

闪烁体荧光时间特性的观测与分析

实验目的

1. 学会正确使用数字示波器来分析闪烁计数器的输出脉冲波形。
2. 学会根据记录的波形了解闪烁体的时间特性。

实验原理

闪烁计数器是一种应用非常广泛的重要粒子探测器,它由闪烁体、荧光光子检测器两个基本元件组成。

1. 闪烁体: 主要是塑料闪烁体以及各种无机闪烁晶体。例如: NaI(Tl)晶体、CsI(Tl)晶体、锗酸铋晶体(BGO)等。它们的作用是将通过闪烁体的粒子 (α 、 β 、 γ 以及 μ 子、 π 介子等) 沉积的能量转换成闪烁荧光光子。

2. 荧光光子检测器: 包括各种光敏检测器, 最常用的是光电倍增管。光电倍增管的作用是将闪烁体输出的荧光光子转换成光电子, 并对原初光电子进行倍增, 最后在光电倍增管的阳极输出回路形成一个与输入的荧光脉冲相对应的电流脉冲。过程见图 20-1。

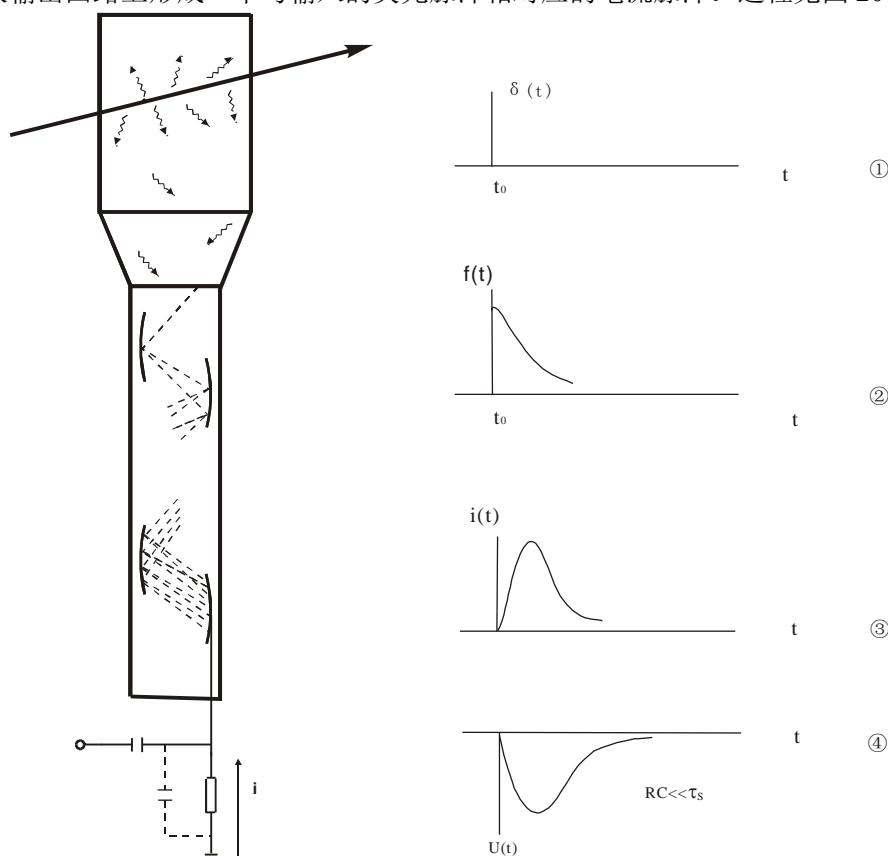


图 20—1 闪烁体时间特性实验原理图

图 20—1 中:

图①: 粒子通过闪烁体与闪烁体原子、分子发生相互作用, 沉积能量。这种过程持续时间为皮秒 (10^{-12}s) 量级, 能量沉积响应近似为 $\delta(t_0)$ 。

图②: 沉积的能量在闪烁体中激发形成闪烁荧光发光中心, 过程近似为 $\delta(t_0)$, 之后发光强度随时间的变化 $f(t)$ 依时间常数 τ_s 按指数衰减, τ_s 与闪烁体的荧光发射机制有关。例如 NaI(Tl) 晶体 $\tau_s \sim 230\text{ns}$, BGO: $\tau_s \sim 300\text{ns}$, 塑料闪烁体: $\tau_s \sim 1\text{-}2\text{ns}$ 。有的闪烁体荧光的时间过程由多种时间常数决定。若光在闪烁体中的传输和收集时间忽略不计, ②中 $t_0 \sim t_0$ 。

图③: 光电倍增管阳极单位时间收集电子数随时间变化。由于光阴极光电转换过程和打拿极的倍增过程的时间晃动和时间延迟, 单位时间电子数脉冲形状仅近似为荧光脉冲形

状，前沿由于度越时间的分散而上升变慢，后沿衰减时间常数 τ 近似为 τ_s ，它携带着闪烁体的荧光时间特性的信息。所以它是荧光时间分布在时间轴上移动了 t_d 后与光电倍增管单光子度越时间分布函数的卷积。

$$f(t+t_d) \odot Ts(t) \equiv n_e(t),$$

$$i(t) = dn_e / dt \circ$$

图④：光电倍增管的输出电压脉冲波形 $U(t)$ ，是电流脉冲 $i=dn_e(t)/dt$ 在光电倍增管的输出 RC 回路上形成的。通过解电路方程，可以求解输出电压脉冲波形 $U(t)$ 。对于 $i(t) = i_0 e^{-t/\tau_s}$

$= \frac{Q_0}{\tau_s} e^{-\frac{t}{\tau_s}}$ 的电流脉冲波形，可以精确解出电压脉冲波形

$$U(t) = \frac{Q_0 R}{RC - \tau_s} (e^{-t/RC} - e^{-t/\tau_s}) \quad , \quad (1)$$

其中 RC 为输出回路时间常数， Q_0 为阳极收集的总电荷， τ_s 为荧光脉冲的衰减时间常数。通过已知衰减时间常数的晶体得到的输出波形，拟合求得输出回路的 RC (标定系统的 RC)。标定系统的 RC 之后，可以根据测得的波形，用公式 (1) 来拟合，就能定出闪烁体的荧光时间特性。在 $RC \ll \tau_s$ 情况下，由式 (1) 可以得到

$$U(t) = \frac{Q_0 R}{\tau_s} (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/RC}) \circ$$

输出脉冲的最大幅度为 $Q_0 R / \tau_s$ ，输出脉冲后沿衰减时间常数 $\sim 2.3 \tau_s$ 。

另一种观测闪烁体荧光衰减的方法是图 A 的闪烁体以下的部分看成一个系统，先用契伦柯夫辐射作为 δ 光源直接照射光阴极，记录输出脉冲波形，该脉冲波形就是系统对 δ 光源的响应函数 $* (t)$ 。用闪烁体取代契伦柯夫辐射体 (有机玻璃)，设闪烁体的荧光时间分布 $f(t)$ ，则其输出波形为

$$W(t) = f(t) \odot \delta(t) \circ$$

通过退卷积，可以求得荧光时间分布 $f(t)$ 。

实验内容

1. 观测闪烁体荧光时间特性对输出波形的影响，辨认快慢闪烁体。
2. 观测光电倍增管输出回路的时间常数对输出脉冲波形的影响。
3. 用 δ 光源测定光电倍增管的响应函数 $* (t)$ 。
4. 分析记录不同闪烁体的荧光衰减时间常数 τ_s 。

实验仪器和样品

1. 记录单次脉冲的数字存储示波器
2. 可切换闪烁体的闪烁计数器系统，包括高压电源。
3. 契伦柯夫辐射体 (有机玻璃)，NaI(Tl)，CsI(Tl)，塑料闪烁体，氟化铈晶体(CeF₃)。

实验步骤

1. 选择1#样品有机玻璃，设定光电倍增管输出回路 $R=50 \Omega$ 。
2. 加光电倍增管高压至规定值。
3. 在数字示波器上记录宇宙线通过样品产生的脉冲波形,记录存储10个事例的波形。
4. 分别置入其它样品，同样记录存储10个波形。
5. 置入NaI(Tl)晶体，改变输出回路的负载电阻，在每种 R_X 参数下记录5个波形。

实验结果分析与讨论

1. 根据输出的波形数据，以NaI(Tl)晶体的波形为参考，设 $\tau_s=250\text{ns}$ ，由式 (1) 拟合输出回路的 RC 。
2. 用已知的 RC 将其它样品的波形与式 (1) 拟合，求各个样品的 τ_s 。

3. 用1#样品的输出波形作为响应函数 $* (t)$ ，通过退卷积求出各样品的 $f(t)$ 。
4. 对实验步骤⑤的数据($R=1\text{M}\Omega$)，通过对输出波形的后沿的拟合，求出输出回路的分布电容 C 。

思考题

1. 宇宙线 μ 子通过有机玻璃样品和通过闪烁体引起的光信号的形成机理有什么本质区别？
2. 为什么有机玻璃样品给出的光信号可以看成一种近似的 δ 光源？

参考文献

- [1] Nakamura K, Amsler C, Particle Data Group. Particle physics booklet. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2010, 37(7A): 075021.
- [2] 徐克尊等编，粒子探测技术，上海科学技术出版社，1981。