，V，Ti，Zn，Ni，Cr，Fe，Co，Cu，Mo 和 Ag 等材料做阳极．为了避免散射电子打在探测器上，我们在探测器前面加了直径为 ϕ 15 mm 的 500 G 的偏转磁环．四个窗口输出的X射线通量基本相同．

在两个水平探测窗口处安装两个脉冲电离室，在上下两个窗口处安装被标定的探测器——PIN 型硅二极管半导体探测器，并分别用几乎完全平衡的罗斯滤波片（Cu 和 Fe）对脉冲X射线谱滤波，取出X射线谱中有用的特征 K X射线——CuK_α，通过差分滤掉连续的轫致辐射本底．关于罗斯滤波片的有关参数如表 2 所示．X射线探测器的脉冲标定

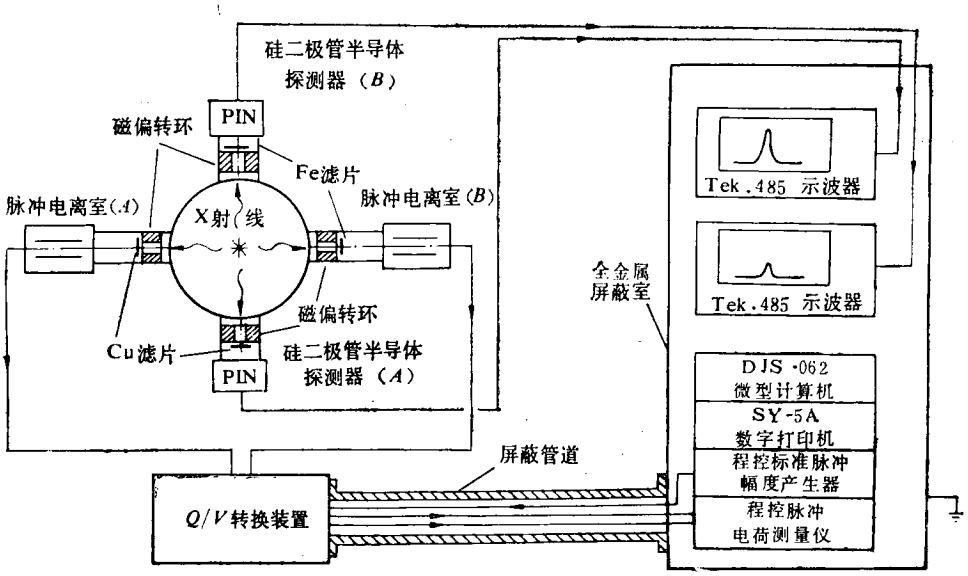
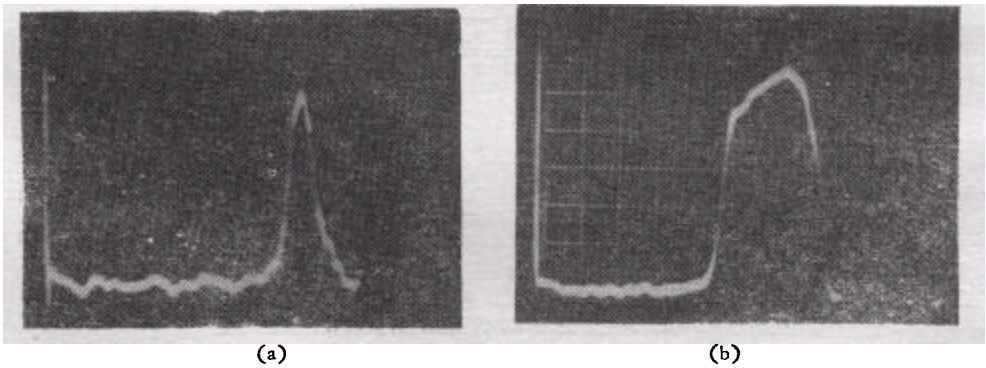


图 2



(a) (b)

图 3

(a) 为加 Cu 滤片的 PIN 型探测器的输出波形 示波器灵敏度为 10 V/格，扫描速度为 50 ns/格；
(b) 为加 Fe 滤片的 PIN 型探测器的输出波形 示波器灵敏度为 5 V/格，扫描速度为 50 ns/格

表 2　关于铜靶所用的罗斯滤波片的参数

靶（厚靶）	KX 射线能量 (keV)	透射滤片			吸收滤片		
		元素	mg/cm²	透过率(%)	元素	mg/cm²	透过率(%)
Cu	8.05	Cu	11.16	54.44	Fe	11.12	2.99

系统如图 2 所示．配有罗斯滤波片的两个 PIN 管的输出电压波形经衰减器(衰减 6 倍)分别由两台 Tektronix-485 型示波器记录，其X射线信号的电压波形如图 3 所示．脉冲电离室输出的脉冲电荷由脉冲电荷自动测量系统记录．

三、P 10 气体脉冲电离室——标准的绝对 X 射线探测器

为了进行X射线能通量的绝对测量，所选择的X射线探测器必须在所遇到的X射线能通量范围内的响应不取决于X射线能通量，并能测量罗斯滤片对确定的能区范围内所包含的能通量．因此我们选用充气电离室，其电荷响应由下式给出：

$$Q = \frac{E_a q}{W}, \tag{1}$$

式中 Q 为当计数气体被电离辐射照射时所产生的电荷；E_a 为在气体中所吸收的能量；W 为每产生一个离子对所需的平均能量；q 为以库仑为单位的电子电荷 (1.60×10^{-19}C)．

在图 4 中给出本实验中所采用的自行研制成功的平行平板脉冲电离室结构示意图．电极为两个抛光的黄铜平行平板，长 60 mm，宽 20 mm，间隔为 12.5 mm，电离室的黄铜壳体与一个电极板连接并加－700 V 的偏压，产生的电荷被收集在第二个极板上，为了有效地减少漏电流的影响，在第二个极板上采用了一个接地的聚四氟乙烯保护环．

电离室的前端用 25 mm 厚的铅光栏作辐射屏蔽，入射光于孔径为 $\phi 2$ (或 $\phi 4$) mm，用拉紧的 6μm 的聚乙烯 [$(CH_2)_n$] 膜密封，该膜对不同能量的X光子透过率如表 3 所示．

表 3　电离室聚乙烯窗口对不同能量X光子的透过率

X光子能量 (keV)	8.05 (CuK_α)	6.39 (FeK_α)	5.41 (CrK_α)	4.51 (TiK_α)	3.31 (KK_α)	2.62 (ClK_α)	1.49 (AlK_α)
透过率T_0(%)	99.69	99.57	99.02	98.24	97.12	94.12	64.76

在电离室中充有一个大气压的 P 10 气体 (90% Ar + 10% CH_4 的混合气体)并以 20 ml/min 的流动速率通过电离室，其流动速率用锥形气体节流阀调节控制，并由 LZB2 微型玻璃转子流量计监测，在测量前，电离室至少要用流动的 P 10 气体清洗 30min．

P 10 气体脉冲电离室对不同能量的X光子的响应 R 由下式给出：

$$R = \frac{qT_0(\varepsilon - f)}{\overline{W}}, \tag{2}$$

式中 q 为以库仑为单位的电子电荷 (1.60×10^{-19}C)；T_0 为电离室聚乙烯窗口的透过率；$\overline{W}$为在 P 10 气体中每产生一个离子对的平均能量，$\overline{W}$ = 26.2eV/离子对，该值是由 Milton

表 4 脉冲电离室对不同能量X光子的响应

X光子能量 (keV)	1.49 (AlK_α)	2.00	2.62 (ClK_α)	3.31 (KK_α)	3.69 (CaK_α)	4.51 (TiK_α)	5.41 (CrK_α)	6.39 (FeK_α)	8.05 (CuK_α)
光子灵敏度 R_0 ($\times 10^{-17}$C/photon)	0.571	1.03	1.35	1.90	2.12	2.61	3.10	3.42	3.31

等人对 P 10 气体得到的实测值[3]; ε 为在充有一个大气压的 P 10 气体、气体程长 $l = 7.0$ cm 的电离室中对不同X光子能量的吸收系数,即 $\varepsilon = 1 - e^{-\mu\rho l}$, ρ 为一个大气压的 P 10 气体在 20℃ 时的密度 ($\rho = 1.56 \times 10^{-3}$gm/cm^3), μ 值为质量吸收系数,可从 Henke 的测量值[4] 中查出或理论计算; f 为考虑到距理想的绝对电离室的偏差而引进的校正系数(见下述),对于 $E < 10$KeV, $f = 3.12\%$.

现将脉冲电离室对不同能量的X光子的响应值列于表 4, 并在图 5 中给出脉冲电离室的光子能量响应曲线.

电离室在不同气体压力 P 下的响应 R_P 由下式给出:

$$R_P = \frac{qT}{\overline{W}}[1 - \exp(-\mu x_P) - f], \quad (3)$$

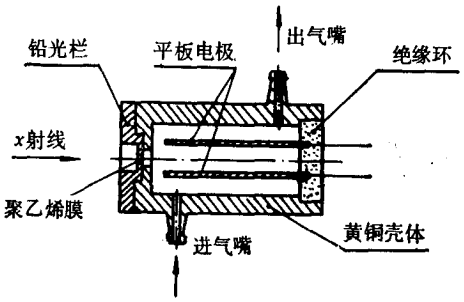


图 4 P 10 气体脉冲电离室结构示意图

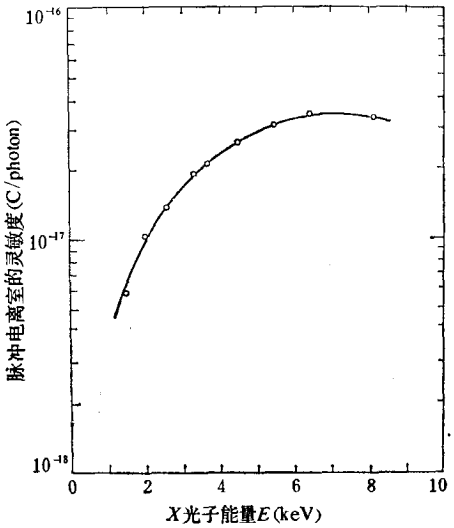


图 5 ○为实验测量值; ——为理论计算曲线

式中 q, T, μ, $\overline{W}$ 和 f 值的物理意义如 (2) 式所示, x_P 是以 gm/cm^2 表示的收集气体的有效厚度.

关于脉冲电离室的电荷响应,其理论响应与测量响应值的平均偏差小于 1%, 若考虑源的对称性偏差为 5%, 窗口透过率误差为 ±4%, 电离室的标定误差为 ±7%.

关于源的对称性,四个X射线窗口的能通量偏差,由许多次实验结果证实 $\Delta I/I < \pm 5\%$, 我们不仅用示波图形作了检验, 而且在两个电离室前用同样的光栏孔径和透过率相同的铜滤片,经记录系统进行差分,结果差分电荷等于零. 这说明源的对称性、平衡滤片的匹配和探测器的效率以及立体角的差别是很小的.

为了说明复合或空间电荷饱和效应的影响, 我们将电离室对源所张的立体角通过改变孔径变化 4 倍,引起有效电离体积的变化,结果未发现电荷响应的非线性输出, 在标定探测器的过程中,X射线通量密度变化一、两个数量级情况下, 而探测器灵敏度仍保持一致性,说明电离室并不存在复合与空间电荷饱和的影响.

关于脉冲电离室在不同的充气压力 P 下对 CuK_α 光子的响应如图 6 所示.

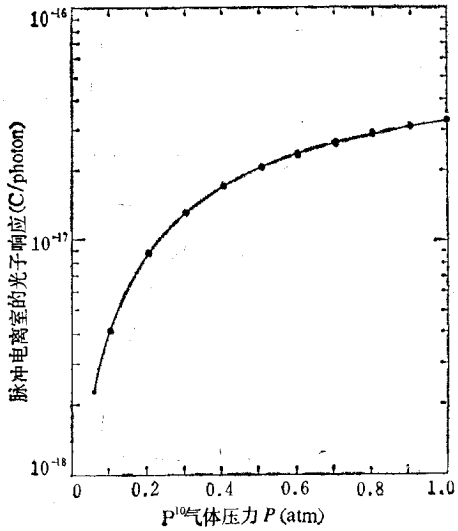


图 6

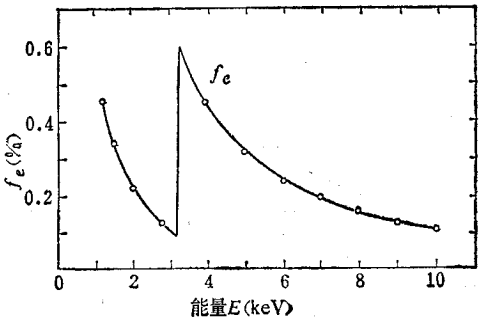


图 7

四、距理想的绝对电离室的偏差

偏离理想的绝对电离室的原因有如下几方面:

1. 窗口对 X 射线的吸收　本电离室采用质量厚度为 7.9044×10^{-4} gm/cm² 的聚乙烯膜作为窗口,对不同的 KX 射线的透过率如表 2 所示,通过测量值与理论计算值比较，在高能部分窗口透过率误差小于 1%，在低能 1.5 keV 处窗口透过率误差 $\Delta T/T = \pm4\%$.

2. X 射线通过 P 10 气体体积的透射　对于充有一个大气压的 P 10 气体、气体程长 $l = 7.0$ cm 的电离室，在气体体积内对于 CuK_α (8.04 keV)，TiK_α (4.51 keV) 和 AlK_α (1.49 keV) 光子与气体相互作用的几率 ε 分别为 0.7071，0.9969 和 1，其透射部分为 $(1-\varepsilon)$.

3. 从窗口进入气体体积中的 CK 荧光 X 射线　由于聚乙烯 $[(CH_2)_n]$ 窗口中碳 (C) 的荧光 X 射线产额 $\omega_K = 1.22\times10^{-3}$，那么由于 Al$K$ X 射线进入电离室的窗口引起碳的荧光 X 射线而产生的附加电流也小于 0.04%，因此可以忽略.

4. 来自气体体积中光电子能量逃逸损失　某些初级电子和俄歇电子将由气体体积中逃逸,虽然计算初级电子的能谱是困难的,但借助于 Bernstein 已测量的 Cl ($Z = 17$) 的光电效应[5],基本可以推得 Ar($Z = 18$) 的光电效应，将 Bernstein 值校正到 90° 收集值乘以 0.5，因为逃掉的电子能量必定介于零和入射 X 射线能量之间. 图 7 中给出气体体积中的快光电子 (f_e) 能量损失校正值.

5. 由于气体体积中的散射辐射的损失 (f_s)　通过两个分离的计算来估计由电离室散射辐射造成的能量损失 (f_s). 对于第一种计算，仅考虑背向散射 X 射线到达电离室的前表面. 并假定电离室是一个无穷大的平面;第二种计算考虑散射 X 射线到达板极的损失，

考虑两个无限大平面之间的一个点源，则背向散射到准直管平面的能通量的损失 f_s' 由下式简化给出：

$$f_s' = \frac{\sigma_{coh} + \sigma_{inc}}{\sigma_T}\left(\frac{2\pi}{\sigma_{coh}}\int_{\pi/2}^{\pi}\frac{\sin\theta}{1+\sec(\pi-\theta)}\sigma(\theta)\,d\theta\right), \tag{4}$$

式中 σ_{coh} 为总的相干散射截面；σ_{inc} 为总的非相干散射截面；$\sigma_T = \sigma_{coh} + \sigma_{inc} + \tau$；$\tau$ 为总的光电截面；θ 为全散射角；$\sigma(\theta) = d\sigma/d\Omega_{coh}$ 为相干微分散射截面，可用下式表示：

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{coh}} = \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2\frac{1+\cos^2\theta}{2}f^2\left(\frac{\sin(\theta/2)}{\lambda}\right), \tag{5}$$

式中 f 为散射因子，λ 为波长（Å）.

对于两个无限大平面之间的X射线束的途中散射损失为

$$f_s''(E) = \frac{\sigma_{coh} + \sigma_{inc}}{\sigma_T}\left(\frac{4}{\sigma_{coh}}\int_{\varphi=0}^{\pi/2}\int_0^{\pi}\sigma(\theta)\exp(-\mu d\csc\theta\cdot\sec\varphi)\sin\theta d\theta\, d\varphi\right). \tag{6}$$

此处 d 值为极间距的一半，φ 代表围绕束轴的方位角. 分别对 (4) 和 (6) 式进行数值积分. 对于 $E < 10\text{keV}$，$f_s' = 0.09\%$，则 $f_s = f_s' + 0.75f_s'' = 0.17\%$.

6. *来自气体体积中的 Ar 荧光 KX 射线损失 f_K* 关于 Ar 荧光 KX 射线的逃逸损失 f_K 的计算为

$$f_K = \frac{\omega_K}{E}\frac{\tau_K}{\tau}\frac{\tau}{\sigma_T}\mu\int_{z=0}^{L}e^{-\mu z}p(z)\,dz, \tag{7}$$

式中

$$P_z = \frac{1}{4\pi}\sum_{i=1}^{2}P_i E_{K,i}\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi}e^{-\mu(E_{K,i})l(\theta,\phi,z)}\sin\theta\, d\theta\, d\phi. \tag{8}$$

注意 $P(z) = P(L-Z)$，式中 μ 是能量为 E 的总线吸收系数，$\mu = N\sigma_T$；N 为单位体积中气体的原子数，$l(\theta,\phi,z)$ 代表在一定的 (θ,ϕ) 方位处对于气体中一个已知的深度 z 的气体程长，考虑两种 KX 射线的跃迁几率 P_i 和能量 E_i，通过简化近似估算可得到 $f_K \simeq 1.27\%$，在 $E = 8\text{keV}$ 处.

7. *透射的初始束影响 f_{BS}* 初始通量打到电离室的后底座板聚四氟乙烯 $[(C_2F_4)_n]$ 上可以向回散射进入气体体积之中，并可产生碳和氟的荧光辐射，但由于 $\omega_K^C = 1.22\times10^{-3}$，$\omega_K^F = 6.30\times10^{-3}$，其荧光效率很低，可忽略不计[6].

散射通量的上限可作为各向同性散射处理，由下式简单地得到

$$f_{BS} = [0.5(1-\ln 2)(\sigma_{coh}+\sigma_{inc})/\sigma_T](1-\varepsilon) \tag{9}$$

低于 10 keV，透射的初始束的影响为 1.46×10^{-2}.

五、关于进入电离室的实际能量 E_{en} 的校正

进入电离室的实际能量 E_{en} 为

$$E_{en} = \frac{Q\overline{W}}{qT(\varepsilon - f)}, \tag{10}$$

式中 $f = f_e + f_s + f_{BS} + f_K$，$\varepsilon = 1 - e^{-\mu t_c}$，$t_c$ 为气体体积程长 (7cm)；对于 $E < 10$ keV，$f = 3.12\%$；T 为聚乙烯窗口透过率；q 为电子电荷；$\overline{W}$ 为在 P 10 气体中每产生一

个离子对的平均能量，$\overline{W} = 26.2$ eV/离子对.

六、X 射线探测器系统的标定

在脉冲X射线源上标定探测器时，实验装置的布局如图 2 所示. 两个电离室和两个被标定的探测器同时分别安装在四个窗口上，并用两对罗斯滤片对分别装在电离室与探测器之前，探测器的脉冲响应 R_P 由下式给出:

$$R_P = \frac{\Delta q_D \cdot \Omega_M \cdot T^M_{\mathrm{Air}} \cdot T_{FM} \cdot R_M}{\Delta q_M \cdot \Omega_D \cdot T^D_{\mathrm{Air}} \cdot T_{FD}}, \tag{11}$$

式中 Δq_D 为两个探测器输出的积分电荷的差值；Ω_M，Ω_D 分别为电离室和探测器对源所张的立体角；T^M_{Air}，T^D_{Air} 分别为电离室和探测器到X射线窗口之间的空气对X射线的透射系数；Δq_M 为由两个脉冲电离室产生的电荷之差；R_M 为电离室对X光子的响应；T_{FM}，T_{FD} 分别为电离室和探测器的罗斯滤片对的透过率之差（$T_{FM} = T_{FD}$）.

我们用源强为 10^{19} photon/sr · s 的低能脉冲X射线装置的 Cu KX 射线辐照 PIN 型硅二极管半导体探测器，用 Tektronix-485 型示波器记录探测器输出的信号电压波形.

用自制的脉冲电离室测量脉冲X射线源的能通量率，产生的脉冲电荷由 II 型脉冲电荷自动测量系统记录，记录系统是由杨继荣、邓松碘、张玉芳和孙友华同志设计完成的，其系统方块图如图 8 所示.

当 Q/V 转换仪的测试端有电荷出现时，由其中的模拟计算器滤波、积分、比例、相减，零阶保持运算，除去本底干扰，把测得的电荷转换成相应的电平，然后送给模-数转换器（A/D），变成能被计算机处理的十位二进制数据. 计算机再命令标准电荷产生器产生标准比较电荷，对已测的未知电荷进行实时的数据校准，计算机根据系统建立的数学模型进行数据处理，给出数字显示，并送打印机记录. 测量电荷时，通过为一条专用差分通道扣除本底干扰，取出有用信号送模拟计算器处理，以提高测试精度. 该记录系统全部放在衰减 100 dB 的全屏蔽系统中，信号电缆径壁厚为 8 mm，直径为 ϕ 110 mm 的钢管送屏蔽室，因为闪光X射线机的 Marx 发生器系暴露在空气中，则放电过程中的电磁干扰会使计算机的逻辑状态受到破坏，因此系统应全屏蔽.

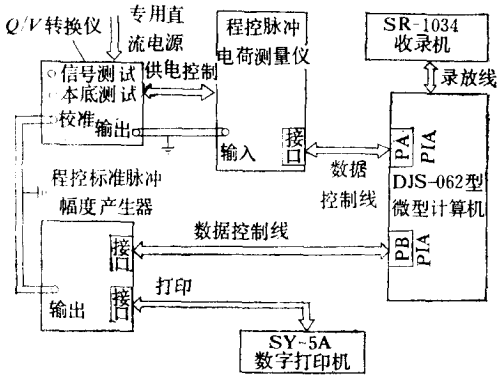


图 8　II 型脉冲电荷自动测量系统原理方块图

该系统的电荷测量精度 $\Delta Q/Q < \pm 2\%$，并可实时标定与校准，系统的操作由DJS-062 型微计算机进行程序控制，实现了数据处理自动化.

对于 PIN 型硅二极管半导体探测器而言，对探测器输出电荷的限制与输出电流的限制的机理完全不同. 实际上，当探测器在非线性区工作达到饱和时，其电流输出饱和，而电荷输出仍保持线性. 因为线性电流输出与所加的电场有关，这个电场要足够，以致不受

空间电荷的影响，而且以常速率把耗尽区产生的载流子扫出.

如果电场的下降足以改变收集电荷的速率，然而保留在耗尽区内的电荷后来仍能被收集，以至电荷不会被复合和俘获，电荷将被 100% 收集，因此输出电荷仍然是线性的.一般说来，当电荷收集时间$\left(取最大值\ t_h=\frac{D^2}{\mu E}=\frac{250\times10^{-4}}{500\times500}=4\times10^{-8}\text{s}，D\ 为半导体探测器耗尽层厚度，\mu\ 为载流子迁移率，E\ 为外加电场\right)$小于载流子复合寿命时，对 Si-PIN 而言，它的寿命为几微秒，就能保持电荷线性，输出脉冲宽度是探测器电荷收集时间的量度，在电荷收集时间为 1 μs 量级时，电荷是线性的[7]. 所以，尽管 PIN 探测器输出的电压波形偶尔有饱和现象，其电荷输出仍然是线性的，这点已为我们的实验所证实，因为不管饱和与否，求出的探测器灵敏度仍然是一致的，这可由表 5 给出的实验结果看出.

表 5 被标定的 PIN 探测器的脉冲灵敏度 R_P 值

实验编号	01	02	03	04	05	06	07	08	平均值与均方误差
探测器灵敏度 R_P ($\times10^{-16}$ C/photon)(CuK_α)	4.12	3.82	4.56	4.07	4.48	4.61	4.30	4.49	4.31±0.27

若取 $\Delta q_D/q_D\sim\pm5\%$，$\Delta q_M/q_M=\pm2\%$，$\Delta T/T\sim\pm4\%$，$\Delta R_M/R_M\sim\pm3\%$，则 $\Delta R_P/R_P\sim\pm7\%$.

七、结 论

这个脉冲宽度 $t_{FWHM}=55$ ns 的单能铜靶 KX 射线源测得的峰值强度为 10^{18}—10^{19} photon/sr · s. 我们选择合适的原子序数的材料作为脉冲二极管的阳极靶，那么 KX 射线源的能量是可变的，则能得到 1.5keV (AlK_α)—96.8 keV(UK_α) 的脉冲高强度的单能 KX 射线源是有把握的.

实验证明，自行研制的平行平板充气 (P 10) 脉冲电离室和罗斯滤片对，可以用来测量由脉冲X射线源(或直流X射线源)产生的 KX 射线通量密度，而且在X射线通量密度低于 10^{18} photon/sr · s 的情况下，这种绝对X射线探测器的光子响应在 1.5—10 keV 光子能量范围内与通量密度无关. 实践证明，该脉冲电离室作为 1.5—10 keV 的脉冲X射线的剂量标准是可行的. 对于 Cu 靶而言，脉冲电离室的实测灵敏度与理论灵敏度完全符合，偏差小于 0.5%，可见理论灵敏度的推导是正确的，校正因子 f 的计算是可信的.

实验又证明 PIN 型硅二极管的脉冲灵敏度 R_P 比直流标定的灵敏度 R_{DC} 高 30%，这可能由于在直流标定时，弱电荷泄漏的机会较多而引起的，可见脉冲灵敏度与直流灵敏度是不同的，开展探测器的脉冲标定是势在必行的，尤其是用于热核聚变与激光聚变或其它高温等离子体研究中的X射线探测器，若想精确测量高温等离子体的电子温度以及与X射线辐射输运有关的参数，探测器的脉冲标定工作是异常重要的，尤其是对探测系统做系统标定就更加有意义了.

本工作是在陶祖聪、关世法和谭显祥同志的大力支持下完成的. 周俸才同志曾与作者做了有益的

讨论．主要参加本工作的有岳正普和熊忠娥同志．

参　考　文　献

[1] S. Roth, *Rev. Sci. Instr.*, **49**(1978), 104.
[2] H. W. Koch, *et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, **31**(1959), 924.
[3] C. E. Milton, *et al.*, *Phys. Rev.*, **96**(1954), 643.
[4] B. L. Henke, *et al.*, *Advances in X-ray Analysis*, **13** (1970), 639.
[5] M. J. Bernstein, *et al.*, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **NS-26**(1979), 4978.
[6] C. E. Dick, *et al.*, *Phys. Rev.*, **A2**(1970), 580.
[7] Robert W. Kuckuck, Semiconductor Detectors for Use in the Current Mode, UCRL-51011.

PULSE CALIBRATION TECHNIQUE OF X-RAY DETECTOR

SUN JING-WEN
(Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu)

ABSTRACT

A pulsed CuK X-ray source with flux intensity 10^{18}—10^{19} K X-rays per sr per s has been produced using high current electron beam technique. It has been employed to calibrate the response of the silicon PIN diode detector to pulsed X-ray photon. An absolute X-ray monitor——P10 gas pulse ionization chamber has been used as a standard of the pulsed X-ray flux density. the automatic pulsed charge measuring instrument is controlled and Corrected in real time by a microcomputer. The measured uncertainty of the flux density is ±5%. This chamber is suitable for the range of energy flux rate 4×10^{-9}—2×10^{2} W/cm^2 and the range of photon energy 1.5—10 keV. The calibrated accuracy of the detector is ±7.0%. It is found that the pulsed sensitivity of the silicon PIN diode is about 30% higher than the sensitivity calibrated by a steady X-ray beams.