

G-M计数器和核衰变的统计规律实验

主讲人：李武杰、龚意成

一、实验目的

∞ GM计数管是一种常用的核物理探测器，本实验是利用GM计数管研究放射性测量数据分布规律的实验。了解GM计数管的基本性能和使用方法，检验核衰变的统计律——泊松分布和高斯分布。学习放射测量结果的统计误差表示方法和 χ^2 检验方法。

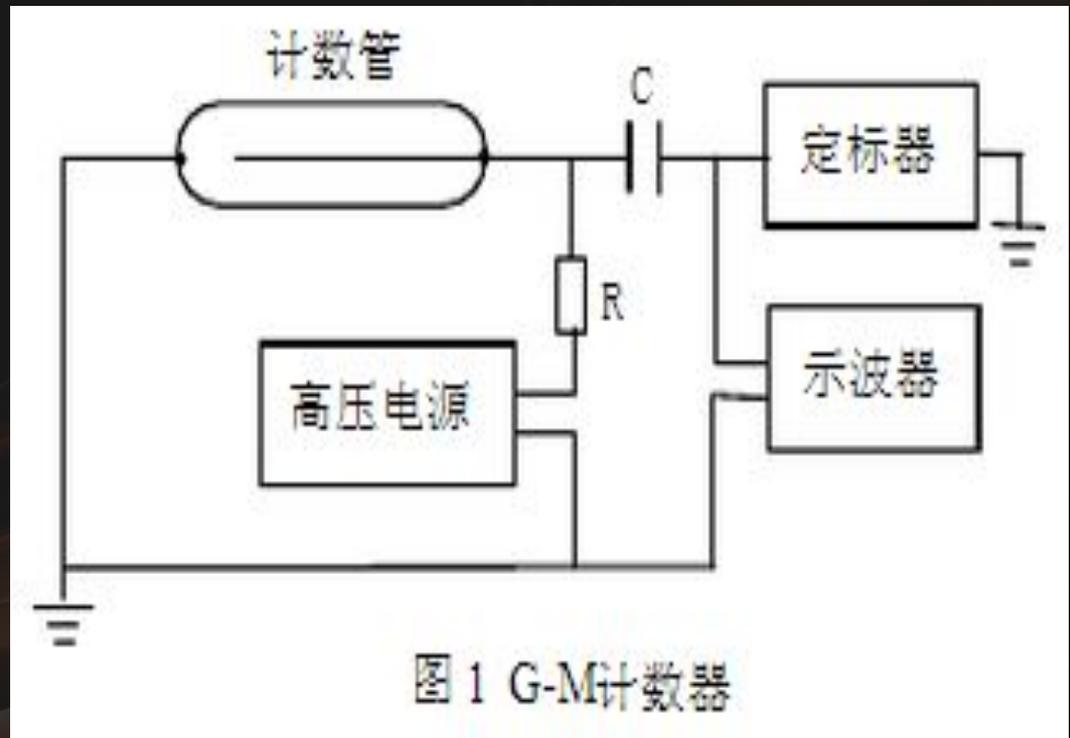
二、实验内容

- ∞ 1.观察G-M计数器的分辨时间和死时间。
- ∞ 2.观察放射源的计数率分布。
- ∞ 3.观察微分参数对G-M计数器的影响。
- ∞ 4.观察采样电阻对G-M技术器的影响。

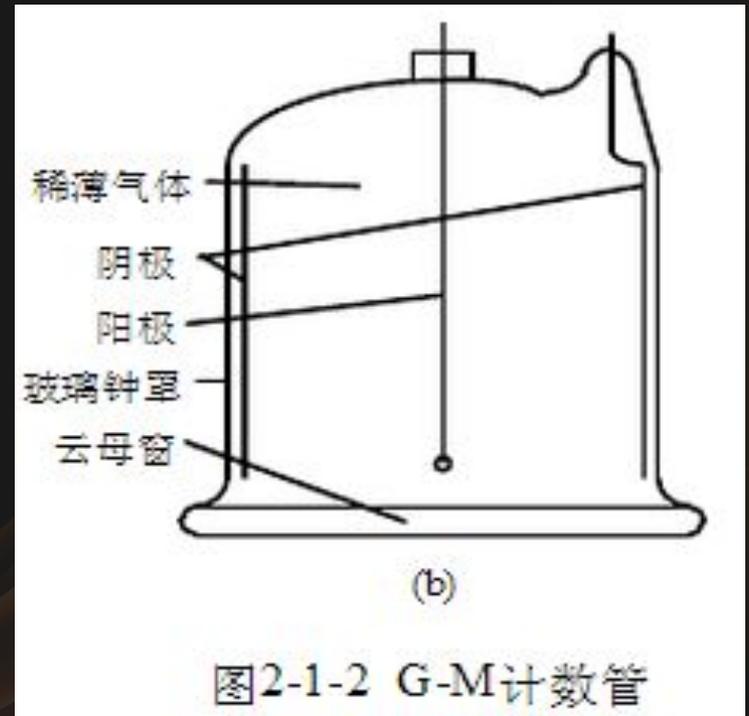
实验原理

∞ G-M计数器

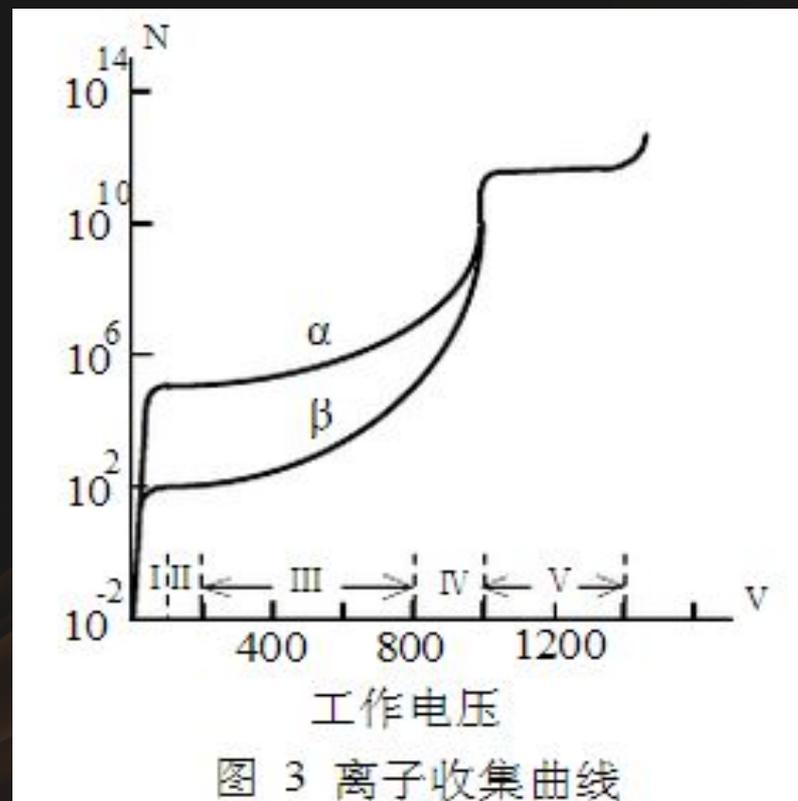
G-M计数器是核辐射测量中最基本的气体探测器之一,它主要用来测量 γ 射线和 β 射线的强度,也可用于测量 α 射线和X射线。



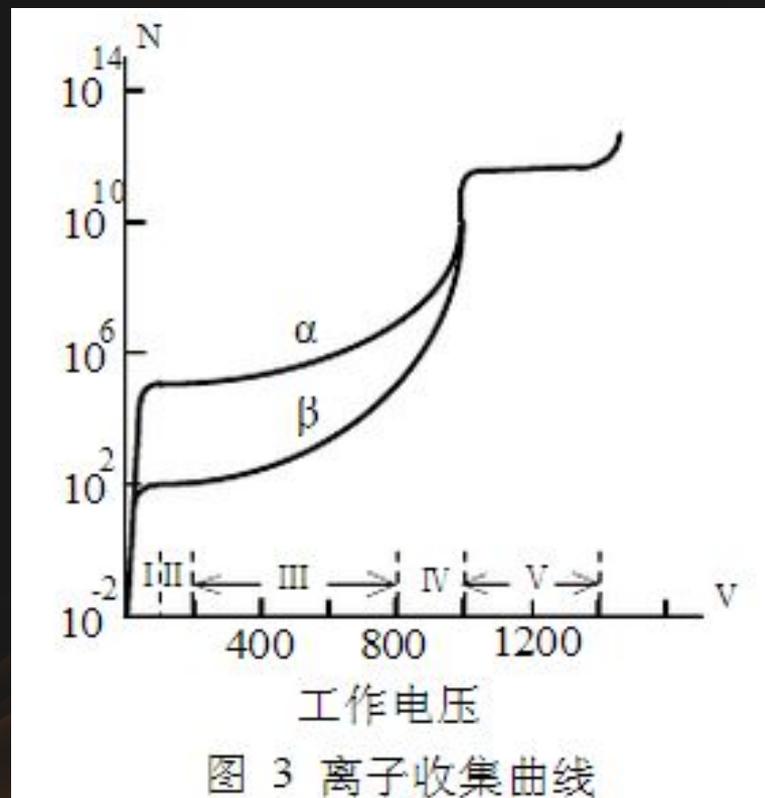
☞ 入射带电粒子穿过气体使气体分子电离而产生电子 - 正离子对。其中一些电离电子能量较大，还可以使气体分子进一步电离。实验证明，在很宽的能量范围内，总电离与入射粒子的能量成正比关系。



∞ 气体分子电离后，外加电场，电子(或负离子)与正离子会被电场拉开，沿电场方向漂移。在外加电场作用下收集电荷。

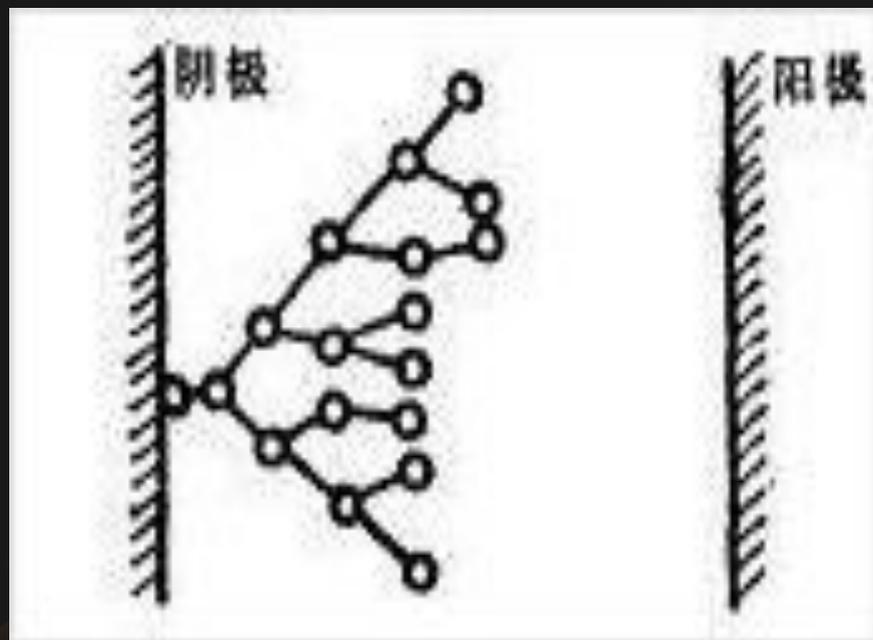


- ☞ 1.复合区
- ☞ 2.饱和区
- ☞ 3.正比区
- ☞ 4.有限正比区
- ☞ 5.G-M区



∞ 电子雪崩：

α 、 β 射线直接引起气体电离， γ 射线则主要利用与阴极相互作用产生的光电子、康普顿电子等来引起气体电离。这些电子-正离子对在计数管两极间的电场作用下，又会引发新的电离。



气体分子受到电子碰撞被激发，退激后会放出大量的光子，光子、电子电子的这种链式使电子产生爆发性增殖，称为电子雪崩。

∞ 死时间，恢复时间和分辨时间

这时，若再有粒子进入就不能引起放电，直到正离子鞘移出强场区，场强恢复到足以维持放电的强度为止。这段时间称为死时间 t_D 。

经过死时间后，雪崩区的场强恢复，但是在正离子完全被收集之前是不能达到正常值的。这期间，粒子进入计数管所产生的脉冲幅度要低于正常幅度，直到正离子全部被收集后才完全恢复，这段时间称为恢复时间 t_R 。从第一个脉冲开始到第二个脉冲幅度恢复到 V_0 的时间称为分辨时间。

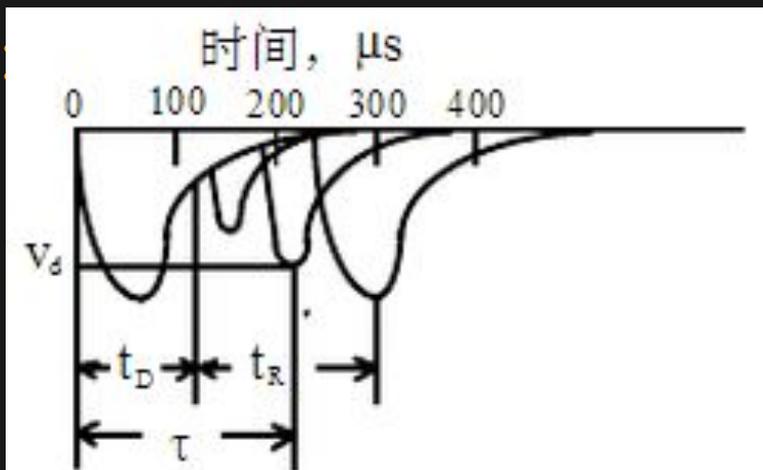


图4 观察G-M管死时间和恢复时间的示波图

∞ 核衰变统计规律与放射性测量的统计误差：

若多次记录探测器在相同时间间隔中所测到的粒子数目，每次测到的计数并不完全相同，而是围绕某个平均值上下涨落，这种现象就是放射性核衰变的统计特性，它是微观粒子运动过程中的一种规律性现象，是放射性原子核衰变的随机性引起的。

∞ 核衰变统计规律：

衰变遵从指数规律 $e^{-\lambda t}$ 衰减，它与放射源的半衰期 T 之间满足关系：

$$\lambda = \ln 2 / T。$$

∞ λ 称为衰变常数

∞ 二项式分布：

对于随机现象最基本的统计规律是二项式分布。

$$P(N) = \frac{N_0!}{(N_0 - N)!N!} (1 - e^{-\lambda t})^N (e^{-\lambda t})^{N_0 - N}$$

其中放射性核总数为 N_0 ，发生衰变的核数为 N ，二项式分布很不便于计算。由于对放射性原子核来说， N_0 总是一个很大的数目，在这种情况下，二项式分布可以简化为泊松分布。

∞ 泊松分布和正态分布（高斯分布）：

当 $N_0 \gg 1$ ，且测量时间 t 远小于放射源的半衰期 T ，即 $\lambda t \ll 1$ 时，二项式分布可简化为泊松分布。

当 $N \gg 1$ 时，泊松分布实际应用很不方便，这时可简化为正态分布。

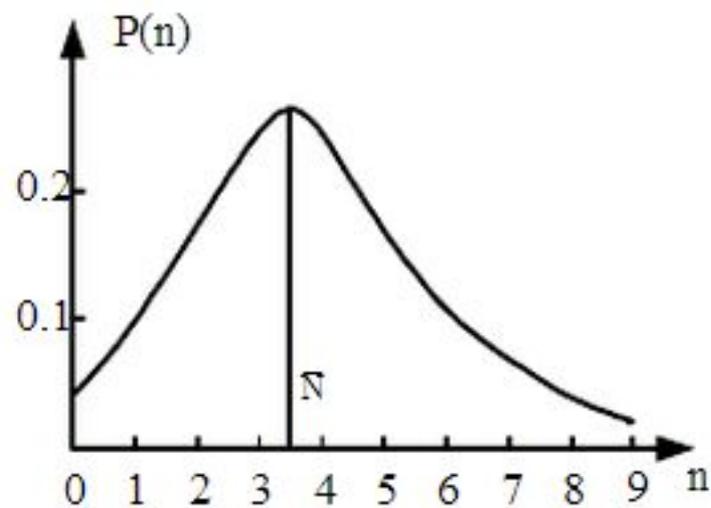


图 5 $N=3.5$ 的泊松分布

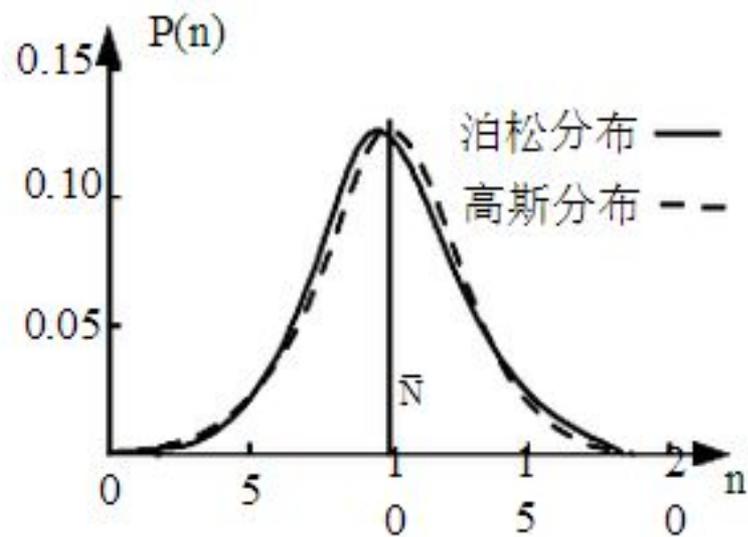


图 6 $N=10$ 的泊松分布和高斯分布

实验结果及分析

- 相关参数：

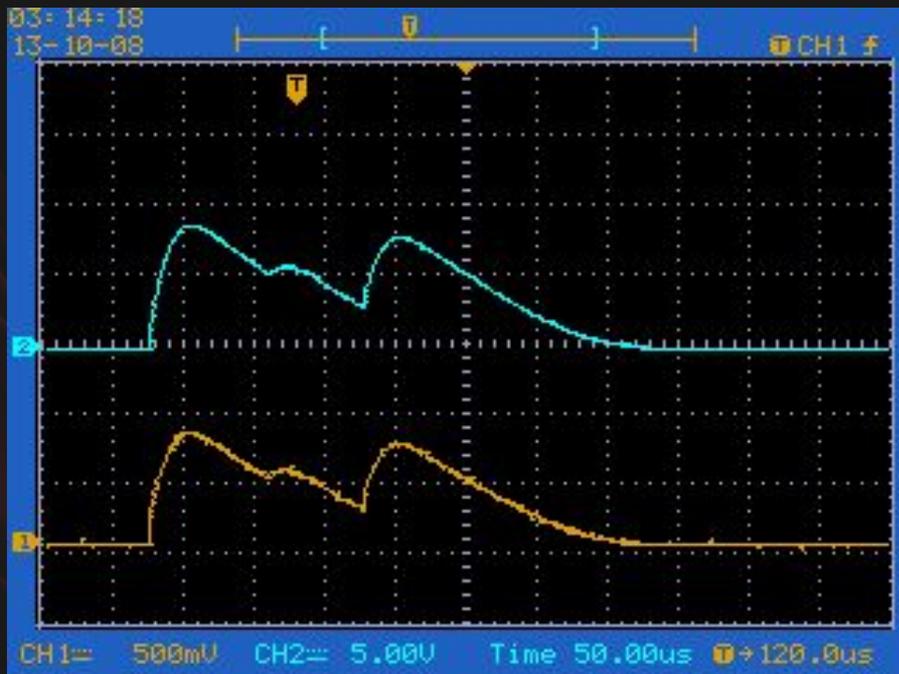
G-M计数器管压 $HV=600V$

线性放大器放大倍数 $A=5*1.7=8.5$

积分 $INT=0$ （线路故障）

1、死时间、分辨时间的观察

采样电阻 $R=25k\Omega$ ，X射线源 $U=15.0V$ ， $I=0.10mA$ ，并且不设置微分参数。



可得，系统死时间约为
 $75\mu s$ ，分辨时间约为
 $150\mu s$

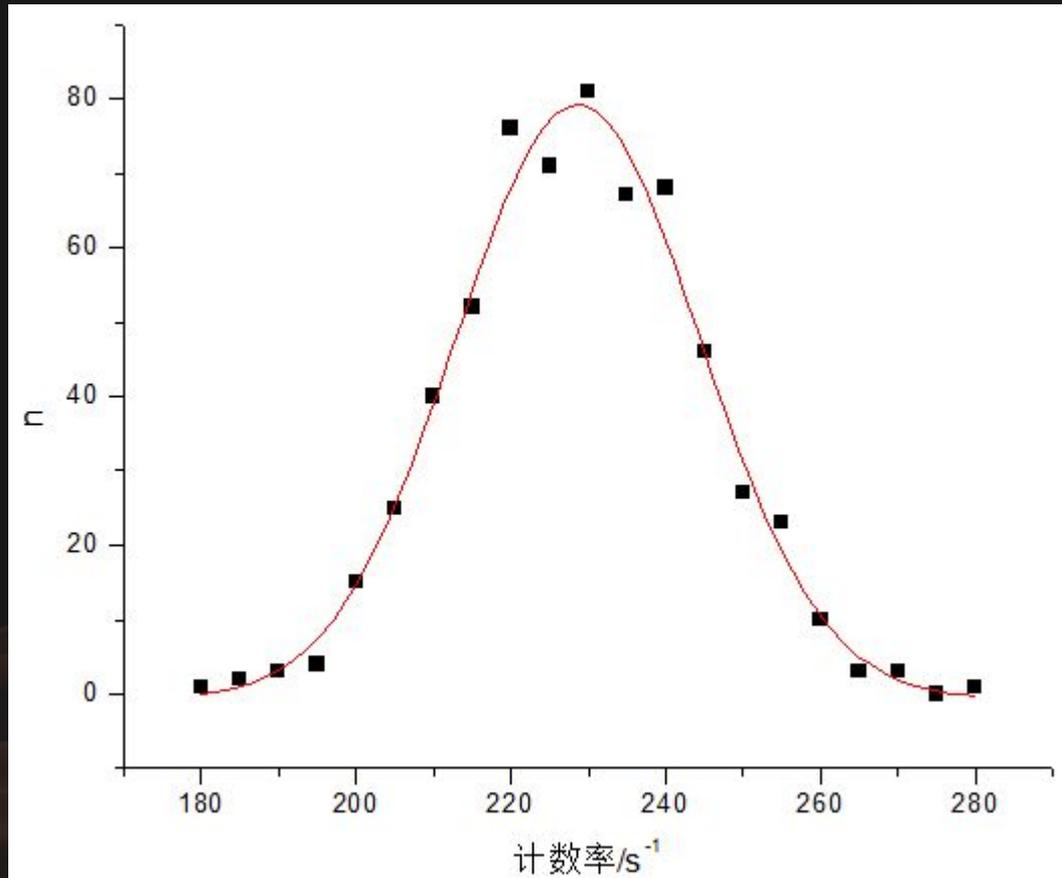
2、用 χ^2 检验放射源的计数率分布是否符合Poisson分布

采样电阻 $R=25\text{k}\Omega$

X射线源 $U=15.0\text{V}$

$I=0.10\text{mA}$

$\text{DIV}=1$

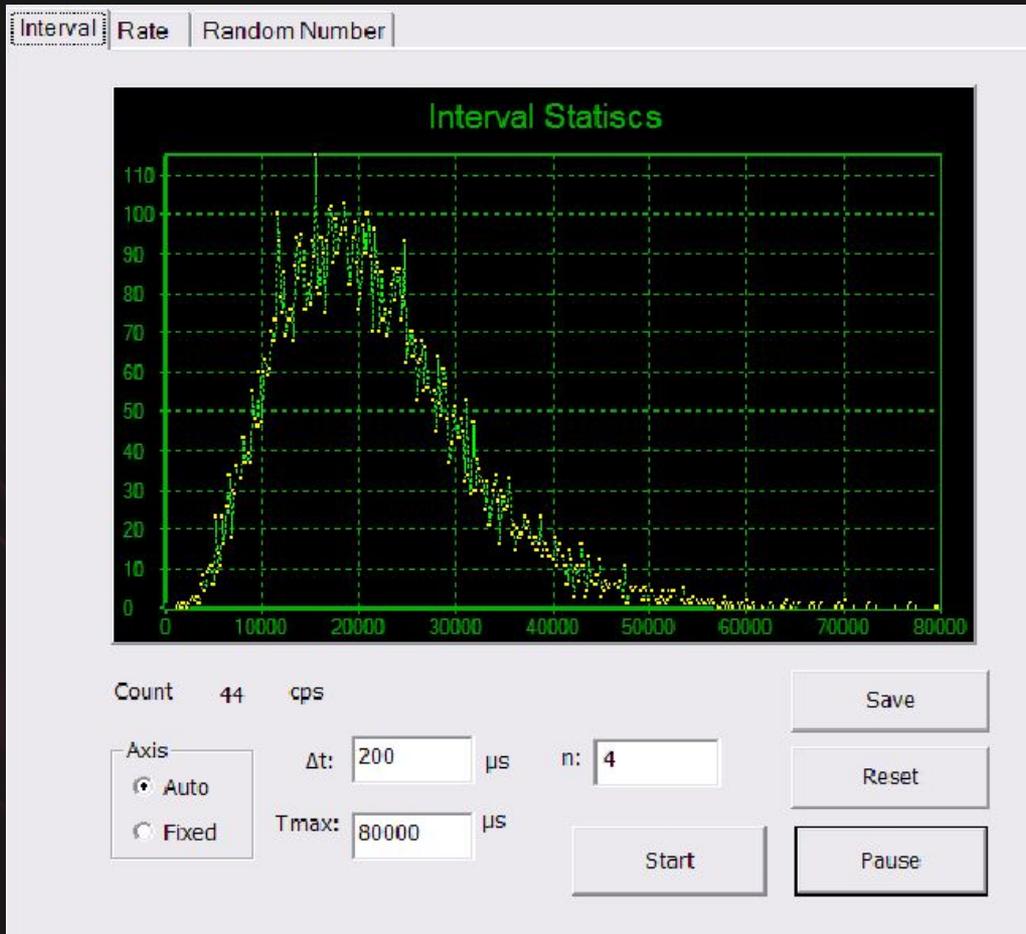


平均计数率： 228s^{-1}

		fi	pi	npi	fi-npi	(fi-npi) ² /npi
1	-180	1	0.000904	0.559	0.441	0.347908766
2	180-185	2	0.001651	1.021	0.979	0.938727718
3	185-190	3	0.004201	2.596	0.404	0.062872111
...
19	265-270	3	0.004934	3.049	-0.049	0.000787471
20	270-275	0	0.00212	1.31	-1.31	1.31
21	275-280	1	0.000768	0.475	0.525	0.580263158
	求和	618				16.7571625

- 按显著性水平 $\alpha=0.05$ ，自由度为 $21-1-1=19$ ，查 χ^2 分布表可知 $\chi^2(19)=30.14$ 。
- 因为 $\chi^2=16.76 < \chi^2(19)=30.14$ ，所以认为上述数据符合Poisson分布。

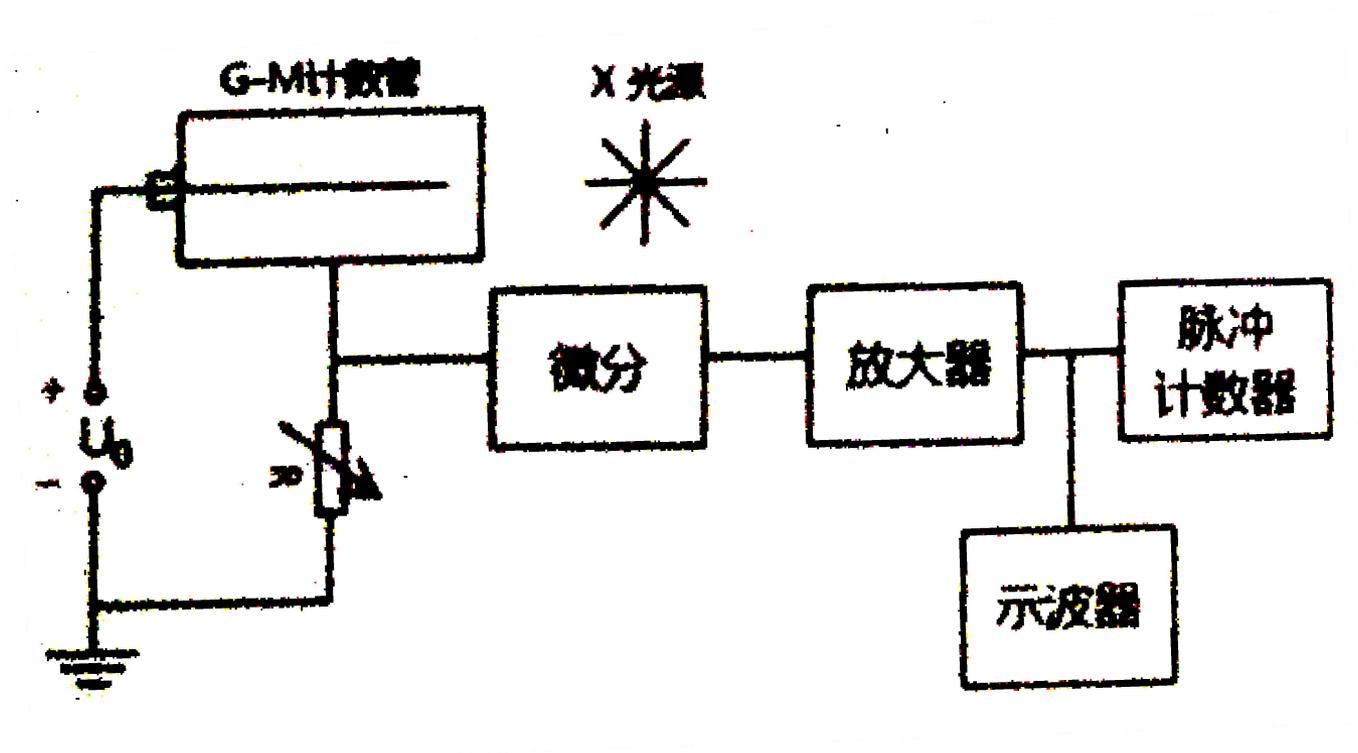
3、时间间隔分布



- 分布左右不对称
- 存在峰值，即有一个最可几间隔时间

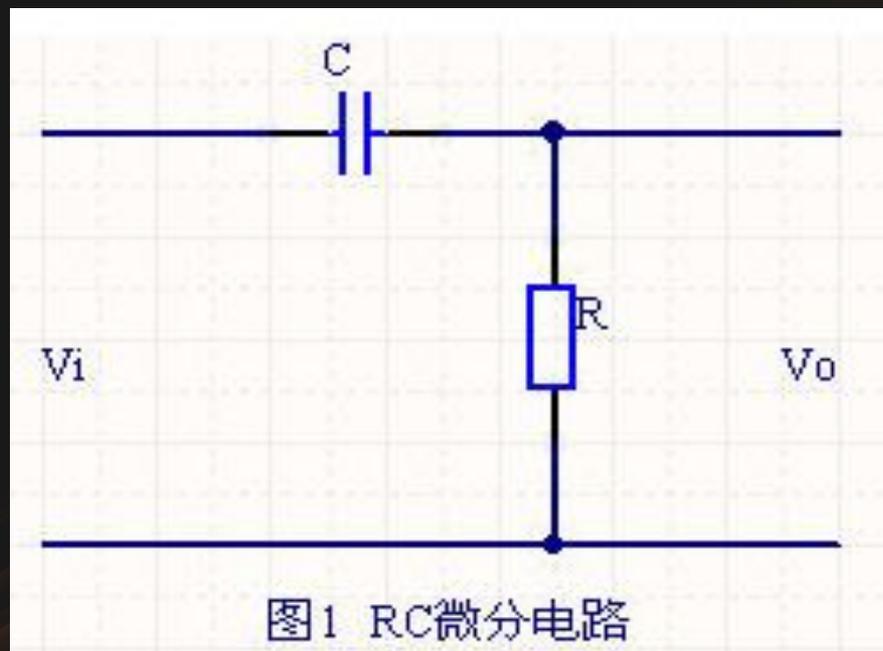
- 对上图进行分布检验，可知其不是泊松分布。
- 从上图中可得，4个脉冲之间的最可几间隔时间约为 $17500\mu\text{s}$ 。由之前得到得平均计数率可推算得，时间间隔分布中的最可几时间间隔与平均计数率之间存在着倒数关系。
- 由于存在分辨时间的影响，两个较小时间间隔到来的脉冲会难以区分，故小间隔计数会有一定丢失，所以上图不足以反映时间间隔的真实分布情况。

本实验所用核电子学系统示意图



RC微分电路

$$V_o(t) = RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$



4、系统本底电流大小

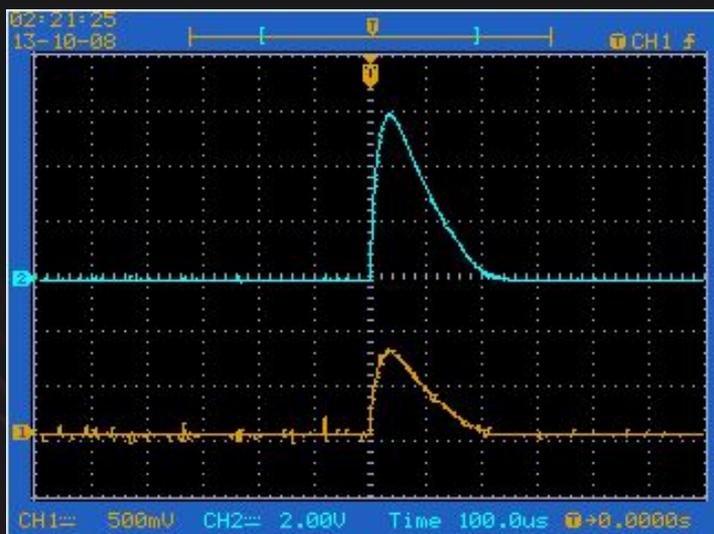
采样电阻 $R=25\text{k}\Omega$ ，X射线源 $U=15.0\text{V}$ ， $I=0.30\text{mA}$

记录阈值 (v)	n(DIV=MAX)	n(DIV=1)
0.02	720	615
0.03	550	610
0.04	530	610

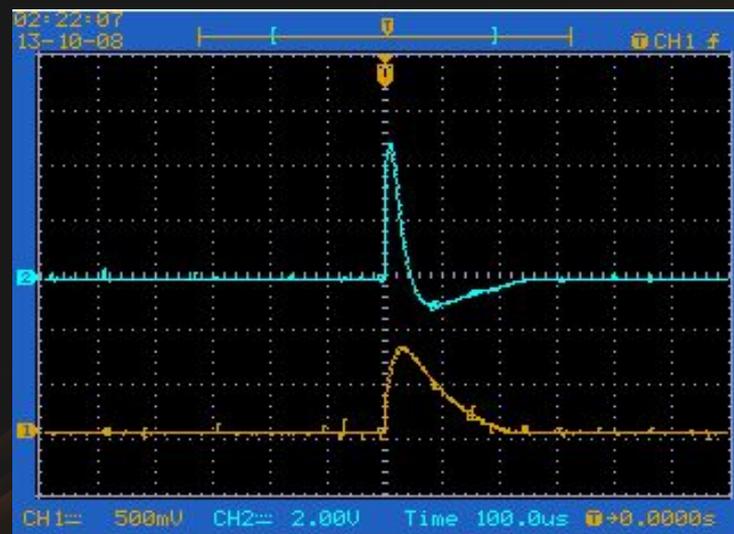
- 可以看出当阈值为 0.02V 时，无微分电路下，本底电流会被记录为辐射脉冲数，说明系统本底噪声为 $0.02\sim 0.03\text{V}$ ，符合热噪声的大小。其次，当系统加入微分参数后，相当于电路中引入一个电容，使得本底噪声被滤去。

5、微分参数对系统的影响

参数同1，采样电阻 $R=25k\ \Omega$ ，X射线源 $U=15.0V$ ， $I=0.10mA$



(a) 无微分下的波形示意图



(b) DIV=1下的波形示意图

- 改变X射线源电流 I ，分别考察有无微分情况下，其计数率的变化曲线

X射线源的放射率与电流大小 I 成线性关系，若不考虑系统分辨时间的因素，那么计数率 $n=kI+b$ ，即每记录一个脉冲需要的时间：

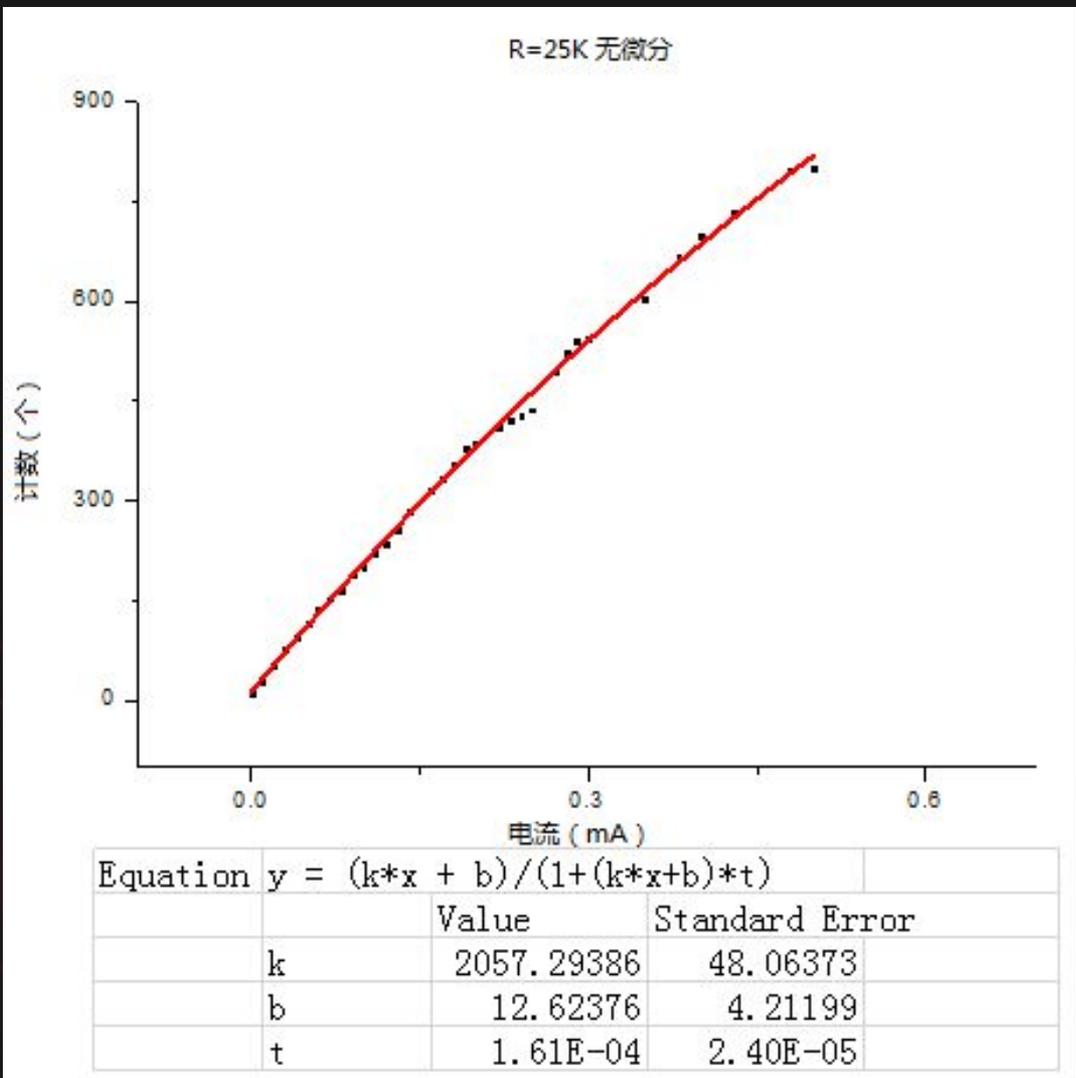
$$\frac{1}{n} = \frac{1}{kI + b}$$

但随着计数率增大，考虑分辨时间因素，则每记录一个脉冲所需的时间还需要加上分辨时间 τ 的修正：

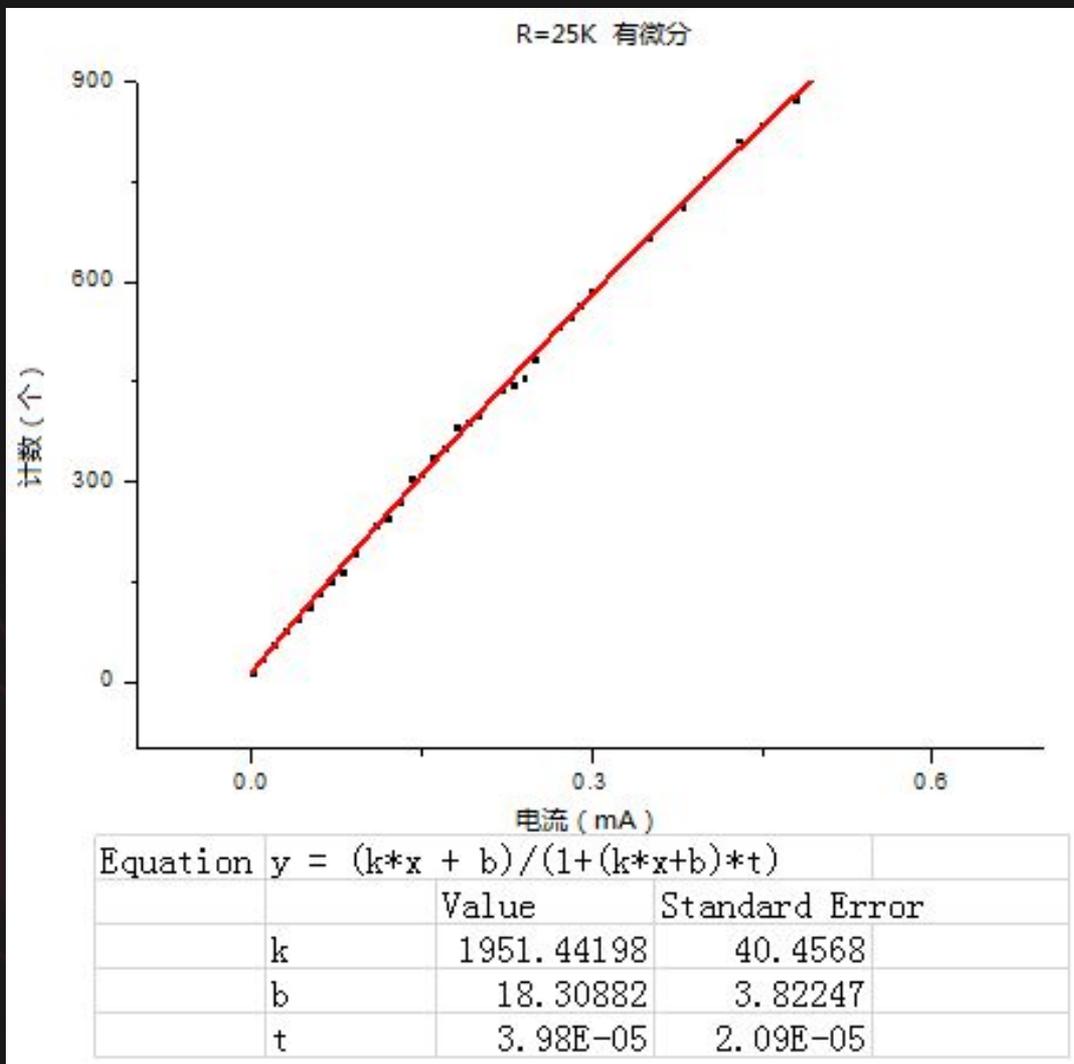
$$\frac{1}{n} = \frac{1}{kI + b} + \tau$$

最终的计数率满足：

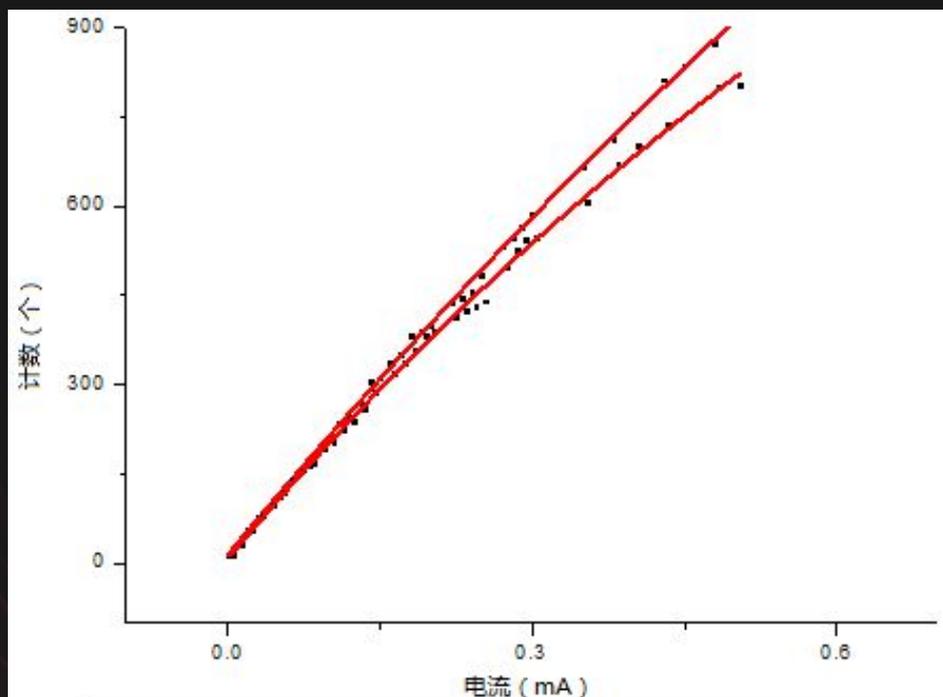
$$n = \frac{kI + b}{1 + (kI + b) \cdot \tau}$$



- 分辨时间 $\tau=161\mu\text{s}$
- 与之前用示波器观察得到的分辨时间相符合



分辨时间 $\tau=39.8\mu\text{s}$

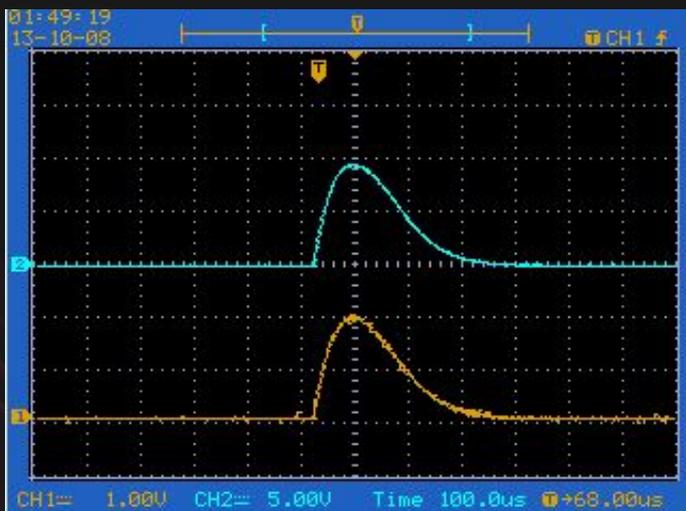


图：有无微分对系统的影响

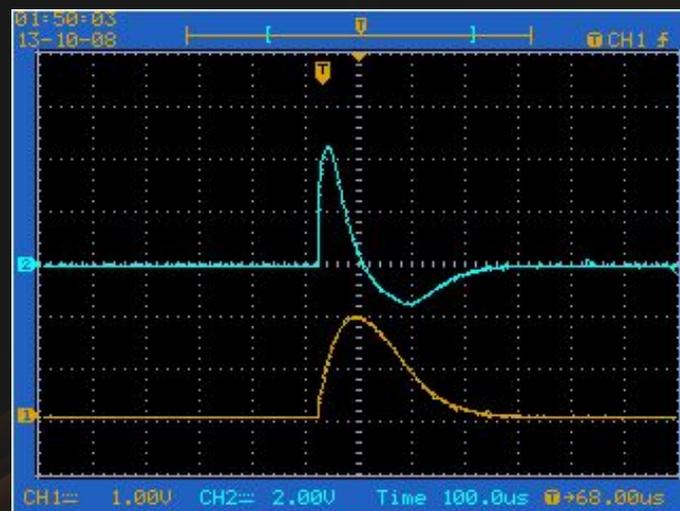
在有微分的情况下，电子学系统的分辨时间有很大减小，说明了在微分电路的作用下，脉冲之间因重叠而丢失的情况会减少，从而提高了G-M计数系统的性能。

6、采样电阻对系统影响

6.1 采样电阻增大至 $100\text{k}\Omega$ ，X射线源 $U=15.0\text{V}$ ， $I=0.10\text{mA}$



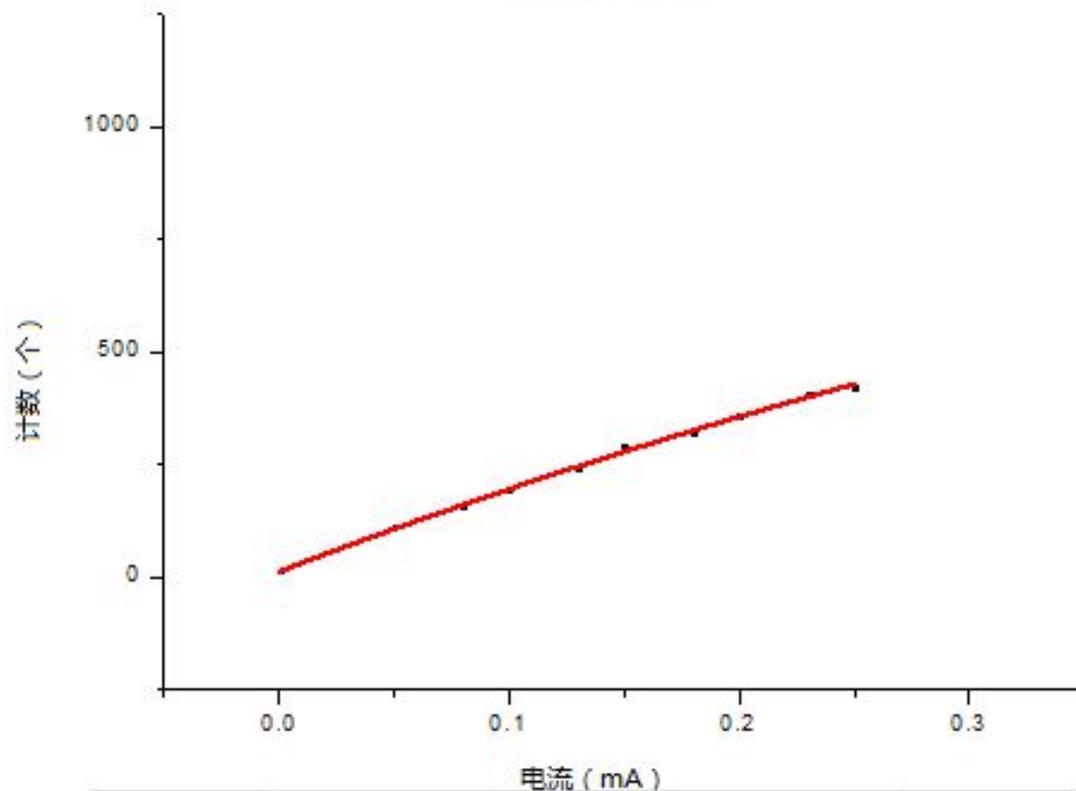
(a) 无微分下的波形示意图



(b) DIV=1下的波形示意图

- 相比于采样电阻 $25\text{k}\Omega$ 时的波形，其上升时间、下降时间和幅度都变大，即脉冲变宽、变高了。

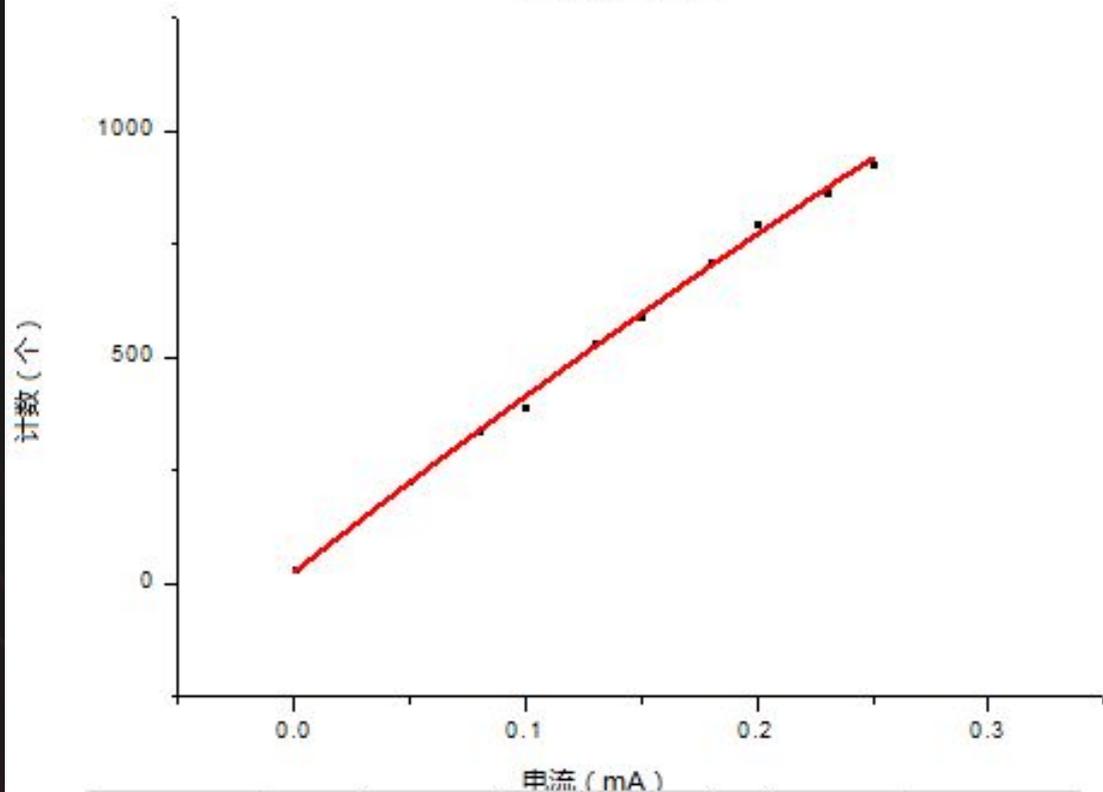
R=100K 无微分



Equation	$y = (k*x + b)/(1+(k*x+b)*t)$		
	Value	Standard Error	
k	1977.28941	100.39325	
b	12.08822	5.25727	
t	3.58E-04	9.61E-05	

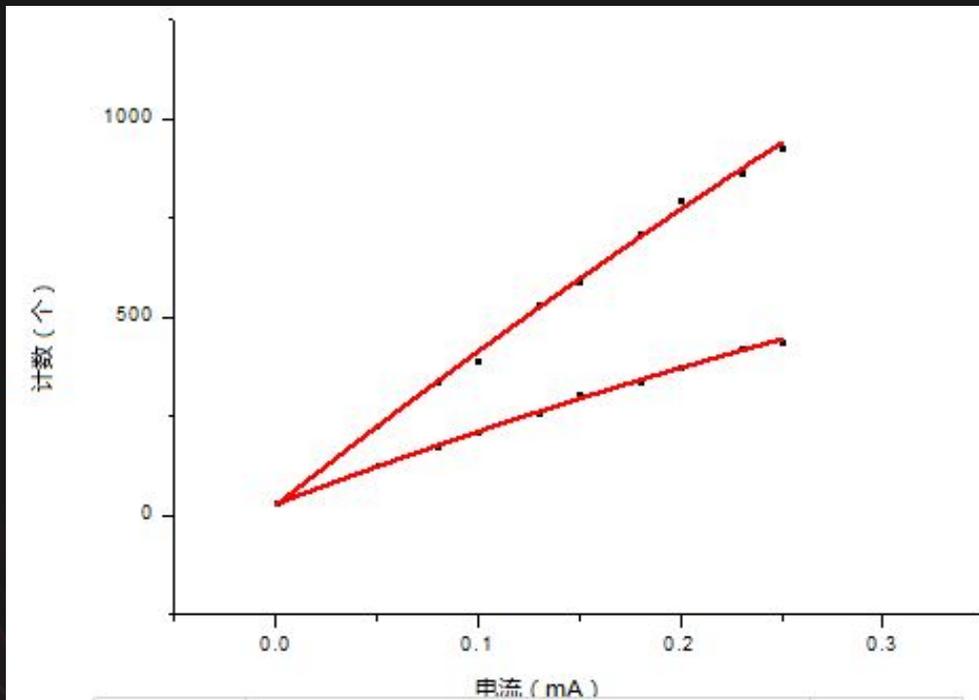
分辨时间 $\tau=358\mu\text{s}$

R=100K 有微分



Equation	$y = (k*x + b)/(1+(k*x+b)*t)$		
	Value	Standard Error	
k	4069.93617	262.2441	
b	25.04595	14.15264	
t	1.05E-04	5.81E-05	

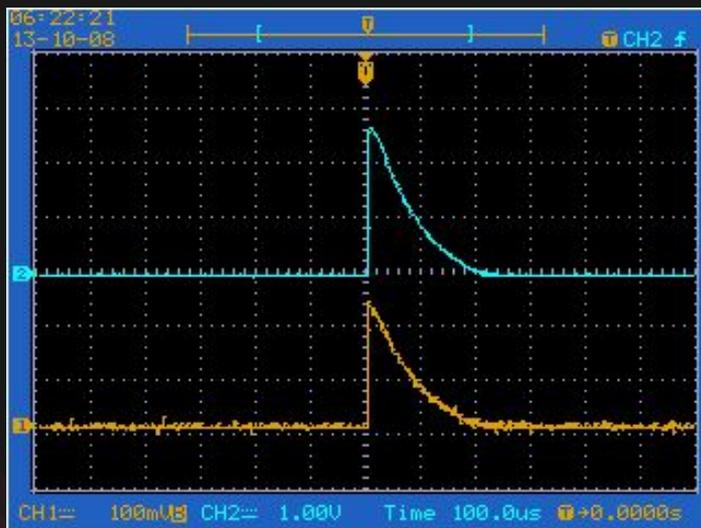
分辨时间 $\tau=105\mu\text{s}$



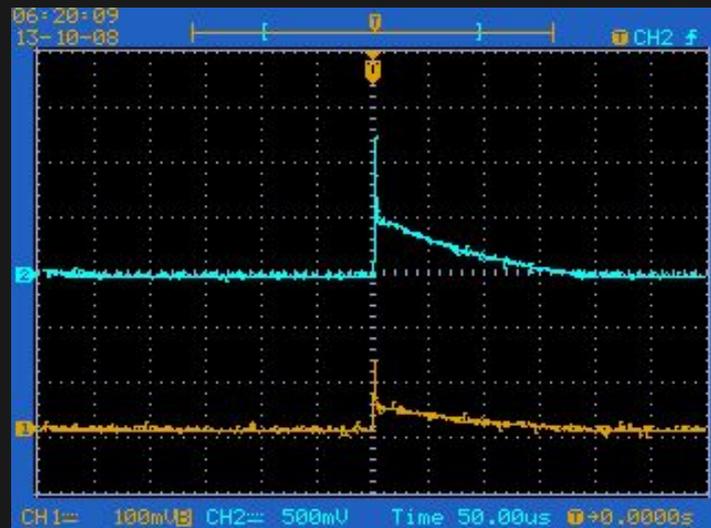
图：100kΩ时微分对系统的影响

当采样电阻变大后，脉冲变宽，故信号重叠情况增多，相同条件下，系统的分辨时间也就比25kΩ的时候更大。并且，在这种情况下，微分电路对系统的改善作用更加明显。

6.2 采样电阻减小至 $5\text{k}\Omega$ 和 $1\text{k}\Omega$ ，不加微分

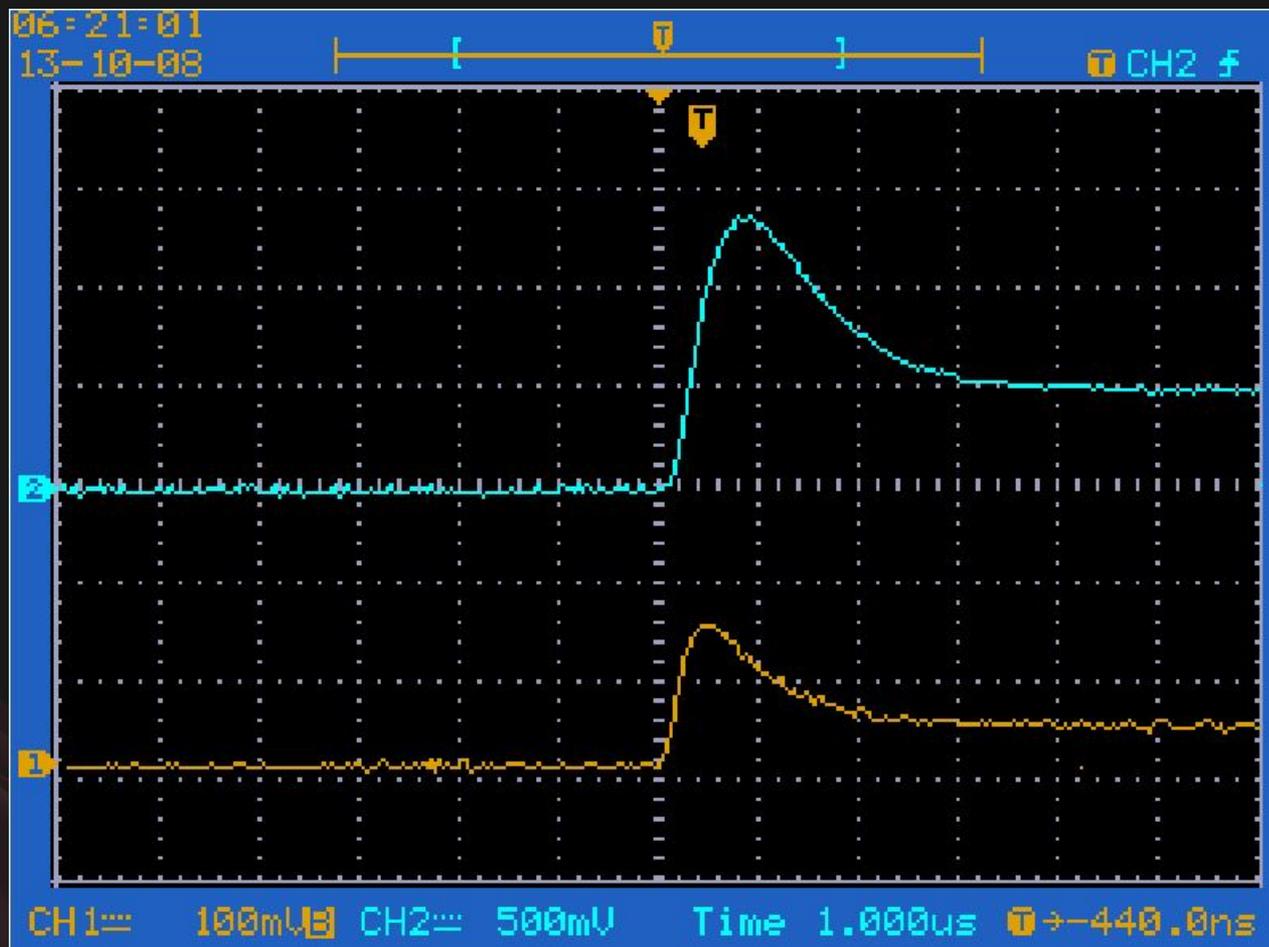


(a) $R=5\text{k}\Omega$ 的波形示意图



(b) $R=1\text{k}\Omega$ 的波形示意图

- 采样电阻进一步减小后，脉冲的上升时间变得越来越小。并且随着采样电阻达到 $1\text{k}\Omega$ 时，脉冲的下降过程会分为两段。



图：小采样电阻下的脉冲示意图

- **G-M**计数器的脉冲是由于电子和正离子鞘在电场中漂移产生的，其中，电子收集过程是快于正离子鞘收集过程的。而当外电路的RC时间常数较大（R为25k Ω ，100k Ω ）时，正离子鞘能在RC时间内漂移至阴极，故只有一段脉冲后沿。但当RC较小时，即小采样电阻下，在电子的收集很快完成时，正离子鞘还未完全在RC时间内被阴极收集，故会看到脉冲后沿被分为两段，前一段较快的下降沿主要是电子的贡献，后一段则是正离子鞘的贡献。

实验结论

- 1. 在采样电阻 $R=25\text{k}\Omega$ ，X射线源 $U=15.0\text{V}$ ， $I=0.10\text{mA}$ ，无微分下，观察得系统死时间约为 $75\mu\text{s}$ ，分辨时间约为 $150\mu\text{s}$ 。
- 2. 放射源计数率符合泊松分布。
- 3. 微分电路降低了分辨时间。
- 4. 较大的采样电阻会使计数丢失显著。