

多级雪崩室性能研究

朱永生 张润华 赵平德 徐芷菁 李晓光 张志杰

(中国科学院高能物理研究所)

许咨宗

(中国科学技术大学)

摘 要

我们制作了一个有效探测面积 $9 \times 9 \text{ cm}^2$ 的小型多级雪崩室。利用一个简单的气体混合系统获得该室所需要的氩-丙酮混合气体,混合比可用调节气体流量的方法加以控制。在丙酮浓度 2.7% 的条件下,利用 ^{55}Fe 5.9 keV X 射线研究室的性能,并测量了丙酮浓度对室性能的效应。

一、引 言

1978 年以来, Charpak^[1-4] 发展了称为多级雪崩室的新型气体探测器。如所周知,多丝正比室中雪崩的产生主要由于带电粒子对室内气体分子的电离以及次级电子的电离增殖。而多级雪崩室则与此不同,带电粒子与气体分子发生非弹性碰撞后,气体分子处于激发态,它的退激光子对雪崩过程起重要作用。这种室可以用来测定带电粒子、低能 X 射线的位置,具有与多丝正比室可以相比的能量、位置和时间分辨本领。它的突出优点之一是对远紫外光子有较高的光电转换效率,而且室的气体放大系数有可能达到 $\geq 10^6$, 所以可作单个紫外光子的位置测定。这一特点使多级雪崩室可用来测量切仑科夫辐射的环象^[5-7]。此外,多级雪崩室内电子在两个区域中发生两级电子增殖过程,如果只选择感兴趣的粒子事例作第二级气体放大而排除掉不需要的粒子事例,就可以克服气体正比计数器内正离子空间电荷对计数率造成的限制。这一点在多级雪崩室中可以做到,使它可能工作于比多丝正比室更高的粒子流强^[4]。

我们设计、制作了一个小型多级雪崩室,通过它的性能测试,积累了必要的经验和数据,并观测到一些有趣的现象。

二、室的结构

室的有效探测面积是 $9 \times 9 \text{ cm}^2$, 室结构示意图见图 1。它由六层平行的电极丝平面构成。末三层丝平面组成通常的多丝正比室,其余的丝平面则构成转换区(图中标以 C)、

预放大区 (PA) 和漂移区 T。所有的丝平面都由间距相等的平行镀金钨丝构成。除多丝室阳极丝直径为 20μ 之外,其余丝面的丝直径均为 100μ 。丝平面 5 的平行丝之间距离 2 mm, 丝面 3 的丝距 0.5mm, 其余各面为 1mm。各极面的镀金钨丝加以一定的张力后焊在敷铜 G-10 板上。多丝室阳极丝的张力为 20 克, 其余均为 100 克。丝距的误差 $\sim \pm 0.05$ mm。各极间用有机玻璃框架保持一定的极间距离并互相电绝缘, 极间距离已在图中标明。整个室上下用两块厚 1cm 的铁框和螺栓紧紧夹住, 使极间距离的平均精度达到约 0.1 mm。室上下两面由 100μ 涤纶薄膜密封, 侧面四周涂上封蜡, 整个室保持气密。室的供气采用流气式。多丝室阳极丝通过电阻接地, 其余电极处于负高压, 在正常工作状态下,

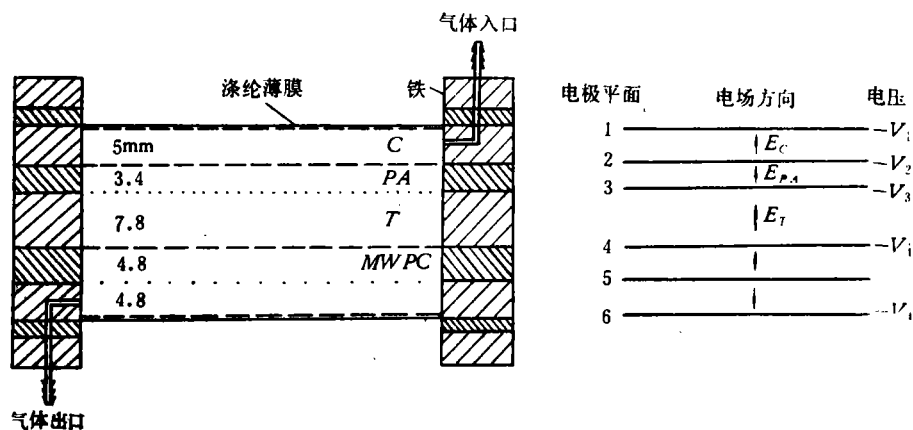


图 1 多级雪崩室结构示意图

C——转换区; PA——预放大区; T——漂移区; MWPC——多丝正比室

绝对值 $V_1 > V_2 > V_3 > V_4$, 其数值是这样选定的: 转换区和漂移区的电场 E_C 和 E_T 很低, 初电离电子和次级电子在其中基本上只是漂移而不发生明显的电子增殖。预放大区的平行电场 E_{PA} 足够强, 能发生电子的雪崩。 V_4 的值则与通常多丝室的工作电压选择一致。

三、气体混合装置

多级雪崩室需要的工作气体含两种成分, 惰性气体和光电阈较低的有机蒸汽如苯、丙酮、酒精、三乙胺等, 后者的含量较少, 一般为百分之几。我们使用氙-丙酮混合气。气体混合装置如图 2 所示。纯度 99.99% 的钢瓶氙气经过减压阀和稳压阀后, 压力维持在 0.2 bar 左右。在充填硅胶和 5 \AA 分子筛的干燥器中除去残存的水份, 氙气分 A, B 两路进入混气室。混气室浸没在恒温水浴内, 其温度保持恒定值 T_c 。A 路氙气从混气室底部的液态丙酮中鼓泡, 在区域 K 内获得氙和丙酮的混合气体, 其中丙酮浓度等于温度 T_c 下丙酮饱和蒸汽压 P_s 和室内总压力 P 的比值。在区域 M 内由于 B 路氙气的冲稀, 丙酮浓度降低。控制温度 T_c 以及 A, B 两路的气体流量, 容易获得所要求的丙酮浓度。我们的测量中, T_c 保持在 0°C , 氙气流量用微量转子流量计测定。混合气体总流量维持在 30—40

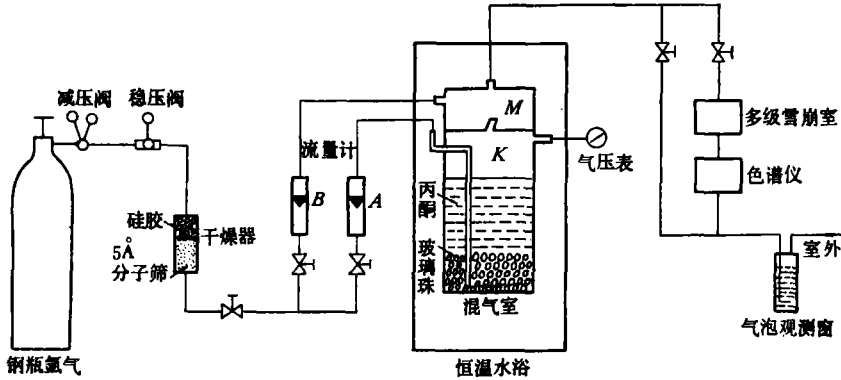


图2 气体混合装置结构、流程图

ml/min, 丙酮含量用 SP-2305E 色谱仪精确地测定。测量表明, 利用我们的气体混合装置, 丙酮浓度的稳定性好于 1%。

四、工作原理和测量结果

所有的测量都利用 ^{55}Fe 5.9keV X 射线源, 流强约 5 毫居。源放在室的转换区前方, X 射线通过厚 1cm, 面积 $0.2 \times 10\text{mm}^2$ 的长方形准直器射向室。多级雪崩室的输出脉冲信号从末级多丝室阳极取出。测量所用的电子仪器安排如图 3。利用校正电容和脉冲产生器可测量末级多丝室输出的脉冲电荷 Q 。根据电离功 $W^{[1]}$ 值, 可求得 5.9keV X 射线在室

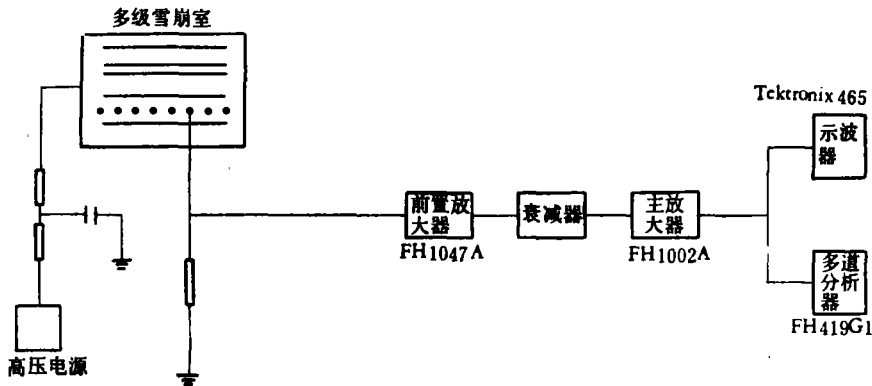


图3 测量电子仪器方框图

中产生的初始电离电荷值 Q_0 。 Q/Q_0 比值即为气体放大系数 M 。所用的电荷灵敏前置放大器的灵敏度经测定为 1.7×10^{12} 伏特/库仑, 主放大器放大倍数从 8 分档增加到 512。微分时间 $0.8\mu\text{s}$, 积分时间 $0.4\mu\text{s}$ 。校正电容为 0.78PF 。

5.9keV X 射线射入室内, 在各个区域都有一定的几率转换为光电子, 由于 5.9keV 电子在 1atm 氩气中的射程仅 0.3mm, 可以认为光电子一经产生便立即损耗全部能量, 在氩气中产生平均 $N_0 = 227$ 对初始电子-正离子¹⁾。假如 X 射线的光电转换在漂移区发生, N_0

1) 带电粒子穿过气体介质时, 发生初始电离碰撞, 即使没有外加电场, 其中一部分初电离电子的动能高于介质电离位, 因而进一步产生次级电子-离子对。这两项贡献之和称为总电离。我们这里所说的初始电子-正离子对, 指的是总电离产生的电子-离子对数。

个初始电子向末级多丝室漂移,并在阳极丝附近发生电离雪崩,这与光电转换发生在多丝室区域得到的输出脉冲分布几乎一样,所测到的脉冲幅度谱与通常的 ^{55}Fe X 射线谱完全一致,可以看到特征的全吸收峰 (5.9keV) 和在氩中的逃逸峰 (3keV),两者幅度比约为 2:1. 这种信号称为直接电离信号,气体放大系数定义为末级多丝室放大系数 M_{PC} . 但如果 X 射线的光电转换发生在转换区 C, 情况就完全不同. N_0 个初始电子首先转移到预放大区,那里的平行电场 E_{PA} 足够强,电子在电场作用下加速获得能量,以很大几率与氩分子发生非弹性碰撞使后者激发,氩退激时发射的光子的能量主要部分在 $9.7 \pm 0.7\text{eV}$ 范围内,而丙酮的光电阈能为 $9.7\text{eV}^{[1]}$,所以退激光子以一定的几率被丙酮吸收并发射次级光电子,这样电子就由一个增加到两个. 这两个电子以同样方式倍增到四个. 此种过程继续下去,在预放大区发生由光子作中介的光电雪崩过程,称为预放大,预放大系数定义为 M_{PA} . 经过预放大之后, N_0 个初始电子变成总数 $N_0 \cdot M_{PA}$ 个电子,其中一部分被电极 3 吸收,其余部分则经过漂移区 T 到达多丝室,后者的数量为 $N_0 \cdot M_E$, M_E 定义为有效预放大系数, M_E/M_{PA} 定义为电极 3 的电子透明度. $N_0 \cdot M_E$ 个电子在阳极丝附近由于第二级雪崩形成 $M_E \cdot M_{PC} \cdot N_0$ 个电子-离子对,它们导致多级雪崩室的真正输出信号,称为预放大信号,总的气体放大系数 $M_T = M_E \cdot M_{PC}$. 显而易见,有效预放大系数 M_E 可由预放大信号和直接电离信号幅度之比求得. 仅当 E_{PA} 达到一定的阈值, M_E 才大于 1. 阈值随混合气体的种类、浓度而不同,对氩-丙酮混合气,阈值约为 6kV/cm .

在预放大区发生 X 射线的光电转换时,情况比较复杂,初始电子的预放大系数 M_{PA} 随它在 PA 区中的位置而不同,所以在阳极丝产生幅度连续分布的输出脉冲,这一效应使预放大信号的脉冲幅度分布变宽.

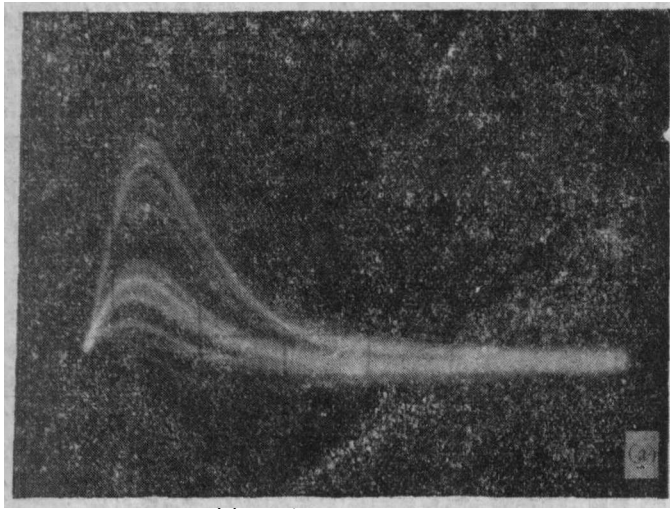
图 4 是观测到的多级雪崩室的输出脉冲和脉冲幅度谱. 图 4(a) 中幅度较大的是预放大信号的 5.9keV 全吸收峰脉冲. 在图 4(b) 的脉冲幅度谱上可清楚地分辨开直接电离信号和预放大信号各自的 ^{55}Fe 5.9keV 特征谱形,全吸收峰和逃逸峰的幅度比为 2. 这是在预放大区电场 E_{PA} 超过阈值不多的条件下取得的数据,有效预放大系数 $M_E = 4$. 随着 E_{PA} 的升高,预放大信号幅度升高,而直接电离信号保持不变. 这一现象证明,确实发生了两次雪崩的物理过程.

1. 末级多丝室放大系数 M_{PC} 和 ^{55}Fe 脉冲幅度谱

我们测量了多丝室在不同电压 V_4 下的脉冲幅度谱,以确定其放大系数 M_{PC} 和适当的工作电压. 测量结果见图 5. 测定时的丙酮浓度是 $\alpha = 2.7\%$. 在 $V_4 < 1.85\text{kV}$ 范围内, $\lg M_{PC} - V_4$ 的标绘是直线,能量分辨大体在 21% 左右,与通常多丝正比室的能量分辨相近, ^{55}Fe 脉冲幅度谱上全吸收峰和氩逃逸峰道数之比为 2:1. 当 $V_4 > 1.85\text{kV}$, $\lg M_{PC} - V_4$ 偏离直线,全吸收峰加宽,能量分辨变差,逃逸峰向全吸收峰靠近. $V_4 = 2\text{kV}$ 时,逃逸峰完全消失. 这些现象表明末级多丝室已进入有限正比区^[1],对应的极限放大系数 $M_{PC} \approx 10^4$,与 Charpak 的估计一致^[2].

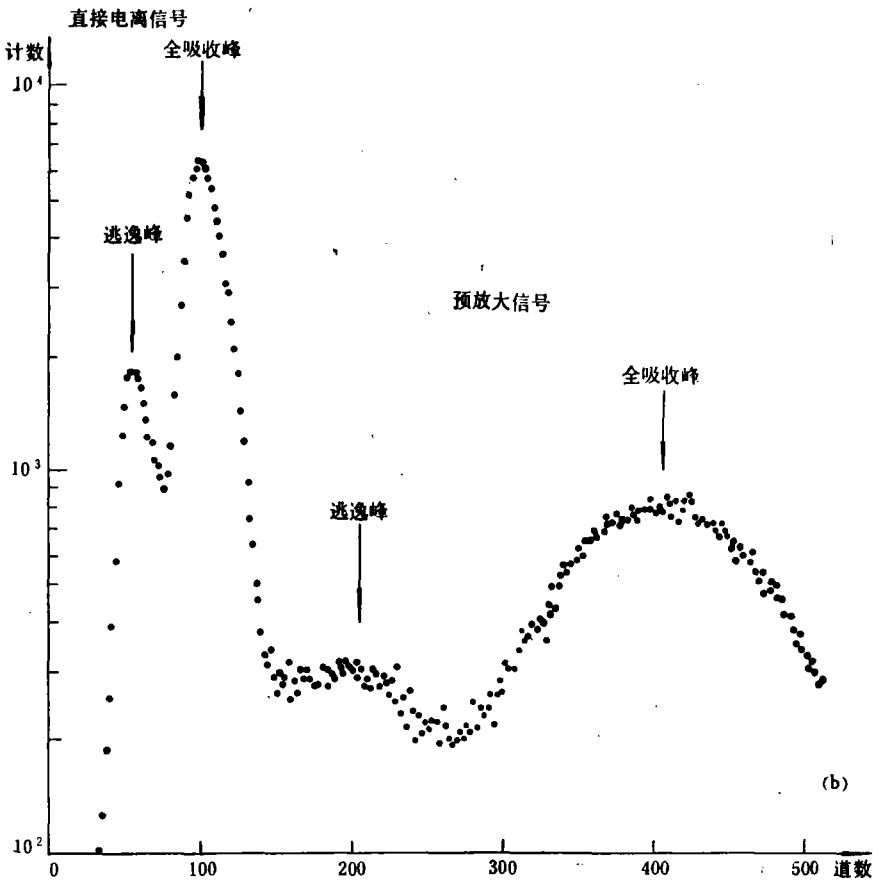
2. 电子从 C 区向 PA 区的转移效率

带电粒子或低能 X 射线在转换区 C 产生的初始电子能否漂移到预放大区 PA 去,取决于转换区电场 E_C 的方向和绝对值大小. 可以想象,如果 $V_1 - V_2 < 0$ (即 E_C 为负值),转换区电场与其它区域电场方向相反,初始电子有可能由于受反向作用力因而转移不到



(a) 示波器上的脉冲形状

$\alpha = 2.7\%$; $V_1 = 4.9\text{kV}$; $V_2 = 4.7\text{kV}$; $V_3 = 2.38\text{kV}$; $V_4 = 1.6\text{kV}$



(b) 多道分析器上的脉冲幅度谱

$\alpha = 2.7\%$; $V_1 = 5.03\text{kV}$; $V_2 = 4.83\text{kV}$; $V_3 = 2.43\text{kV}$; $V_4 = 1.62\text{kV}$

图4 ^{55}Fe 5.9keV X射线照射多级雪崩室得到的直接电离信号和预放大信号

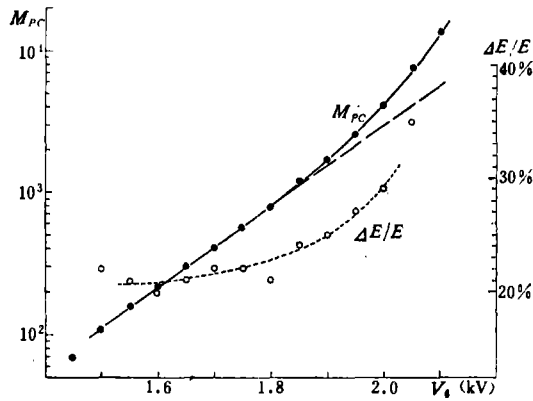


图 5 末级多丝正比室的放大系数和能量分辨 $\alpha = 2.7\%$

PA 区,末级多丝室上就记录不到预放大信号。

5.9keV X 射线量子在转换区发生光电转换并产生 227 个初始电子,在三种预放大区电场 E_{PA} 值下,这些电子向预放区的转移效率 R_C 的测量结果见图 6(a)。其中 $E_{PA} = 6.8$ kV/cm 接近刚出现预放大效应的阈值。当 $E_C = -0.8$ kV/cm 时, R_C 为 0。随着 E_C 的增大, R_C 在某一区域陡然上升。在 $E_C \sim 0.3$ kV/cm 附近 R_C 接近于 1。图 6(a) 所示的结果有些特点很注目: (i) 当 $0 > E_C > -0.2$ kV/cm 时,初始电子已经受到反向作用力,但 R_C 值仍接近于 1; (ii) R_C 由 0 陡然上升时的 E_C 值与预放大区电场 E_{PA} 的值有关。造成这些现象的原因有待进一步研究。

当 $E_C > 0$, C 区的电场方向与 PA 区一致,初始电子在转换区内从电场获得能量从

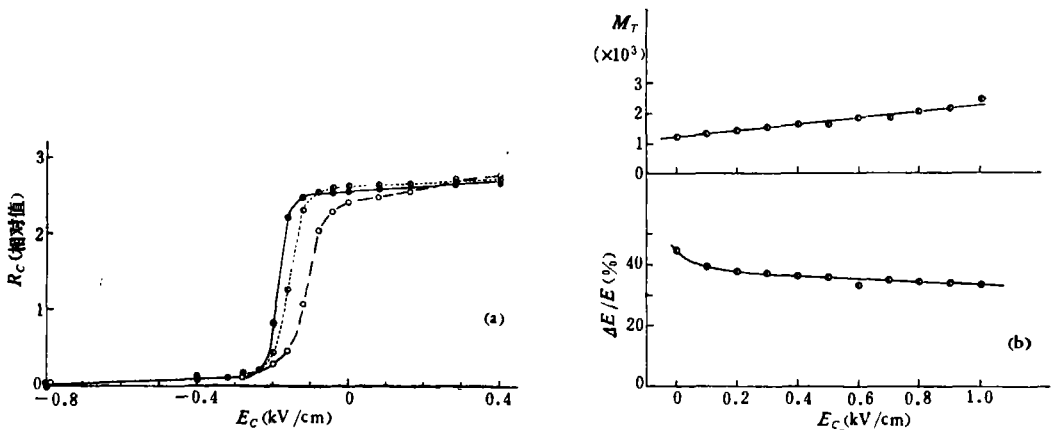


图 6

(a) 初始电子从 C 区向 PA 区的转移效率 R_C 随 E_C 的变化曲线
 $\alpha = 2.7\%$; $V_4 = 1.65$ kV; $E_T = 1$ kV/cm; $E_{PA} = 6.8$ kV/cm —○—
 7.2 kV/cm —○— 7.6 kV/cm —●—

(b) 放大系数 M_T 和能量分辨 $\Delta E/E$ 随 E_C 的变化曲线
 $\alpha = 2.7\%$; $V_4 = 1.5$ kV; $E_T = 1$ kV/cm; $E_{PA} = 7$ kV/cm

而可能产生一定数量的附加次级电子。 E_C 值越大,初始电子获得的能量越大,产生的附加次级电子数目越多。因此观测到随着 E_C 的升高、预放大信号幅度增大的现象,而且

能量分辨也略有改善(见图 6(b)).

当用多级雪崩室测量单个紫外光子时,在转换区 C 发生光电转换后仅有一个光电子,此时 R_C 与紫外光子探测效率成正比. 因此选择较高的 E_C 值以保证 R_C 接近于 1 是重要的.

3. 电子从 T 向 $MWPC$ 的转移效率 R_T

在预放大区雪崩中形成的电子团能否转移到末级多丝室,这一转移效率 R_T 与漂移区电场 E_T 有关. 测得的结果见图 7(a). $E_T = 0$ 时, R_T 为 0, 末级多丝室上记录不到预放大信号. 随着 E_T 的升高, R_T 迅速上升,大体上在 $E_T > 0.4 \text{ kV/cm}$ 的区域 R_T 到达坪区并接近于 1. 这些行为与 R_C 十分相象. 但由于漂移区内转移的电子数量很多(至少为转换区内的 M_E 倍),所以不太大的转移效率就可以保证室对粒子有 100% 的探测效率,这一点与 R_C 对探测效率有明显影响颇为不同. 随着 E_T 的升高,能量分辨基本不变,但预放大信号幅度增大.(参见图 7(b) 和 (c)). 幅度升高的原因是,在我们的测量中 E_{PA} 保持不变, E_T 的升高使电极 3 的电子透明度增大,从而使有效放大系数 M_E 增大. 但如果这是使预放大信号幅度随 E_T 升高而增大的唯一原因,由于电子透明度近似等于 E_T/E_{PA} ,那末 M_T/E_T 应该是常数. 实际情况是 M_T/E_T 仍随 E_T 而上升. 因此使 M_T 增大还有第二个原因,即在漂移区 T 电子不仅仅是漂移,而且还在电场力的作用下产生一定数量的次级电子.

我们的测量结果表明,电子在转换区 C 和漂移区 T 产生一定数量的附加次级电子. 这对流行的说法(在 C 和 T 区电子仅是漂移)是一个有意义的修正.

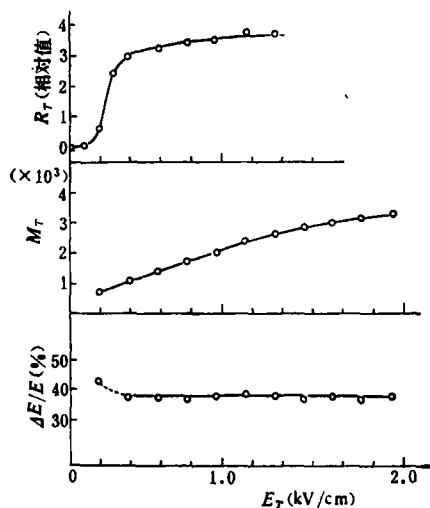


图 7 电子转移效率 R_T , 放大系数 M_T ; 能量分辨 $\Delta E/E$ 随漂移区电场 E_T 的变化曲线

$$\alpha = 2.7\%; E_C = 0.4 \text{ kV/cm}; \\ E_{PA} = 7 \text{ kV/cm}; V_4 = 1.65 \text{ kV}$$

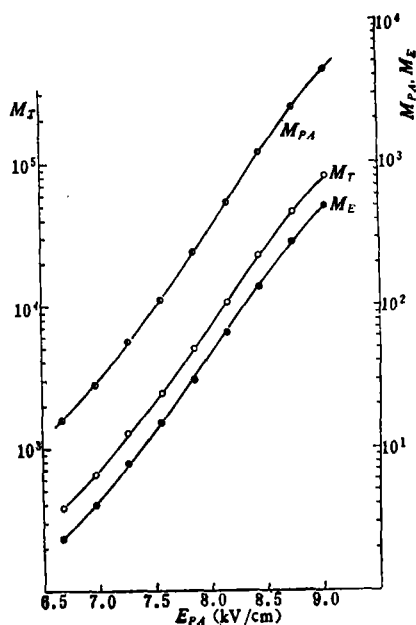
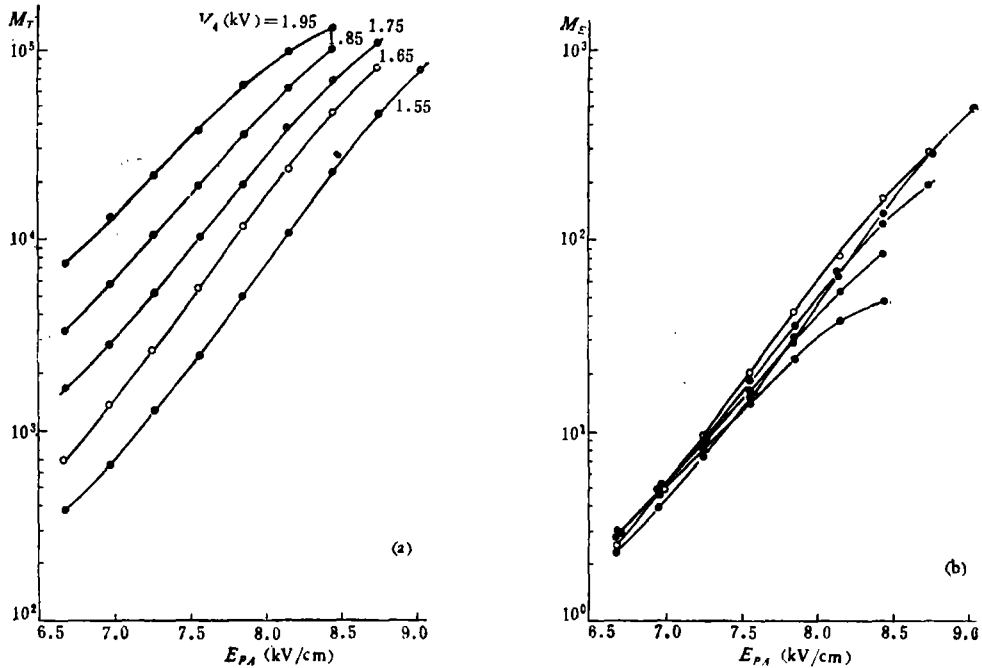


图 8 放大系数 M_T, M_{PA}, M_E 随 E_{PA} 的变化曲线

$$\alpha = 2.7\%; V_4 = 1.55 \text{ kV}; \\ E_C = 0.4 \text{ kV/cm}; E_T = 1 \text{ kV/cm}$$

4. 室的放大系数 M_T , M_{PA} 和 M_E

测量预放大信号 5.9 keV 全吸收峰的脉冲幅度可以推算出多级雪崩室的总放大系数 M_T , 预放大信号与直接电离信号全吸收峰的幅度比即为有效预放大系数 M_E . 表征预放大区电子增殖能力的则是预放大系数 M_{PA} . 按照 Charpak 的测量结果^[5], 当 $E_T/E_{PA} < 0.3$ 时, 电极 3 的电子透明度等于 E_T/E_{PA} . 在我们的测量中, 满足这一条件, 据此容易求得 M_{PA} 值.



(a) M_T-E_{PA} 曲线

(b) M_E-E_{PA} 曲线

图 9 不同 V_4 值下, 放大系数 M_T , M_E 随预放大区电场 E_{PA} 的变化曲线

$\alpha = 2.7\%$; $E_C = 0.4\text{kV/cm}$; $E_T = 1\text{kV/cm}$

保持末级多丝室电压 V_4 以及 E_T , E_C 为常数, 根据前面的测量结果选择 $E_C = 0.4\text{kV/cm}$, $E_T = 1\text{kV/cm}$ 以保证转移效率 R_C , R_T 接近于 1. 在丙酮浓度 $\alpha = 2.7\%$ 的条件下测得的放大系数 M_T , M_E 和 M_{PA} 随 E_{PA} 的变化曲线见图 8. 在曲线的右端 ($E_{PA} \sim 9\text{kV/cm}$), ^{59}Fe 脉冲幅度谱的形状已发生畸变, 表明已进入有限正比区. 进一步升高 E_{PA} 将出现断续的火花击穿. 因此在此条件下的极限 M_{PA} 和 M_E 值分别是 $\geq 5 \times 10^3$ 和 $\geq 5 \times 10^2$.

对于不同的末级多丝室电压 V_4 , 放大系数 M_T , M_E 在不同 E_{PA} 值下的测量结果见图 9, 所得到的极限 M_T 值为 $\geq 10^5$. 可以看出, 末级多丝室处于正比放大区时 ($V_4 < 1.8\text{kV}$), 有效预放大系数 M_E-E_{PA} 曲线大体相同. 但当 V_4 处于有限正比区 ($V_4 > 1.85\text{kV}$) M_E 的行为在 E_{PA} 大处有较大的偏离. 造成此种现象的原因有待进一步探明. 情况可能是 M_E 的行为并不随 V_4 有大的变化, 只是末级多丝室处于有限正比区时, 当大量电子射入, 放大系数 M_{PC} 可能有所改变, 而且数值也不稳定, 由此导致所观测到的现象.

5. 丙酮浓度对室性能的影响

如前所述,在多级雪崩室中,丙酮吸收氩的退激光子并转换为光电子,因此它的存在对预放大区的雪崩起着重要作用,而在末级多丝室中,丙酮则是光子的淬灭气体。显然丙酮浓度的不同将使室的性能有明显的改变。为此我们测量了丙酮浓度 α 对末级多丝室的影响,结果如图 10 所示。对于同样的多丝室放大系数 M_{PC} 值,丙酮浓度 α 越高,淬灭作用越强,所需施加的电压 V_4 也越高,而且 $M_{PC}-V_4$ 曲线斜率较小。后一个效应使得 V_4 的不稳定性导致的输出脉冲幅度的差别相对地较小,有利于取得较稳定的结果。浓度的增大使末级多丝室放大系数 M_{PC} 的极限值增大。

就 M_{PC} 对 α 的变化而言,在 $\alpha > 2.5\%$ 的区域非常接近于对数的关系,而当浓度较小时 M_{PC} 的变化速度更快。随着浓度的增加,能量分辨有明显改善。

丙酮浓度对多级雪崩室 M_T , M_E 的影响参见图 11。其中 $\alpha = 3.2\%$ 的曲线仅仅是由于测量上的疏忽 E_{PA} 没有取全足够的范围,但这并不妨碍我们看出 α 对室性能的效应。随着丙酮浓度的增大,要获得同样的放大系数 M_T 或 M_E 值,预放大区必须有更强的电场。而由图 (c) 可见, M_T 和 M_E 随 α 的变化十分灵敏,粗略地讲是对数关系,而浓度 $< 2.5\%$ 时放大系数增长速度更快。在同样 E_{PA} 值下(例如 7.25 kV/cm) 浓度从 1.5% 到

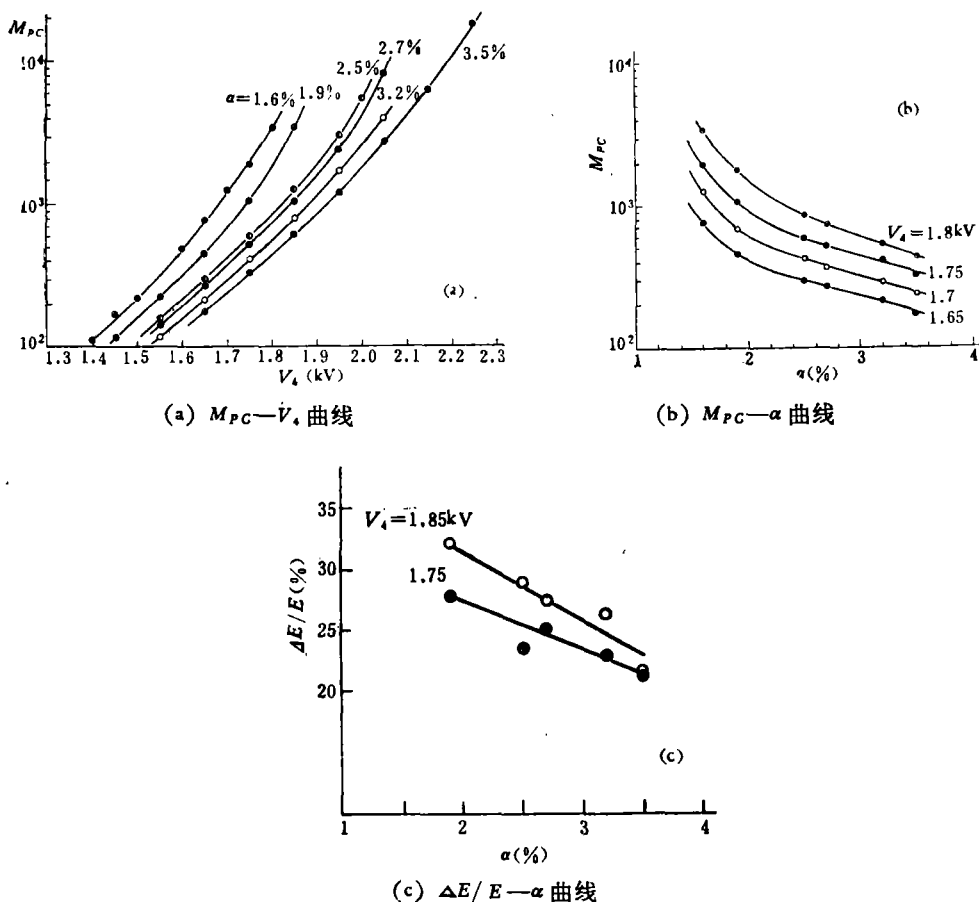
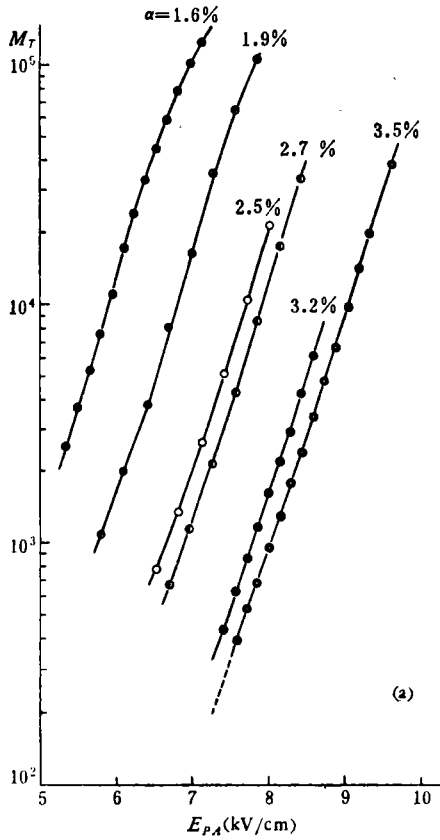
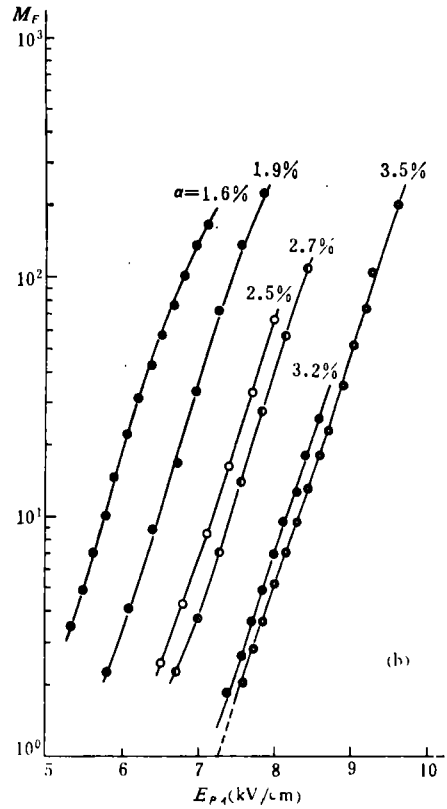


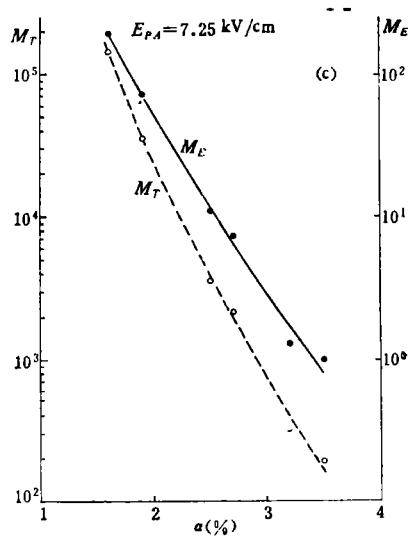
图 10 丙酮浓度对末级多丝室放大系数和能量分辨的影响



(a) $M_T - E_{PA}$ 曲线



(b) $M_E - E_{PA}$ 曲线



(c) $M_T, M_E - \alpha$ 曲线

图 11 丙酮浓度 α 对放大系数 M_T, M_E 的效应
 $E_C = 0.4 \text{ kV/cm}; E_T = 1 \text{ kV/cm}; V_4 = 1.65 \text{ kV}$

2.0% 仅 0.5% 的改变, M_T 的差别达六倍。可见混合气体中 α 值的稳定性保持在 1‰ 以下是多级雪崩室放大系数稳定的一个绝对重要的条件。特别是使用低浓度丙酮的混合气体时, 浓度不大的偏离将引起放大系数显著的变化, 所以保持 α 值的稳定更为重要。在同样的末级多丝室电压下, 低浓度丙酮混合气体可以达到较大的极限 M_T 值, 因而对需要高增益的单个光电子位置测定较为有利。

唐孝威仔细阅读了本文并提出了宝贵的意见, 在研究工作中, 与杨保忠、谢佩佩、李如柏作过有益的讨论, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] G. Charpak et al., CERN 78-05, 1978.
- [2] G. Charpak and F. Sauli, *Phys. Rev.*, **78B**(1978), 523.
- [3] A. Breskin et al., CERN-EP/79-01, 1979.
- [4] G. Charpak et al., CERN-EP/80-115, 1980.
- [5] G. Charpak et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **164**(1979), 419.
- [6] S. H. Williams et al., SLAC-PUB-2412, 1979.
- [7] J. Séguinot et al., CERN-EP/79-161, 1979.
- [8] F. Sauli, CERN 77-09, 1977, Table 1.

PERFORMANCE INVESTIGATION OF MULTISTEP AVALANCHE CHAMBER

ZHU YONG-SHENG ZHANG RUN-HUA ZHAO PING-DE XU ZHI-QING
LI XIAO-GUANG ZHANG ZHI-JIE

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

XU ZI-ZONG

(*University of Science and Technology of China*)

ABSTRACT

We have designed and operated a test module of multistep avalanche chamber with effective detection area of 9 by 9 cm². Argon-acetone mixture gas is provided by a simple gas mixing system, and mixture ratio can be modulated by gas flow. The performance of the chamber has been investigated by use of ⁵⁵Fe 5.9 keV X-ray source at acetone concentration in argon of 2.7%, and the effect of acetone concentration to the chamber has been measured.