

与 BaF₂ 耦合的低气压多步雪崩室*

胡涛¹⁾ 陈宏芳 许咨宗 曾海生²⁾ 汪兆民

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

摘 要

研究了以纯 TMAE 饱和蒸汽为工作气体的紫外光敏低气压多步雪崩室的性能。在几种温度下测量了两个不同结构的丝室的气体放大倍数。在 40°C 时得到丝室的增益为 4×10^5 , 时间分辨 4.1ns。和 BaF₂ 晶体耦合, 成功地观测了 ¹³⁷Cs γ 射线 (0.661MeV) 的信号。

一、引 言

随着 BaF₂ 晶体快闪烁成分(波长 225nm, 衰减时间 0.6ns^[1]) 的发现, 人们对它在粒子探测中的实际应用越来越关注。虽然带有透紫窗的光电倍增管能够探测 BaF₂ 的快成分, 但它对 BaF₂ 的慢成分(波长 310nm, 衰减时间为 620ns) 也灵敏, 而且难以达到好的位置分辨及不能在磁场下工作。

早在 1977 年, Séguinot 和 Ypsilantis 就提出了用掺入具有低电离电位气体的方法, 做成对紫外光灵敏的多丝室, 作为契仑柯夫成像的紫外光子探测器^[2]。Anderson 等用低气压丝室来探测 BaF₂ 的闪烁光^[3-6], 并对紫外光敏丝室的性能作了许多研究。这种将 BaF₂ 和紫外光敏丝室耦合的装置有下列优点: 造价低, 既能保持 BaF₂ 对光子和高能粒子的高探测效率及好的时间特性, 又具有多丝室良好的定位性能。因此, 在粒子物理实验及核医学等方面, 它将是一种很有希望的探测装置。

在国内, 我们首次对这种探测系统进行了研究。下面报道研究的初步结果。

二、实验装置简介

为了探测 BaF₂ 的快闪烁成分, 必须采用一种光电离电位合适的气体作为丝室的工作介质。我们选用的是 TMAE (Tetrakis (dimethylamino) ethylene 即四(二甲基胺)乙烯), 它的气态电离电位是 5.36eV (相应于光的波长为 231nm)。因此, 它会被波长为 225nm 的 BaF₂ 闪烁的快成分所电离, 而对 BaF₂ 的慢成分 (310nm) 则不灵敏。BaF₂ 的

本文 1991 年 7 月 29 日收到。

* 国家自然科学基金资助。

1) 现在通讯地址: 北京高能物理研究所一室。

2) 现在通讯地址: 北京空间物理研究所。

射光谱和 TMAE 的光量子效率如图 1 所示。

我们曾采用 TMAE 和异丁烷的混合气体作为丝室的工作气体，用氙灯测试的结果表明，它的光量子效率较低。因此，改用纯 TMAE 蒸汽作为工作气体。为了得到合适的 TMAE 蒸汽压，需要一个温控系统。整个实验装置如图 2 所示，真空腔体和水浴的温度可分别控制，为防止 TMAE 冷凝在腔体壁上，一般使腔体温度比水浴温度高 5°C 左右。

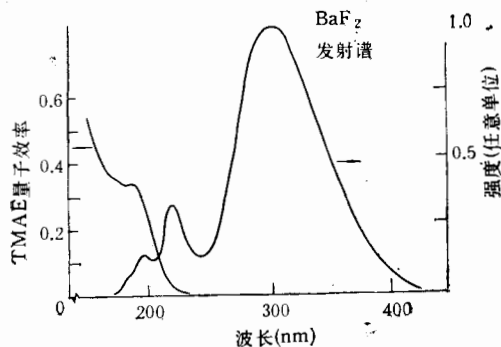


图 1 BaF_2 的发射光谱和 TMAE 蒸汽的光量子效率

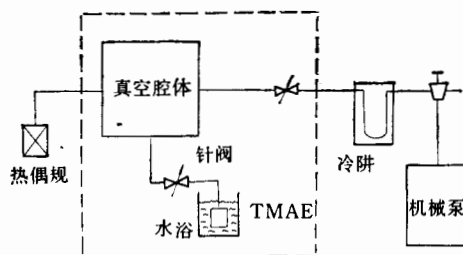


图 2 实验装置示意图

为得到较高的气体放大倍数，所用低气压多步雪崩室的构造如图 3 所示。图 3(a) 和 3(b) 为两种不同电极布局的多步雪崩室，后者较前者增加一过渡区 T。I 为紫外光子光电转换区，其区间应比紫外光子的平均自由程大，(a)、(b) 分别为 13mm 和 10mm，该区电场弱，转换的光电子无放大地漂移而进入 II 区。II 区为预放大区(区间为 3mm)，经过预放大的电子直接进入 III 区如图 3(a)，或无倍增地穿过 T 区后再进入 III 区如图 3(b)。III 区具有一般多丝正比室的结构，阳极和阴极丝面的距离为 3mm。阳极丝面是由直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的镀金钨丝，以 2mm 间距布在印刷板上而构成，其余各丝面都是由直径为 $80\ \mu\text{m}$ 的镀金钨丝组成，丝距为 1mm。室的灵敏面积为 $80 \times 80\text{mm}^2$ ，整个丝室固定在真空腔体内。在注入 TMAE 前，先用机械泵将腔体抽真空，使真空度达到 $1.3-0.13\ \text{Pa}$ 。

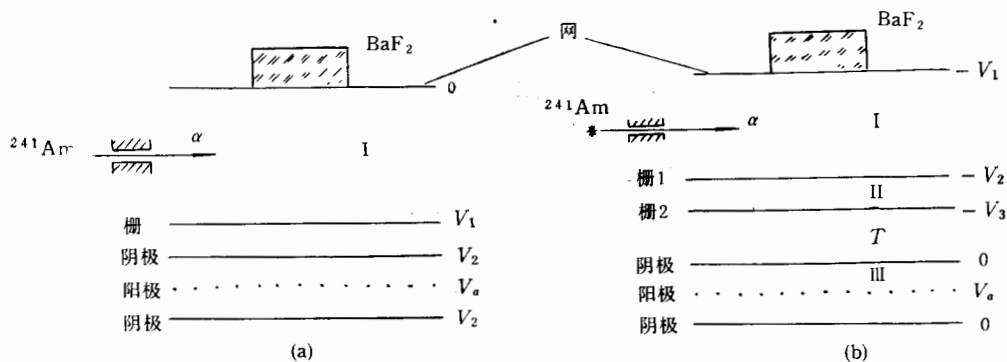


图 3 丝室结构示意图
(a) 无过渡区 (b) 有过渡区

所用的 BaF₂ 晶体是由上海硅酸盐研究所提供的,晶体的尺寸为 $2 \times 2 \times 2.4\text{cm}^3$,为了尽可能多地收集 BaF₂ 产生的光子,将晶体的五个面(出射光的一面除外)包上两层聚四氟乙烯薄膜,外面再包一层铝箔。

三、实验结果

1. 低气压丝室放大倍数的测量

在进行气体放大倍数的测定之前,先用紫外光源(脉冲氙灯 FX-198U)来测试丝室的性能。调节丝室各电极的电压,使紫外光子在丝室中产生的信号最大(即总气体放大倍数最大),而且有良好的幅度分辨率。在不同的饱和蒸汽压下,最佳的电压配置分别列于表1(a)和1(b)。

表 1(a) 与图 3(a) 对应的工作电压配置

温度(°C)	蒸汽压 (Pa)	V ₁ (V)	V ₂ (V)	V _a (V)
20	39.9	30	150	300
30	82.6	30	180	360
40	161.3	30	40	420
50	302.6	30	40	500
60	546.6	30	40	550

表 1(b) 与图 3(b) 对应的工作电压配置

温度(°C)	蒸汽压 (Pa)	V ₁ (V)	V ₂ (V)	V ₃ (V)	V _a (V)
40	161.3	240	200	40	360
50	302.6	290	250	40	400

为了测定丝室的气体放大倍数,使 ²⁴¹Am α 粒子通过一准直缝 ($9 \times 3\text{mm}^2$) 平行于阴极面地射入转换区,如图 3 所示。入射的 α 粒子在转换区与 TMAE 气体分子作用,产生次级电子。在电场作用下,电子先后经过预放大区和主放大区,最后被阳极丝收集。

阳极丝输出的信号,经电荷灵敏放大器、主放大器后送入多道脉冲幅度分析器,经过对电子学系统的标定,即可得到阳极输出的电荷量,从而得到经丝室放大后的电子总数 N 。

设 α 粒子在丝室中产生和被收集的原初电子数为 N_0 , 则

$$N_0 = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right) \cdot L}{w},$$

其中 (dE/dx) 为 α 粒子在 TMAE 蒸汽中的比电离损失,具体数值可以计算得到^[7]; L 为收集长度,因为是由单根阳极丝输出信号,所以 L 就是阳极丝间距,即 $L = 2\text{mm}$; w 是 TMAE 的平均电离功,取 $w = 12\text{eV}^{[8]}$ 。由此可得到丝室的气体放大倍数 M ,

$$M = N/N_0.$$

按照表 1(a)、1(b) 设置的工作电压, 测量结果分别列于表 2(a)、2(b).

表 2(a) 与图 3(a) 对应的丝室放大倍数

温度(°C)	N_0	N	M
30	1.03×10^2	2.19×10^5	2.1×10^3
40	1.97×10^2	1.01×10^6	5.1×10^3
50	3.61×10^2	5.10×10^6	1.4×10^4
60	6.45×10^2	1.38×10^6	2.1×10^3

表 2(b) 与图 3(b) 对应的丝室放大倍数

温度(°C)	N_0	N	M
40	1.97×10^2	8.78×10^7	4.5×10^5
50	3.61×10^2	6.72×10^7	1.9×10^5

对于图 3(a) 的布局, 测得最大的气体放大倍数是 1.4×10^4 (50°C); 而对于图 3(b) 的布局, 在 40°C 的 TMAE 饱和蒸汽压下, 达到的气体放大倍数最大, 其值为 4.5×10^5 .

2. BaF₂ 耦合低气压丝室对¹³⁷Cs γ 射线的响应

a) BaF₂ 晶体闪烁的快慢成分

图 4 和图 5 分别给出了本实验所用 BaF₂ 样品的 X 射线激发发射荧光谱以及荧光的时间特性谱。测量结果表明, BaF₂ 样品的荧光包括 220nm 和 325nm 两个发射谱带, 相应的荧光衰减时间为 815ps 和 604ns, 强度比为 7.5:92.5, 对光电倍增管光阴极量子效率进行修正之后, 快、慢成分比为 13:87。用单光电子谱标定测量系统的增益后, 可得 BaF₂ 输出的总荧光产额为 1570 光子/MeV^[7], 从而得到快成分的输出约为 200 光子/MeV。假定 TMAE 蒸汽对 BaF₂ 快成分的光量子效率(或称光电转换效率)为 5%, 则 ¹³⁷Cs 的 γ 射线 (0.661MeV) 在低气压丝室的光电转换区产生的原初电子数不会超过 10 个。

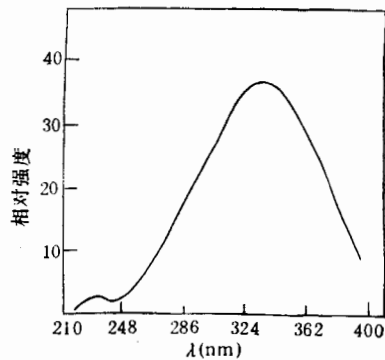


图 4 BaF₂ 的 X 射线激发发射光谱

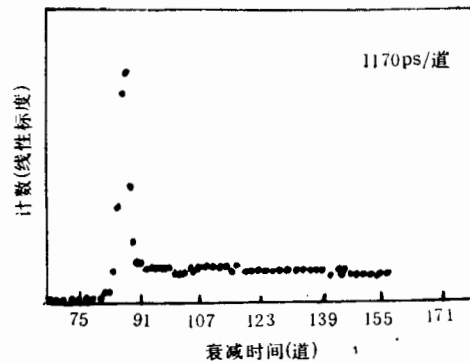


图 5 BaF₂ 荧光的时间谱

b) 低气压丝室对 ^{137}Cs γ 射线的响应

用图 3(b) 的丝室结构, 在温度为 40°C 时测得 ^{137}Cs γ 射线引起的输出脉冲幅度谱如图 6 所示。由于 ^{137}Cs γ 射线在 BaF_2 -TMAE 丝室中产生的原初光电子数很少, 因此不可能有好的能量分辨。很宽的光电峰和康普顿谱的叠加最后形成如图 6 的谱形。

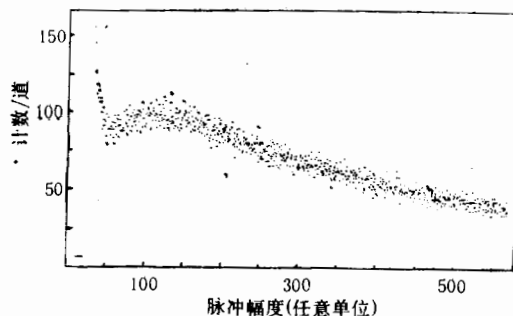


图 6 BaF_2 -TMAE 丝室系统 (40°C) 输出的 ^{137}Cs 脉冲幅度谱

3. 低气压丝室的时间分辨

为测量丝室的时间分辨, 用氙灯做紫外光源, 氙灯的电信号作为时间幅度转换器 (TAC) 的起始信号, 氙灯发出的紫外光在丝室阳极上产生的信号作为 TAC 的终止信号, 整个实验框图如图 7。测量的时间谱如图 8 所示。经过对 TAC 的刻度, 并扣除氙灯本身和电子学系统的时间晃动, 用 40°C 的 TMAE 蒸汽压时, 得到丝室的时间分辨 (FWHM) 为 4.1ns 。

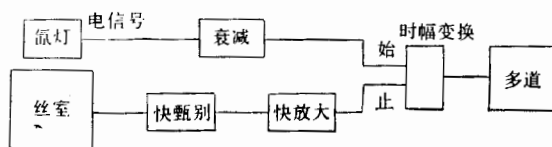


图 7 时间分辨测量系统的框图

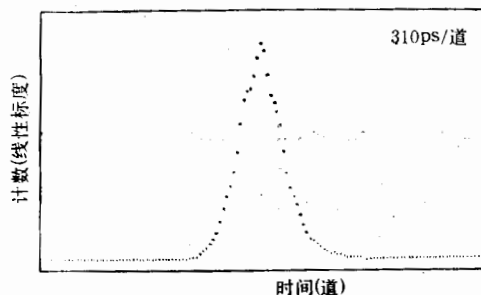


图 8 时间谱 (40°C TMAE 蒸汽)

四、结 论

1. 采用纯 TMAE 的低气压多步雪崩室的气体放大倍数与室的结构、各电极的电压配置有密切关系。(由于它们对各区的电场分布和放大区气体雪崩中产生的光子的反馈都有很大影响。)实验结果表明,在预、主放大区之间插入一个过渡区对电压调节及提高室的增益是必要的。

2. 此 BaF₂-TMAE 丝室对 ¹³⁷Cs γ 射线的能量响应是不够理想的,但若采用大尺寸的 BaF₂ 晶体,能量分辨应能有明显改善。另外在高能物理实验中,入射电子和光子的能量为几百 MeV 到几个 GeV,原初电子数将比 ¹³⁷Cs γ 射线产生的大几个数量级,因此预期可以得到好的能量响应。

3. 初步测量表明,即使在有过渡区的情况下,低气压丝室仍具有好的时间特性,可望满足未来高亮度对撞机实验对量能器的要求。

作者感谢李培俊先生及上海硅酸盐所无偿提供 BaF₂ 晶体对我们工作的支持。

参 考 文 献

- [1] M. Laval, et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A206** (1983), 169.
- [2] J. Seguinot, et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A142** (1977), 377.
- [3] D. F. Anderson, et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A217** (1983), 217.
- [4] D. F. Anderson, et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A225** (1984), 8.
- [5] P. Schotanus, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A252** (1986), 255,
- [6] C. L. Woody, et al., *IEEE Tran. Nucl., Sci.*, **NS-33** (1986), 136.
- [7] 胡 涛, "BaF₂ 耦合低气压多步雪崩室"(中国科技大学近代物理系内部报告)。
- [8] Kai Siegbahn " $\alpha\beta\gamma$ Ray Spectroscopy" Vol. 1, p. 25.

BaF₂ Scintillator Coupling with a Low-pressure Multistep Avalanche Chamber

HU TAO CHEN HONGFANG XU ZIZONG ZHENG HAISHENG WANG ZHAOMIN

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT

We studied the properties of a UV light sensitive low-pressure multistep avalanche chamber containing pure TMAE vapour. The gain of two chambers with different constructure at various temperatures is measured. With pure TMAE vapour at 40°C the gain of one chamber was 4×10^5 , the time resolution was 4.1ns. Coupling the chamber with a $2 \times 2 \times 2.4 \text{cm}^3$ BaF₂ scintillator we successfully observed the signal of ¹³⁷Cs γ -ray of 0.661MeV.