

快报

自猝灭流光雪崩机制*

陈继革¹⁾ 许咨宗 陈宏芳 马文淦

(中国科技大学近代物理系, 合肥 230026)

摘 要

本文通过对大量 SQS 实验现象的分析研究, 提出 SQS 的成因是原初饱和雪崩的空间电荷造成阳极丝附近电场的畸变。根据这一假设, 对 SQS 过程做了定量的计算, 给出各种不同条件下, 计数管输出电荷量与所加高压的关系曲线。计算了 SQS 转变电压、转变点原初雪崩的电荷量和 SQS 雪崩的电荷量与气体组分的关系。计算结果和实验结果令人满意地符合。

一、引 言

对自猝灭流光 (Self-Quenching-Streamer) 放电现象的研究已持续了十几年, 先后提出了几种放电机制。其中之一是建立在光子传播 SQS 雪崩的假定^[1,2]之上。另一种认为 SQS 的发展是由于氩的亚稳态的浓度达到某一临界值诱发的^[3]。它们各有成功之处, 也存在某些极限性^[4,5]。本文基于空间电荷造成的电场畸变, 提出一种 SQS 雪崩发展的机制。并对 SQS 的一些重要特征量做了定量的计算。

二、基本假设

1. SQS 机制的假设: 当原初电子雪崩发展到一定规模, 由于空间电荷效应, 雪崩区电场将有很大的畸变, 阳极丝表面附近的横向电场大于纵向电场(阳极向阴极指向)。这样电子将停止向阳极丝的定向漂移, 又由于雪崩区的电场相当强, 因而这时电子将在雪崩区引起自持放电, 发展形成流光。当电子倍增到一定程度, 即 $\rho_e \sim 10^{-6} \text{C/cm}^3$ ^[6], 雪崩区内形成一团等离子体, 由它的导电性决定其空间电荷将按等势条件重新排布 ($\tau \sim 10^{-10} \text{s}$), 正电荷重心将远离阳极区(这时电子复合几率已较大), 流光区的电场减弱, 雪崩停止, 流光熄灭。

2. 雪崩空间电荷分布的假设: 假设雪崩区空间电荷较集中分布在雪崩锥的表面^[7],

本文 1990 年 12 月 3 日收到。

* 国家自然科学基金资助课题。

1) 现在中科院近代物理所 69#, 兰州 730000。

这样空间电荷效应对电场的影响,可以通过计算在锥表面的一些环电荷形成的场来近似。

在这样一个假设的前提下,空间电荷引起丝附近电场畸变的计算由图1所示。

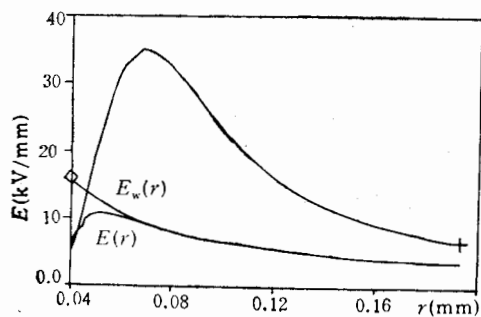


图1 计数管电场分布

E_w ——外加电场, $E_w(r) = \frac{V_0}{r \ln(b/a)}$

$E(r)$ ——雪崩到达 r 处的瞬时合成场

$E_s(r)$ ——沿着空间电荷锥轴向总合成场

三、计算步骤

先选取一个电压值 V (正比区或有限正比区)。1) 确定原初雪崩起始点 s 的位置(使 $\int_b^s \alpha(r) dr \geq 1$ 满足, $\alpha(r)$ 为工作气体的汤森系数; b 为计数管阴极半径; s 点对应的场强为 E_s)。2) 决定每一环的位置、电荷量及空间电荷环的半径。第 i 环的位置 p_i 由 $\exp\left[\int_s^{p_i} \alpha(r) dr\right] \geq 2^i$ 决定, α 由所在的 r 处

的电场 $E(r)$ 决定, $E(r) = E_w(r) + E_+(r)$ 。 E_w 是外加场强, $E_+(r)$ 为空间电荷在 r 处形成的场。第 i 环的电荷量 $Q_i = 2^{i-1} n_0$, n_0 为原初电离数, 环半径 $r_i = (4D_e t_i)^{1/2}$, D_e 是电子扩散系数, t_i 是电子由 s 到 p_i 的渡越时间。在各种气体比例下, V_0 ——漂移速度, D_e 由 WIRCHA 的软件计算得到, 最后输出总电荷量 $Q = n_0 \exp\left[\int_s^a \alpha(r) dr\right]$ 。 a 为阳极丝半径。3) 比较阳极丝表面的纵向电场 E , 是否小于 E_s , 若大于 E_s , 再检验是否大于该系统所能承受的最大电压(实验上给出的开始连续放电的电压值), 若大于该极限电压, 该系统无 SQS, 计算结束; 若小于该极限电压, 再增加电压, 重复上述计算, 直到丝表面的 E , 小于 E_s 。此时的电压 V 称为 SQS 转变电压 V_{tr} , 电荷量 Q 为转变点原初雪崩电荷量 Q_{pt} 。

在 V_{tr} 条件下, 计算初始雪崩结束时空间电荷形成的场和外加场的总合成场 E_s (见图1, $E_s(r)$ 和 $E(r)$ 不同)。确定 $E_s > E_s$ 的纵向位置 l_s 和横向半径 R 。定义流光长度为 l_s , 流光发展的体积为 $V_s = \frac{1}{3} \pi R^2 l_s$, 则 SQS 电荷量 $Q_{st} = \rho_s V_s$ 。

四、结果和讨论

计算不同气体组分下, 输出电荷量与工作电压的变化曲线, 如图2所示。模型满意地描述了正比、有限正比和 SQS 各区间的 $Q-HV$ 的变化特征。

对 Ar + CO₂ 系统 ($2a = 80 \mu\text{m}$, $2b = 36\text{mm}$), V_{tr} , Q_{pt} 和 Q_{st} 随猝灭气体成分 ($F = \frac{\text{CO}_2}{\text{Ar} + \text{CO}_2}$) 的变化如图 3.4.5 所示。由图可见, 模型预言的 V_{tr} , Q_{pt} 和 Q_{st} 随 F 的变化与实验结果满意地符合。

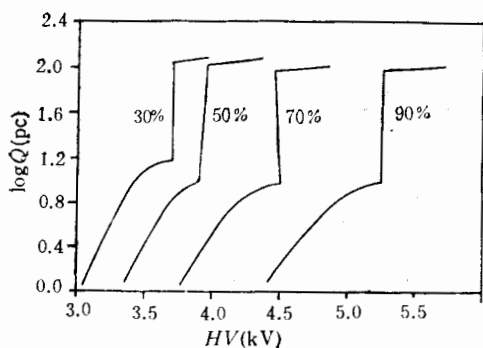


图 2 计数管输出电荷与外加电压的关系
($2a = 80\mu\text{m}$, $2b = 36\text{mm}$). 百分比为 CO_2 占的比例

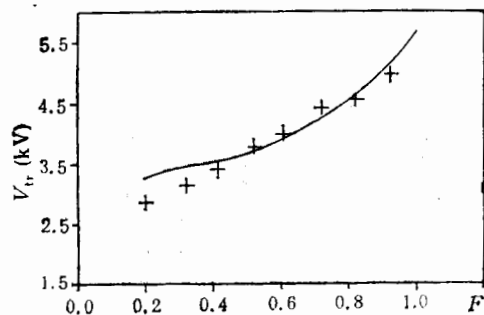


图 3 转变电压 V_{tr} 随 CO_2 含量的变化

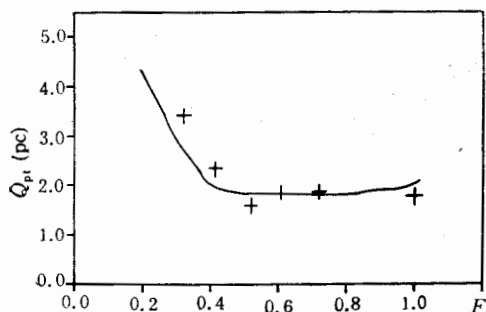


图 4 Q_{pt} 随 F 的变化 Q_{pt} 为 V_{tr} 时的有限正比电荷量

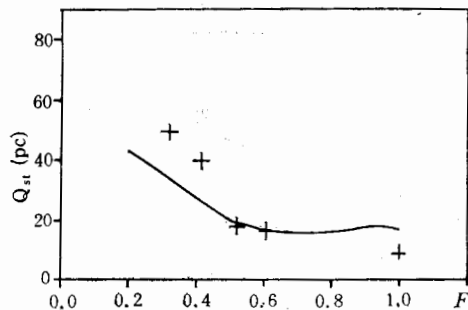


图 5 Q_{st} 随 F 的变化 Q_{st} 是在 V_{tr} 时的 SQS 输出电荷量

假定有限正比和 SQS 两种模式共存是由原初雪崩的统计涨落引起的。共存区的宽度随气体成分的变化也可以计算^[8]。

对于 $\text{Ar} + \text{CH}_4$ (+Methylal) 系统和 $\text{Xe} + \text{CO}_2$ (或 CH_4) 体系也做了研究。Methylal 的含量对 SQS 特性的影响也得到了与实验一致的结论。其他定量计算结果也均与实验给出的变化趋势相符。

我们还研究了: 1) 在 75% $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$ 体系 (阳极丝径 $2a = 80\mu\text{m}$, 阴极直径 $2b = 16\text{mm}$) 下, 气压变化对 SQS 的影响; 2) 在阴极直径 $2b = 36\text{mm}$, 气体成分为 50% $\text{Ar} + 50\% \text{CO}_2$ 系统中, 不同阳极丝径对 SQS 的影响。

结果表明, 计算与实验的符合程度令人满意。F 较小时的较大偏离大多是由光对放电过程的贡献造成的。光在放电过程中的作用是: 1) 使向 SQS 转变的转变电压降低, Q_{pt} 和 Q_{st} 变大。2) 使 SQS 局域性和稳定性变差。3) 易出现多次流光。光的作用大到一定程度, 放电将从 SQS 转到 GM 模式。

气体放电过程是相当复杂的, 众多影响因素盘根错节地关联着。若在这一简单模型基础上多考虑一些实际效应和过程, 将会使计算结果与实验符合得更好。并使这一模型的物理图象更清晰。我们正在做进一步改善这一模型的工作。

参 考 文 献

- [1] G. D. Alekseev et al., *Nucl. instr. & Meth.*, **A177**(1980), 385.
- [2] M. Atac et al., *Nucl. Instr. & Meth.*, **A200**(1982), 345.
- [3] 张良生,科学通报,**15**(1985),1136.
- [4] N. Koori et al., *IEEE Trans. N. S.*, **36**(1989), 223.
- [5] N. Koori et al., *IEEE Trans. N. S.*, **33**(1986), 895.
- [6] J. M. Geary et al., *Phys. Rev.*, **A17**(1977), 483.
- [7] 杨津基编著,〈气体放电〉.
- [8] 陈继革,许咨宗,第五次核电子学与探测器会议文集,兰州(1990).

A Mechanism for SQS Avalanche

CHEN JIGE XU ZIZONG CHEN HONGFANG MA WENGAN

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

ABSTRACT

Based on a large amount of experimental informations, it is assumed that SQS avalanche is developed when the electric field around the anode wire is heavily distorted by the space charge accumulated in the primary avalanche. Following this assumption the calculations are performed. The dependence of charge output on the high voltage of the counter is presented. Some key quantities, such SQS-transition voltage V_{tr} and charge output Q_{pt} and Q_{st} are calculated. Their dependence on gas composition is Presented.