

小间隙高放大多丝室及其放电机制*

王继华 庄红林 李焕铁¹⁾ 李晓光 吕雨生
吴荣久 陈 昌 杨康树 唐孝威 童国梁

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1992年11月11日收到

摘 要

对以强猝灭气体工作的小间隙多丝室及其放电机制进行了研究,实验表明,因为工作在饱和模式区,这种室同时具有很高的气体放大和相当快的时间特性.文中探讨了放电机制,雪崩中空间电荷效应以及电离光子的产生和作用是重要的因素,而其中后一因素又受到强猝灭气体的抑制.

关键词 放电机制,多丝室,小间隙室,猝灭气体,饱和模式,自猝灭流光,空间电荷效应,电离光子.

在 高能粒子物理实验中,量能器起着越来越重要的作用,作为 L3 国际合作工作的一部分,进行了量能器的一种取样探测器,即小间隙高放大多丝室的研究和发展工作^[1,2].在这方面国外已有一些研究^[3-6]. 本文主要介绍我们的研究及结果.

1 室的结构和实验装置

实验用的小间隙多丝室的结构如图 1(a) 所示. 室的面积为 $16 \times 16 \text{cm}^2$, 有效面积为 $12 \times 12 \text{cm}^2$. 中间为阳极丝构成的平面. 上下两平板为复铜板(厚 1.5mm), 即 $50 \mu\text{m}$ 厚的铜层覆盖在环氧树脂玻璃钢平板上, 铜层用作阴极. 阳极丝为镀金钨丝, 直径 $50 \mu\text{m}$, 丝距 S 为 2mm, 阳极的两端固定在厚 1.5mm 的绝缘框的金属条上, 后者是用复铜板蚀刻制成. 丝的张力为 200g. 室体用阿拉第胶固封. 阳极丝平面和阴极平面间的距离 l 为 1.5mm. 室的间隙为 3.0mm. 先后共研制了 50 多个这样的室(A室), 用以装备实验用的电磁量能器原型模块以及室本身性能研究. 另外, 带场丝的小间隙多丝室(B室)的结构如图 1(b) 所示. 阳极丝和场丝交替安置, 相距 2mm, 丝直径分别为 50 和 $100 \mu\text{m}$. 室间隙与 A 室相同. 场丝和阴极保持接地. 测试用的室的阴极面上都开有薄窗, 以让 ^{55}Fe X 射线进入室内, 通过 $9 \text{M}\Omega$ 电阻将正高压加到阳极丝上. 从阳极信号丝引出的信号通过 1nF 高压电容, 送到测量线路. 室的输出负载电阻为 50Ω . 测量线路包括电荷灵敏放大

* 国家自然科学基金资助.

1) 本文执笔人.

器和多道脉冲幅度分析器, 还有前置放大器和线性成形放大器。主要测量输出脉冲幅度和电荷。用快示波器观测输出脉冲波形和时间特性, 室的工作气体主要为 CO_2 和 $n\text{-pentane}$ (分子式为 C_5H_{12}) 的混合气体。此外, 也用不同的气体进行了实验比较。同时, 对不同间隙和丝距的室作了对比研究。

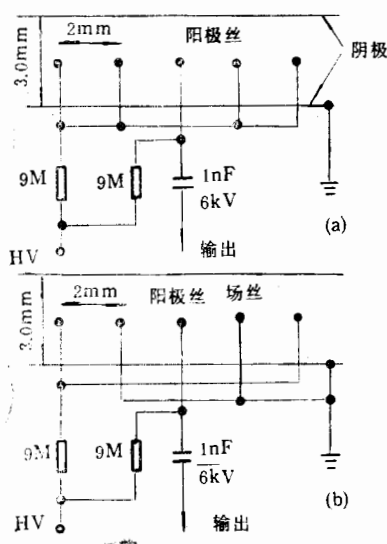


图1 室结构
(a) A室; (b) B室.

2 实验观察和结果

2.1 输出脉冲波形和时间特性

在 ^{59}Fe X射线入射, 高压 3.9kV 下观察到单信号丝的直接输出脉冲的上升时间 T_r 约 3.5ns, 底宽 T_d 小于 15ns, 幅度在 150mV 以上。并且, 从正比区直到饱和模式区很宽的高压范围内, 除了幅度变化外, 脉冲形状没有很明显的差异。另一方面用从离子运动推导得出的公式^[7]计算脉冲波形, 得到的 T_r 和 T_d 的结果和观察的一致。这意味着在很高电压的饱和模式下, 雪崩放电仍在阳极丝直接邻近区域发生。当整个室的所有 50 多根丝联在一起输出时, 观察的 T_r 和 T_d 分别增大到大约 6ns 和 35ns。在气体探测器中, 上述小间隙多丝室的输出脉冲上升时间是最快的, 而且有相当大的幅度。

当整个室的所有 50 多根丝联在一起输出时, 观察的 T_r 和 T_d 分别增大到大约 6ns 和 35ns。在气体探测器中, 上述小间隙多丝室的输出脉冲上升时间是最快的, 而且有相当大的幅度。

2.2 脉冲幅度分辨率

实验观察 ^{59}Fe X射线入射时室的输出脉冲幅度谱, 得到的不同高压下的幅度分辨率 R (FWHM/峰位置) 的结果表示在图 2 上。 R 的值在正比区最小, 在有限正比区的高端到饱和模式区约为 62%。这差异反映出不同电压区域室的放电机制有所不同, 饱和模式区更为复杂。此外, 饱和模式下 R 值随室的间隙大小改变不很大, 只是随间隙的增大稍许好一些。

2.3 探测效率

将室的阳极丝连接在一起作为输出, 室的上下安置面积约 $4 \times 4\text{cm}^2$ 的两个闪烁计数器, 用宇宙线 μ 子测量三重符合对上下二重符合计数比, 得到在高压 3.7kV 以上室对最小电离粒子的探测效率 η 约为 95%。

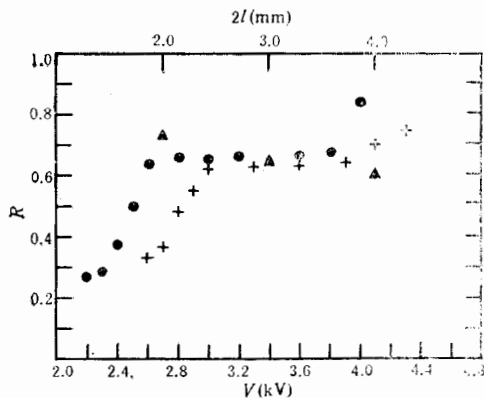


图2 不同高压下室的 ^{59}Fe 脉冲幅度分辨率 R
+ A室; ● B室; ▲ 间隙为 2, 3 和 4mm 的室在饱和模式区电压下的 R 。工作气体为 $\text{CO}_2 + n\text{-pentane}(18^\circ\text{C})$ 。

2.4 输出电荷和电压的关系

以 $\text{CO}_2 + n\text{-pentane}$ (20°C) 为工作气体, 测量不同电压下相应于 ^{55}Fe 脉冲幅度峰值位置的输出电荷值, 得到室的输出电荷对电压的实验关系曲线, 如图 3。这曲线具有明显的特征。在低电压的正比区范围, $\ln Q$ 随着 V 的增加以较大的斜率线性增长, 这是一般的特性。随着电压的继续升高, 增长明显地逐渐变慢, 它标志着空间电荷电场及其作用逐渐增大, 呈现有限正比区的特点, 可是在约 3.1kV 以上直到 4.3kV 左右, 不但室内不发生击穿放电, 而且 $\ln Q$ 随 V 以较前缓慢的斜率继续不断地近似线性增长。这种情况使得这种室的气体放大倍数可以达到相当高的水平 (10^6 — 10^7), 比一般的正比室要大将近两个量级。

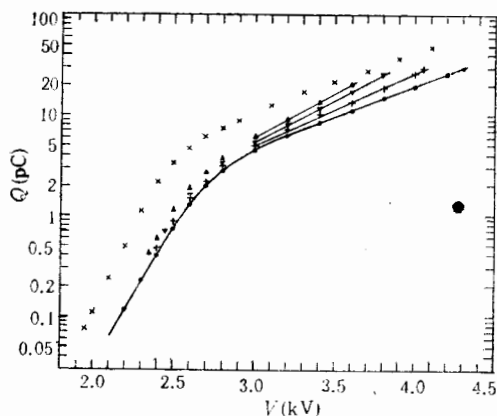


图 3 实验得到的输出电荷对高压的关系

A 室的数据: ● $T = 20^\circ\text{C}$; ▲ $+14.5^\circ\text{C}$; ▼ 9.8°C ;
▲ 0.1°C . B 室的数据: × 19°C

2.5 输出电荷与原电离的关系

实验测量 A 室对 ^{55}Fe X 射线和 ^{106}Ru 电子的输出脉冲高度比 R_d 随工作电压的变化, 如图 4 所示。在正比区范围 $R_d \approx 5.9$, 这相当于两者在室中的原初电离的比值。 R_d 随

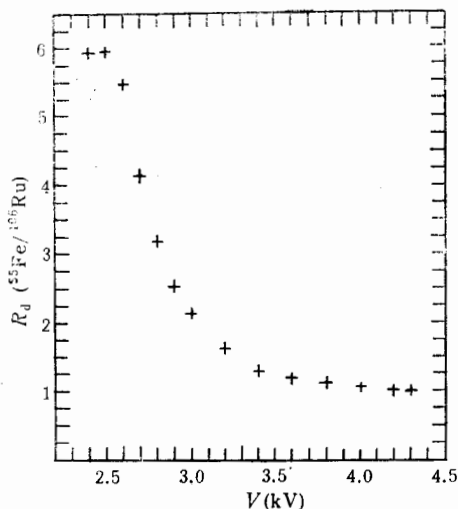


图 4 A 室对 ^{55}Fe X 射线和 ^{106}Ru 电子的输出脉冲高度比 R_d 随高压的改变

工作气体为 $\text{CO}_2 + n\text{-pentane}$ (20°C)。

电压继续升高而减小, 到约 4.2kV 时 R_d 等于 1, 此时室的输出电荷与原初电离无关, 进入室内的不同原初电离的粒子都产生同样幅度的脉冲。这就是一般所谓的饱和模式。实际上从大约 3.8kV 开始 R_d 就已接近 1, 即接近饱和模式, 在该区域, $\ln Q$ 随 V 近似线性继续增长, 直到放电击穿。在 4.3kV 室的输出电荷为 31pC , 此时室对 ^{55}Fe X 射线的气体放大倍数为 0.93×10^6 , 而对 ^{106}Ru 电子约为 0.56×10^7 。显然, 在饱和模式区不同原初电离的粒子有不同的气体放大。原初电离大的情况下气体放大过程中的空间电荷效应更大。

2.6 输出电荷随 n-pentane 液温或浓度的变化

将 n-pentane 液瓶置于控制温度的槽中, 测量 n-pentane 液温 T 为 20 、 14.5 、 9.8 和 0.1°C 下的 $\ln Q-V$ 关系, 数据均描在图 3

上。着重观察从有限正比区高端到饱和模式范围,可以看出,在不同 T 下都呈现出一明显的特征,即 $\ln Q$ 随 V 近似线性增长,我们将这范围称为特征近线性范围。而随着 T 的升高,该范围向着高电压区域延伸而变长,并且更趋平坦,同时击穿电压增大。例如 $T = 0.1^\circ\text{C}$ 时,该范围的长度约500V,变化也较陡,在3.65kV左右就开始击穿。当 T 增至 20°C 时,特征线性范围的长度增至1200V,变化也比较平坦,到4.35kV才开始击穿。值得注意的是,特征线性范围的起端都处于相当于流光跳变电压的位置附近。此外,在同样的

高压下, T 高时输出电荷要小些。实际上, T 的改变导致在 $\text{CO}_2 + \text{C}_3\text{H}_{12}$ 混合气体中 C_3H_{12} 浓度的变化。在 0.1°C 、 9.8°C 、 14.5°C 和 20°C 下 C_3H_{12} 的浓度分别大约为24%、37%、45%和56%。因为 C_3H_{12} 属强猝灭性气体,上述实验结果说明,室内混合气体中猝灭气体的浓度越大,则特征线性范围越长,越平坦,击穿电压也越高,反之亦然。对图3中的包括饱和和模式区的特征线性范围的实验数据进行分析 and 计算机拟合,可以得到如下的经验公式

$$\ln Q = \ln A + BV, \quad (1)$$

其中常数 A 和 B 的值随 T 的变化如图5。例如在 20°C 下 A 和 B 的值分别为

0.0649pC和1.43/kV。将饱和模式区的电压代入,可用公式(1)计算这种室在饱和模式下的输出电荷量。例如在 0.1°C 和 20°C 下电压分别取3.6和4.3kV,算得电荷值分别为20.6和30.4pC。

2.7 不同工作气体下室的响应

以纯 CO_2 、30%Ar + 70% CO_2 和80%Ar + 20% CO_2 分别作为工作气体,测量小间隙多丝室的输出电荷,实验数据曲线如图6。对于纯 CO_2 ,特征线性范围已变得很短,而且非常陡,其击穿电压在3.46kV附近,表现出 C_3H_{12} 浓度为零时的特点,而 CO_2 本身属弱猝灭性气体。对于Ar + CO_2 的两种不同比例的混合气体,则都在与流光跳变电压相当的位置附近发生击穿,根本不能出现上述特征线性区域。事实上,对于用

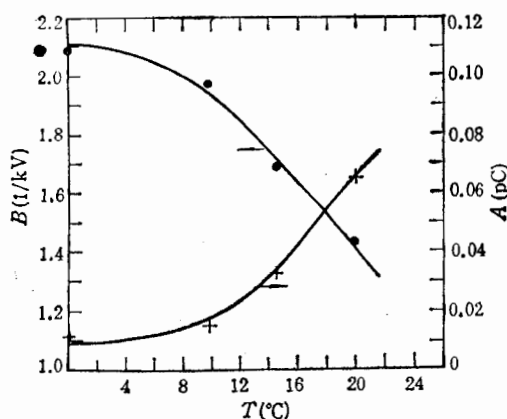


图5 经验公式(1)中常数 A 和 B 随n-pentane液温 T 的变化

+和●分别为 0.1°C 、 9.8°C 、 14.5°C 和 20°C 下 A 和 B 的实验值。

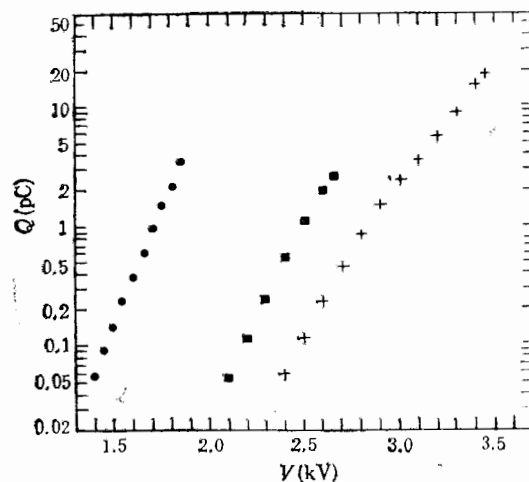


图6 以其它不同气体作为工作气体时A室的输出电荷随电压的变化

+纯 CO_2 ; ■30%Ar + 70% CO_2 ; ●80%Ar + 20% CO_2 .

⁵⁵FeX射线入射。

30% Ar + 70% CO₂ 的 B 室, 以准直很窄的 ⁵⁵FeX 射线入射, 实验观察到正常的自猝灭流光脉冲, 以及由于流光放电引起的击穿^[8]

2.8 不同间隙和丝距的室响应的比较

几种不同间隙(2*l*)和丝距 *S* 的室 I、II、III 和 IV, 都以 CO₂ + n-pentane (18°C) 为工作气体和 ⁵⁵FeX 射线入射, 测得一组输出脉冲幅度 *A* 对工作电压的曲线, 描在图 7 上. 这些曲线的变化趋势呈现同样的规律性. 只是随着间隙和丝距的增大, 曲线整个地往高电压区域移动, 都呈现非常明显的如前面所述的特征近线性范围和饱和模式区域. 可以清楚地看出, 几何大小的不同并未导致工作机制上的很大差异. 饱和模式和特征线性区域的出现主要决定于气体的特性.

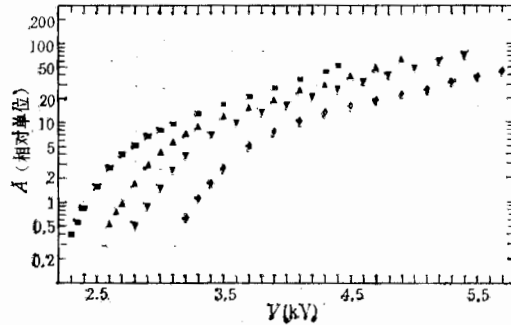


图 7 不同间隙和丝距的室响应的比较

■ I 室, 2*l* = 3, *S* = 2; ▲ II 室, 2*l* = 5, *S* = 3;
▼ III 室, 2*l* = 7, *S* = 4; ◆ IV 室, 2*l* = 10, *S* = 5
(单位皆为 mm).

3 室的放电机制

不同于正比模式^[9], 有关饱和模式的形成, 空间电荷效应和电离光子的放出起着重要的作用. 这是和自猝灭流光模式所具有的共同特点, 实质上其机制是自猝灭流光模式机制的一种特殊形态, 我们在研究 SQS 机制时, 曾经导出描述流光跳变的公式^[9], 即

$$Q_s = Q_p \cdot \frac{1}{1 - qI}, \quad (2)$$

其中

$$I = \int_{r_{cl}}^a \exp \left[\int_a^r \eta_0 E_t dr' \right] \cdot \mu \cdot \exp[-\mu(r - a)] dr. \quad (3)$$

这里 Q_p 为跳变前的原雪崩电荷; Q_s 为跳变后的流光电荷; q 为电离光子放出几率 γ 和光电子产生几率 ϵ 以及几何因子 g 的乘积, 即 $q = \gamma\epsilon g$; I 为凭借电离光子吸收几率的光电子气体放大的权重, 可由计算求出, 它随电压变化较小. qI 就是相应于原雪崩中每一电离的, 经历电离光子放出、光电子产生和气体放大过程所繁殖的次电子数. 由于气体原子或分子的吸收和辐射特性的不同, 不同气体的 q 值差异很大, 以致出现不同的工作模式. 现分析两个实例: 情况 I 为上述的 CO₂ + n-pentane(20°C) 和小间隙多丝室; 情况 II 为 30% Ar + 70% CO₂ 和圆柱形室 ($\phi 12.4\text{mm}$)^[8]. 利用情况 I 和 II 输出电荷的实验数据, 由公式(2)推得 q 和 qI 随电压的变化, 如图 8. 单原子气体 Ar 相对三原子气体 CO₂ 来说, 复合和激发态辐射电离光子的几率 γ 大; 而作为强猝灭气体的多原子气体 C₅H₁₂ 同 CO₂ 相比较, 吸收电离光子后产生分解或以其它方式释放能量的可能性大很多, 亦即 ϵ 小很多. 这样, 情况 I 的 q 值要比情况 II 小很多. 分析具体的物理过程, 当电压升至相应

于跳变电压 V_T 的位置附近时, 空间电荷量已足够大, 在原雪崩放电中空间电荷和激发

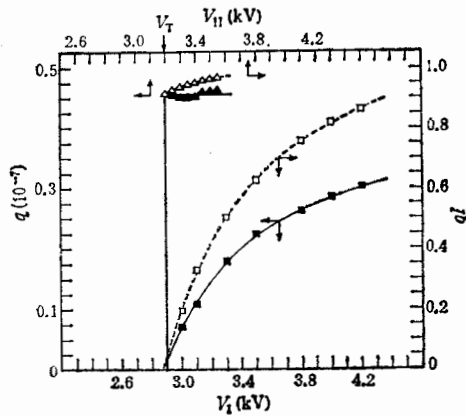


图8 由公式(2)得出的两例情况的 q 和 ql 随 V 的变化

■、□情况 I; ▲、△情况 II.

区域也随之扩展, 其中的电子速度也变慢, 因而放出的电离光子数增加, 亦即 q 值增大, 以此产生更多的次电子, 使得输出电荷继续随电压增加, 从而出现如公式(1)所表征的特征线性区域, 最后形成饱和模式。气体的猝灭性能越强, 这一特性表现得更加突出。

态原子 A^* 密集区域中, 由于复合以及激发态原子间的相互作用导致电离光子的放出。情况 II 的原雪崩中有足够多的电离光子放出, 并且通过光电效应和气体放大过程产生大量的次电子、 A^* 和 A^+ 。 q 值由零骤增, ql 值骤增至 0.9 以上。这样一来, 强空间电荷电场能够迅速地朝阴极推进, 同时相继的次级雪崩放电朝阴极方向发展, 形成 SQS。情况 I 则不同, 原雪崩中只有少量的电离光子放出, 并且产生的次电子数很少, q 值很小, $ql < 0.1$, 不能朝阴极进一步发展次级雪崩, 放电停止在原雪崩及附近区域。但是随着电压继续升高, 由于原雪崩范围向外延伸以及空间电荷效应加剧, 空间电荷和激发态密集

毛裕芳同志在室的制作方面对本工作作出了贡献, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Hofer et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A309** (1991) 422.
- [2] 量能器组, 核电子学与探测技术12(1992)172, 陈昌等, 第五次全国核电子学与核探测器学术会议论文集, 上册, 1990年8月.
- [3] S. Majewski et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **217**(1983) 265.
- [4] G. Bella et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A252** (1986) 503; 511.
- [5] G. Mikenberg, *Nucl. Instr. Meth.*, **A265** (1988) 223.
- [6] C. Beard et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A286** (1990) 117.
- [7] 于群, 原子核物理实验方法, 人民教育出版社, (1961)第52页.
- [8] 李焕铁, 高能物理与核物理**17**(1993)8.
- [9] 李焕铁, 高能物理与核物理**13**(1989), 577.

The Thin Multiwire Chamber Operating in High Gain Mode and Its Discharge Mechanism

Chen Chang Li Huantie Li Xiaoguang Lü Yusheng Tang Xiaowei Tong Guoliang
Wang Jihua Wu Rongju Yang Kangshu Zhuang Honglin
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

Received on November 11, 1992

Abstract

The research results of a thin multiwire chamber operating with strongly quenching gas and its discharge mechanism are presented in this paper. It is indicated by experiments that high gas gain and fast time response could be achieved simultaneously because of operating in the saturated mode. The effect of space charges and the emergence and action of ionizing photons are essential factors in its discharge mechanism, but the latter factor is restrained by the strongly quenching gas.

Key Words Discharge mechanism, Multiwire chamber, Thin gap gas chamber, Effect of space charge, Ionizing photon, Quenching gas, A saturated mode, Self quenching streamer.