

自猝灭流光 (SQS) 探测器的研究结果

杜远才 李建平 王先佩 刘曙东 唐鄂生

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文描述了自猝灭流光 (SQS) 探测器在我国的具体条件下研究的第一批结果: 在 50 欧姆负载上输出脉冲的上升时间为 3 至 5 毫微秒, 脉冲宽度约 30 毫微秒, 幅度约 100 毫伏. 计数率随电压变化的曲线的坪长约 700 伏. 工作气体的比例在可变范围 20% 之内变化不影响其性能. 对带电粒子的探测效率接近 100%. 可正常工作的计数率在每毫米阳极丝内每秒 $> 10^3$ 次. 在 2 毫米阳极丝上测得的局部死时间约 10 微秒. 当工作在流气式时可连续使用, 没有寿命问题. 密闭式使用时, 寿命 $> 5 \times 10^8$ 次脉冲. 造价低廉, 长度 1 米左右的 SQS 管造价约 10 元. 我们制成了很多种 SQS 管及 SQS 多丝室. 多丝室的性能与管状的相似. 本文还给出了把 SQS 探测器用于电子直线加速器窄脉冲强中子辐射场的测量的初步结果以及研制 SQS 放射性测量仪的初步结果. 我们的结论是: SQS 探测器可以部分地取代费用较高的闪烁计数器, 可以全部取代盖革计数管.

一、引 言

在高能物理实验中, 在保证实验要求的前提下, 尽量降低探测器的造价及运行费用有着重要的意义. 如果能够研制出一种不需要光电倍增管而能够直接给出幅度足够大的快脉冲的探测器单元来部分地代替闪烁计数器及漂移管等, 则可大幅度地降低这些庞大设备的开支.

直到现在, 在低能核技术、保健物理、环境保护、医疗设备等方面还在一定程度上使用简便的盖革计数管. 但是由于盖革计数管的许多固有的缺点, 特别是死时间长、寿命短等方面的缺点, 使得许多工作受到了限制. 这就需要新的、性能更好、使用方便、造价低廉的探测器.

SQS 探测器可能是上述在高能物理、低能核技术、保健物理、环境保护和医疗设备等方面所追求的那种新探测器中最有希望的候选者之一.

二、原 理

致电离粒子在气体放电探测器的工作气体中产生的电子在足够高的外加电场的作用

下,能够
后,由于
雪崩内
一部分
而从工
的正离
产生了
自由程
此雪崩
子柱能
锐减,所
越来越
猝灭性
下,此时
猝灭流
冲幅度;
在阳极
很窄而
这种
过去, /
SQS 放
机制进
SQS 探
本工
工作条
医疗设

考
SQS
我
管,直径
氯化亚
米到 3
有影响.
分明显
的 SQS

结果

第一批结
30 毫微
气体的比
±100%。
丝上测得
题。密闭
造价约 10
相似。本
测量的
SQS 探测

及运行费用
度足够大的
低这些庞大

一定程度上使
间长、寿命短
方便、造价低

户和医疗设备

外加电场的作

下,能够引起雪崩。雪崩内部的电场方向与外加电场方向相反。当雪崩发展到一定大小之后,由于内部电场与外加电场相抵消,所以雪崩不再扩大,这时的雪崩叫做临界雪崩。临界雪崩内部的电子被冷却,此时因离子复合而产生光子,即 $A^+ + e^- \rightarrow A^* + h\nu$ 。其中有一部分能量较高的光子可能穿透临界雪崩中的空间电荷云而逃出 50 至 100 微米的距离而从工作气体中产生光电子。这些光电子只有在临界雪崩所形成的空间电荷的电偶极子的正离子锥体的顶部(此处电场最强)才能获得足够的能量并在漂移回来时倍增。这样就产生了定向的流光。如果猝灭性气体的比例很大而且工作气压为大气压力,那么光子的自由程很短,所以离子复合产生的光子很难逃出很远,因此雪崩区域不会沿着阳极丝蔓延扩展。由于较长的正离子柱能起屏蔽作用而且与阳极丝的距离增大时电场强度锐减,所以当流光发展越来越长时,流光顶部的电场强度越来越小,因而流光自行猝灭。这就是说,当工作气体中猝灭性气体的比例很大(占一半或更多)而且在大气压力下,此时的放电方式与盖革放电有本质的区别,它称为自猝灭流光(SQS)放电。它具有如下的特征:高的输出脉冲幅度;脉冲幅度分布谱中在小幅度区有一明显的断开;在阳极丝上放电是局部的;死时间很小;输出脉冲的宽度很窄而且形状统一;脉冲幅度与初级电离无关。

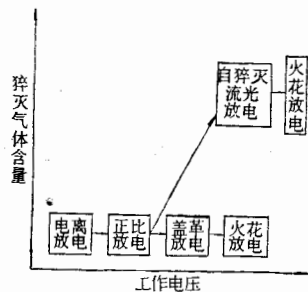


图 1 气体放电方式与工作电压及猝灭性气体的含量的关系示意图

这种新的放电方式的发现使得人们不得不把对放电过程的理解改变为如图 1 所示。过去,人们已经利用不同的放电方式研制成功了相应的不同类型的探测器。因此,利用 SQS 放电方式研制 SQS 探测器是很自然的事情。杜布纳^[1]和费米实验所^[2]对 SQS 放电机制进行了初步的研究,他们用光学和电子学的方法都观察到了自猝灭流光并研制成了 SQS 探测器。弗拉斯卡蒂^[3]也和杜布纳差不多同时研制成了 SQS 探测器。

本工作的目的是在我国条件下研制成 SQS 探测器,进一步研究其性能,找出最佳的工作条件,以便推广应用到我国的高能物理^[4]、低能核技术和保健物理^[5]以及环境保护^[6]、医疗设备等方面。

三、结构及测试电子学线路

考虑到结构简单、材料现成、使用方便等因素,我们首先选用了圆柱形的单管结构。

SQS 管的结构及性能测试线路的示意图如图 2 所示。

我们选用了不同直径和不同材料的导体管,包括直径为 8mm, 12mm, 17mm 的紫铜管,直径为 8mm, 18mm 及 30mm 的衬银作为阴极的有机玻璃管,直径为 15mm 的内涂有氯化亚锡的透明阴极玻璃管,直径为 30mm 内涂有紫铜粉的玻璃管。管子的长度由 4 厘米到 3 米。测试结果表明,各种金属阴极材料对探测器在用于探测带电粒子时的性能没有影响。但是,在用于记录光子或中子时,阴极材料的种类和厚度作为转换体的作用是十分明显的,例如银(Ag)阴极的 SQS 探测器可作为记录热中子的探测器,但锡(Sn)阴极的 SQS 探测器则不能记录中子。为了便于利用放射源对探测器进行性能测试,在管子中

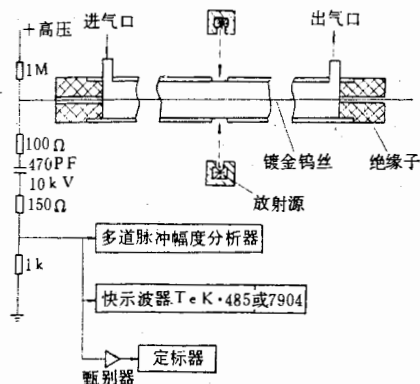
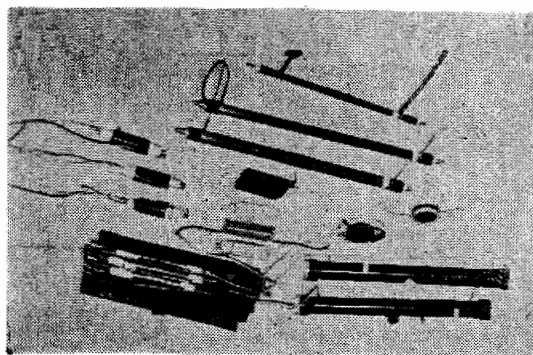


图2 SQS管的结构及测试线路的示意图

部开有 $\phi 2$ 或 $\phi 5$ 的窗子。为了使窗子附近的电场分布尽量均匀对称，窗子用厚度为10微米的镀铝 Mylar 膜密封。堵头、窗子与管体的气密封接用502胶。进、出口气咀或者用锡焊或者用502胶与管体粘接。阳极丝用60微米或80微米的镀金钨丝。阳极丝的固定用锡焊和502胶。

为了增大接收度以便于低强度的测量，我们也研制了SQS多丝室。SQS多丝室由中间阳极丝平面及上、下阴极丝平面组成。

照片1为我们的SQS探测器的一部分。长度为3米的因与短的一起拍照不方便，故未列入。扁的为SQS多丝室。



照片1 我们制成的SQS探测器

四、性能测试结果

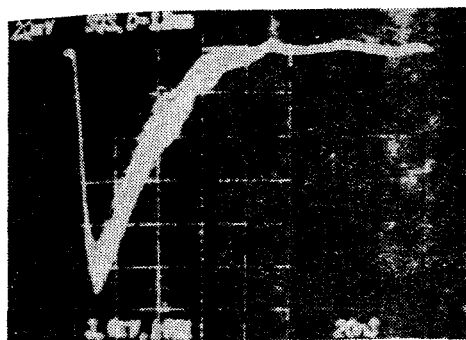
测试线路如图2所示。测试结果如下：

1. 输出脉冲波形

用高压快示波器 Tek、7904 拍得的在50欧姆负载上的波形如照片2所示。每小格的水平方向为20毫微秒，垂直方向为20毫伏。工作气体成份为42%的氩加58%的异丁烷混合后通过室温的二甲氧基甲烷 ($H_2C(OCH_3)_2$)，然后进入SQS管，阳极丝为直径80

微米
多次
约为
1
;
J
到的
|
测得
的放
除了
2

图4(a)
的坪由
8mm,
58).
x



照片 2 我们的 SQS 探测器的输出脉冲波形

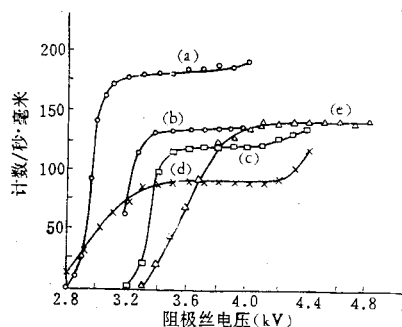


图 3 SQS 管的坪曲线

- (a) $\phi_{8-80}, \text{Ar}/\text{C}_4\text{H}_{10}(42/58) + \text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2, {}^{55}\text{Fe}$.
- (b) $\phi_{8-80}, \text{Ar}/\text{C}_4\text{H}_{10}(28/72) + \text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2, {}^{55}\text{Fe}$.
- (c) $\phi_{12-80}, \text{Ar}/\text{C}_4\text{H}_{10}(42/58) + \text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2, {}^{55}\text{Fe}$.
- (d) $\phi_{8-60}, \text{Ar}/\text{C}_4\text{H}_{10}(50/50) + \text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2, {}^{90}\text{Sr}$.
- (e) $\phi_{17-80}, \text{Ar}/\text{C}_4\text{H}_{10}(50/50) + \text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2, {}^{90}\text{Sr}$.

微米的镀金钨丝。SQS 管子的内径为 12mm, 工作电压为 3.9kV, 负载为 50 欧姆。经过多次在快示波器上的仔细测定, 输出脉冲的上升时间为 3 至 5 毫微秒, 半高度上的全宽度约为 30 毫微秒, 幅度约 100 毫伏。

由此可以得出结论, 在作为快触发使用时, SQS 探测器是可以代替闪烁计数器的。

2. 计数率与电压变化的关系——坪曲线

所有的 SQS 管都有一个比盖革计数管的大得多(大几倍甚至十倍!)的坪长。我们得到的典型的坪曲线如图 3 所示。

图 3 中所有坪曲线都是在 SQS 探测器工作在流气式、工作气压为大气压力的情况下测得的。我们的结论是, 用不同的导体材料和不同内径的阴极, 不同的阳极丝直径, 不同的放射源(包括 ${}^{55}\text{Fe}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ 、 ${}^{137}\text{Cs}$), 不同的氩与异丁烷的比例(从 50/50 到 28/72), 坪曲线除了坪区稍有移动之外, 其他特征都是相似的, 坪长约 700 伏。

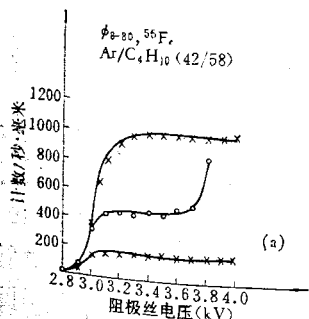


图 4(a) 二甲氧基甲烷对 SQS 管的坪曲线的影响。管子的内径为 8mm, 工作气体为氩/异丁烷(42/58)。○——不加 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$, ×——加 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$ 。

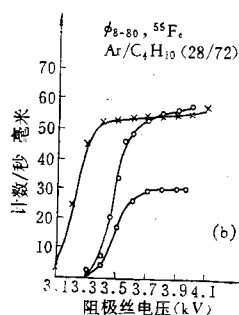


图 4(b) 二甲氧基甲烷对 SQS 管的坪曲线的影响。管子的内径为 8mm, 工作气体为氩/异丁烷(28/72)。○——不加 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$, ×——加 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$ 。

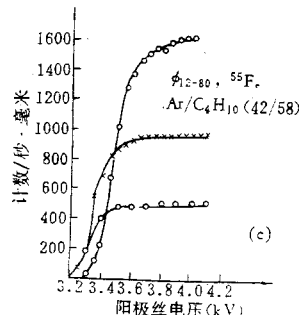


图 4(c) 二甲氧基甲烷对 SQS 管的坪曲线的影响。管子的内径为 12mm, 工作气体为氩/异丁烷(42/58)。○——不加 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$, ×——加 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$ 。

用厚度为 10
气阻或者用
日极丝的固定
SQS 多丝室由
!拍照不方便!

:所示。每小
氩加 58% 的
阳极丝为直

由此可见, SQS 探测器作为计数器, 其工作是非常稳定的。

3. 二甲氧基甲烷的影响

二甲氧基甲烷 ($\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$) 对直径较小的 SQS 管 (例如直径为 8mm) 的坪曲线影响十分显著。在异丁烷含量较低时 (例如氩/异丁烷为 50/50), 不加 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$ 时, 计数率随电压的变化曲线几乎没有坪区。在氩/异丁烷为 42/58 时, 加上它就可以把坪区向高工作电压区延长, 如图 4(a) 所示。当异丁烷含量较高时 (例如氩/异丁烷为 28/72), 加上 $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$ 可以使坪区向低工作电压端扩展, 如图 4(b) 所示。二甲氧基甲烷对直径为 12mm 的 SQS 管则影响不大, 如图 4(c) 所示。

由此可见, 对直径较小的 SQS 管, 二甲氧基甲烷起着坪区扩展剂的作用, 可能是因为它既能强烈地猝灭能引起次级电离的光子, 又有较大的电子雪崩系数的缘故。

4. 死时间的测定

我们用双源法来测定死时间。设死时间为 t , 每秒实际上的计数为 n , 则每秒钟内总的死时间为 nt 。设每秒入射粒子数为 N , 则每秒钟内漏记了的粒子数为 $n + N$, 故有:

$$N - n = n + N \quad (1)$$

$$\therefore N = \frac{n}{1 - nt} \quad (2)$$

设从第一个放射源每秒入射的粒子数为 N_1 , 计数管给出的计数率为 n_1 ; 从第二个放射源每秒入射的粒子数为 N_2 , 计数管给出的计数率为 n_2 ; 从这两个放射源每秒内入射的粒子数为 N_{12} , 计数管给出相应的计数率为 n_{12} , 则有

$$N_{12} = N_1 + N_2 \quad (3)$$

由 (2) 及 (3) 得

$$\frac{n_{12}}{1 - n_{12}t} = \frac{n_1}{1 - n_1t} + \frac{n_2}{1 - n_2t} \quad (4)$$

解方程 (4) 得

$$t = \frac{1}{n_{12}} \{ 1 - [1 - (n_1 + n_2 - n_{12}) \div n_1 \div n_2 \times n_{12}]^{\frac{1}{2}} \} \quad (5)$$

(5) 式中最外层的括号内取负号的原因是当 $n_{12} = n_1 + n_2$ 时, 死时间应为零。用双源法测量死时间的示意图如图 2 所示。所用的管子为 $\phi 8$ 的紫铜管, 阳极丝的直径为 80 微米, 窗子的直径为 2mm, 用厚度为 10 微米的镀铝 Mylar 膜密封。工作气体为氩/异丁烷 (40/60) + $\text{H}_2\text{C}(\text{OCH}_3)_2$, 放射源为 ^{55}Fe , 准直孔的直径为 2mm。测得的局部死时间如图 5 所示。由图 5 可见, 工作电压在 3.8kV 至 3.9kV 时, 局部死时间约为 10 微秒/2mm。值得指出的是, 自猝灭流光管的死时间是局部的, 不像盖革管在死时间内整个管子都不能工作。至于局部死区的细节, 我们将在以后的文章中给出。

5. SQS 探测器的探测效率的测定

a. 对带电粒子的探测效率

由
通过厚
测效率
(J306 β
测器工
我
6 所示
b.
当
SQS 管
因此我
测中子
管 (外
于 1; 1
对每平
6.
当
30mm
我
得类似

我
验工作

的坪曲线
I₃)₂ 时, 计
以把坪区向
28/72), 加
甲烷对直径

可能是因为

每秒钟内总
N, 故有:

(1)

(2)

二个放射源
入射的粒子

(3)

(4)

(5)

零. 用双源法
径为 80 微米
/异丁烷 (40
时间如图 5
/2mm. 值得
子都不能工作

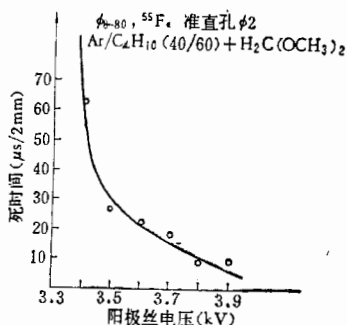


图 5 用双源法测得的 SQS 管的局部死时间随工作电压的变化曲线

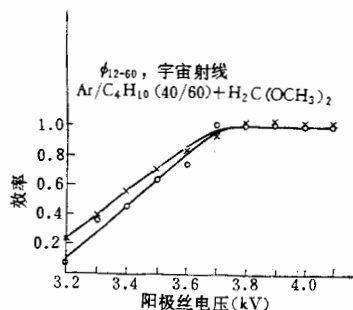


图 6 用宇宙射线中的带电粒子对 SQS 管测得的效率随工作电压的变化曲线 ○——效率 ×——计数率

由于我们没有高能加速器作为高能量的带电粒子源, 所以选用了标定过的 ⁹⁰Sr 的 β⁻ 通过厚度为 10 微米的 Mylar 窗子进行计数率/立体角的测量. 把测量结果和公认为探测效率是百分之百的云母簿窗钟罩形有机盖革管 (J141αβ 型) 及簿壁园柱形 β 盖革管 (J306β) 以及标准剂量仪 (FY-1 辐射仪) 的测量结果比较而得出结论: 当自猝灭流光探测器工作在坪区时, 其对带电粒子的探测效率接近百分之百.

我们还利用宇宙射线中的高能带电粒子对 SQS 管进行了效率的测量. 其结果如图 6 所示. 当工作在坪区时, 其效率接近百分之百.

b. 银阴极自猝灭流光管对中子的探测效率

当热中子进入银阴极的 SQS 管时, 由于中子使银活化而放出 β⁻ 粒子, 所以银阴极的 SQS 管可以作为中子探测器. 由于银阴极的 SQS 管对中子的计数率与其几何大小有关, 因此我们曾用镅铍中子源及铜 (²⁵²Cf) 裂变中子源直接和间接地对银自猝灭流光管在探测中子效率方面进行了刻度. 刻度的结果如下: 长度为 120mm 内径为 30mm 的银 SQS 管 (外包 6.5 厘米的石蜡作为中子的慢化体), 对每平方厘米每秒每个中子的计数率接近于 1; 长度为 40mm 内径为 8mm 的银 SQS 管 (外包 6.5 厘米的聚乙烯作为中子的慢化体), 对每平方厘米每秒每个中子的计数率为 0.064.

6. 寿命

当 SQS 管工作在流气式时, 连续使用半年以上没有发现寿命问题. 长度 40cm, 内径 30mm 的 SQS 管封闭式连续工作积累计数 > 5 × 10⁸ 之后其效率仍然不变.

我们曾用液化石油气代替异丁烷, 在输出脉冲波形、坪曲线、死时间和效率等方面获得类似的结果^[4].

五、SQS 探测器的初步应用

我们已经开始把研制成功的自猝灭流光探测器用于 30 MeV 的电子直线加速器的实验工作. 用银阴极的 SQS 管测量了窄脉冲电子束 (每束电子的持续时间为 1 微秒, 每秒 50

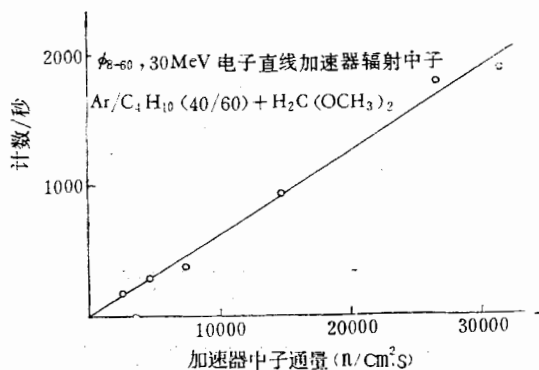


图7 银 SQS 管的计数率与中子通量的关系曲线

束)打金靶所产生的中子通量,并证明了银阴极 SQS 管是一种性能良好的实时的加速器脉冲中子场的监测器^[5]。其对中子的响应曲线如图7所示。

由于 SQS 探测器在本底计数、死时间、坪长、寿命等方面都比 GM 管的优越得多,所以我们将把以钟罩形 GM 管为基础的放射性测量仪革新为以 SQS 探测器为基础的放射性测量仪^[6]。SQS 放射性测量仪的最大计数率比同样几何条件的钟罩 GM 管放射性测量仪的大一个数量级以上。这两者的比较如图8所示。

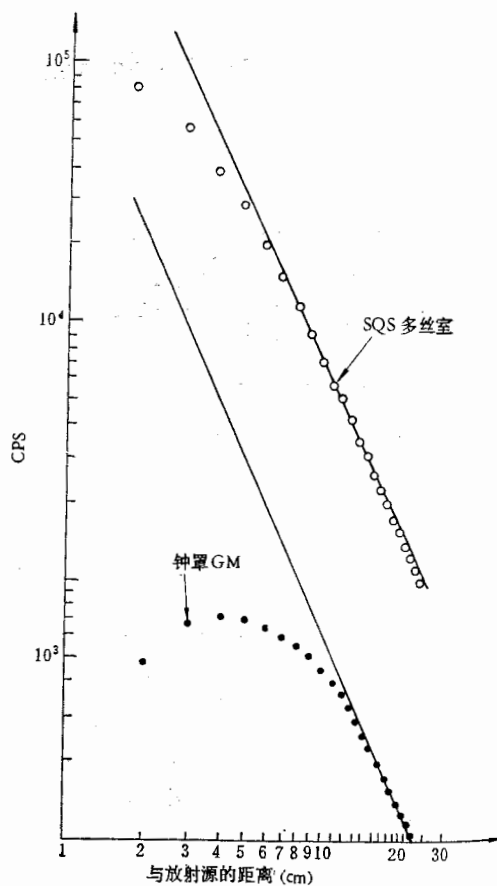


图8 SQS 与 GM 方式放射性测量仪的计数率随与放射源的距离的变化曲线

作者在工作过程中得到王淦昌教授的鼓励和经常关心,得到张文裕教授的支持,特此表示感谢。还感谢英国卢瑟福实验室的 J. F. Connolly 博士的有益的讨论。十分感谢高能物理所的物理一室、物理二室、电子学室、技安室和工厂中曾经给予支持和协助的同志们,特别是肖健,郑林生,唐孝威,章乃森,胡家伟,郑志鹏,谢一冈,王继华,何景棠,张英平,李如柏,卢新华,徐蓉芬,赵海泉,李世忠,李燕,张宝襄和刘列夫等同志。

参 考 文 献

- [1] G. D. Alekseev, et al., *Nucl. Instr. and Methods*, **177** (1980), 385.
- [2] M. Atac, et al., Fermilab Report FN-339 (1981).
- [3] G. Battistoni, et al., *Nucl. Instr. and Methods*, **176** (1980), 297.
- [4] 杜远才、李建平、刘曙东、唐鄂生、李向程, *高能物理与核物理*, **7**(1983), 126
- [5] 李建平、杜远才、刘曙东、唐鄂生等, *科学通报*, **28**(1983), 87.
- [6] 杜远才、李建平、刘曙东、唐鄂生, *核电子学与探测技术*, **3**(1983),

ASTU

In
struction
are: Pt
30 ns.
regist
10³ per
2 mm w
Sor
nology,

A STUDY OF SELF-QUENCHING STREAMER (SQS) DETECTORS

DU YUAN-TSAI LI JIAN-PING WANG XIAN-PEI

LIU SHU-DONG, TANG E-SHENG

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

QS 多丝室

ABSTRACT

In this paper the principle of self-quenching streamer (SQS) discharge and construction of SQS detectors are described. The main performances of our SQS detectors are: Pulses with a rise time of 3 to 5 ns reach 100 mV into 50Ω with a decay time of 30 ns. The plateau in counting rate vs voltage is about 700 V. The efficiency for registering charged particles is 100%. The rate capability of SQS tubes is better than 10^3 per second per millimeter along the wire. The localized dead time is about $10 \mu\text{s}/2 \text{ mm}$ which equals a dead zone of $2 \mu\text{s}\cdot\text{cm}$.

Some examples of using our SQS detectors in areas of low-energy nuclear technology, health physics and environment protection are given.

测量仪的计数率
化曲线

支持, 特此
十分感谢高
协助的同志
景棠, 张英