



核工程与核技术专业必修课程

核辐射探测

——正比计数器

国防科技大学 田立朝

Tel: 13203154469

Email: tianlichao_2004@163.com

中国人民解放军国防科技大学
NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY



正比计数器

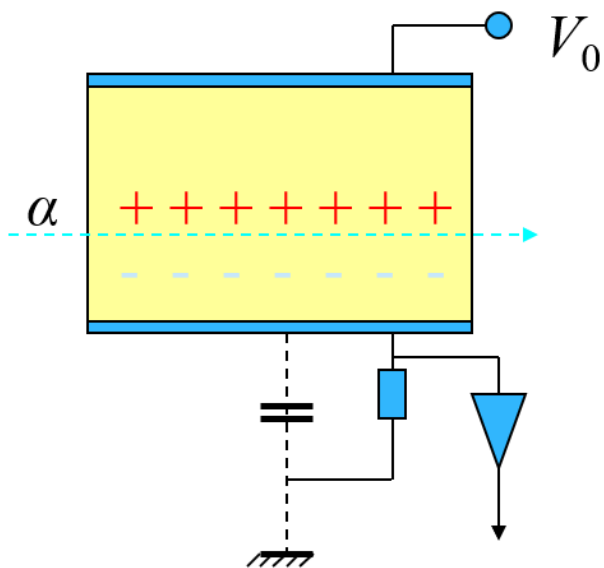
1. 知识回顾
2. 正比计数器工作原理
3. 正比计数器输出信号
4. 课堂小结

正比计数器

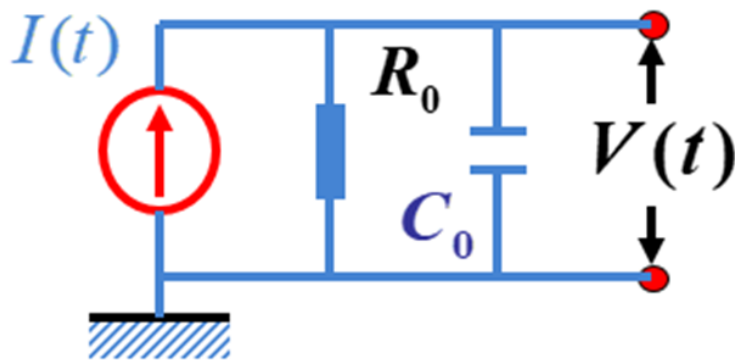
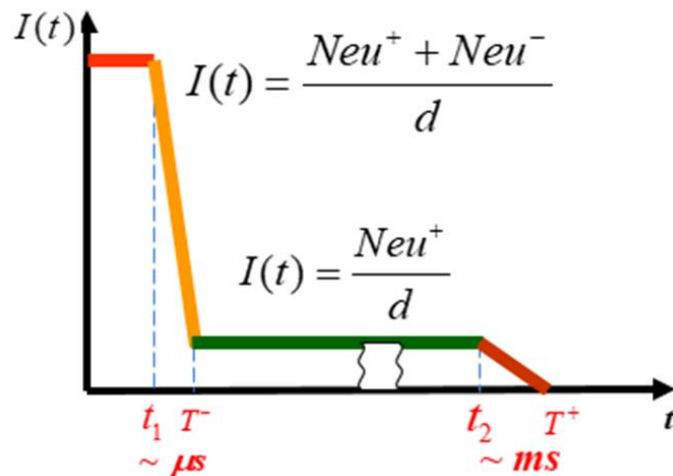
1. 知识回顾
2. 正比计数器工作原理
3. 正比计数器输出信号
4. 课堂小结

1. 知识回顾

平板电离室



$$V_{\max} = \frac{N_0 e}{C_0} = \frac{E}{W} \cdot \frac{e}{C_0} \propto E$$



1. 知识回顾

平板电离室

对于能量为 1 MeV 的 α 粒子，若 $W = 30 \text{ eV}$ ，电容大小为 $C_0 = 10 \text{ pF}$ ，电离室输出电压多大？

$$V_{\max} = \frac{N_0 e}{C_0} = \frac{10^6 \text{ eV}}{30 \text{ eV}} \times \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{10^{-11} \text{ F}} = 5.333 \times 10^{-4} \text{ V}$$

- 外加放大器？
- 内部放大？

正比计数器

电压太小？



正比计数器

1. 知识回顾
2. 正比计数器工作原理
3. 正比计数器输出信号
4. 课堂小结

2. 正比计数器工作原理

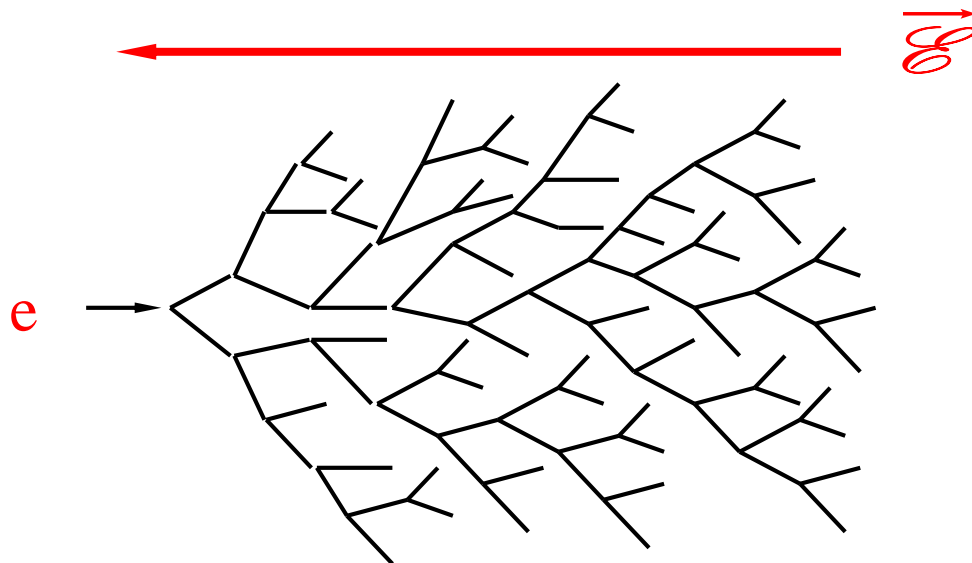
- 正比计数器：利用**碰撞电离**将入射粒子直接产生的电离效应进行**放大**，使得正比计数器的输出信号幅度比脉冲电离室显著增大。
- 要求：
 - ① 放大
 - ② 均匀：不同位置入射粒子放大倍数一致

2. 正比计数器工作原理

1 结构特点

➤ 强电场 $>10^4 \text{ V/cm}$ —— 须满足碰撞电离的需要

标准大气压下，电子在气体中的平均自由程约 $10^{-3}\sim 10^{-4} \text{ cm}$ ，
气体平均电离电位 $\sim 30 \text{ eV}$ ，若电子能量在一个自由程就
达到电离电位，需要电场强度 $>10^4 \text{ V/cm}$ 。

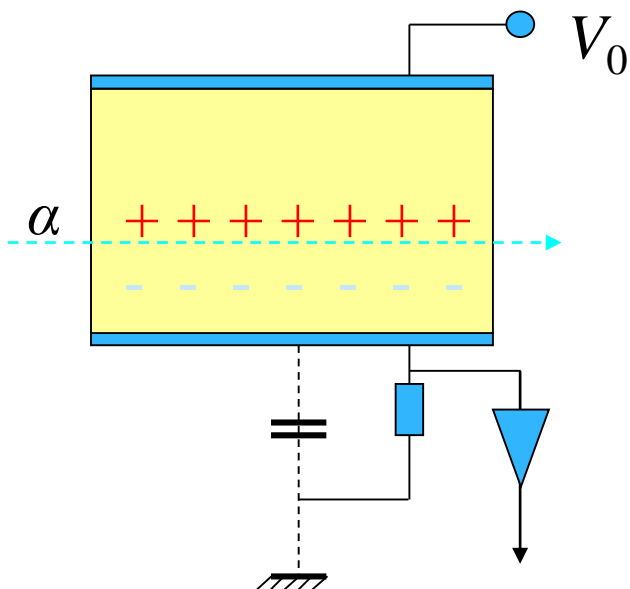


2. 正比计数器工作原理

1 结构特点

➤ 强电场应易于实现

是否可以采用平板电离室的结构？



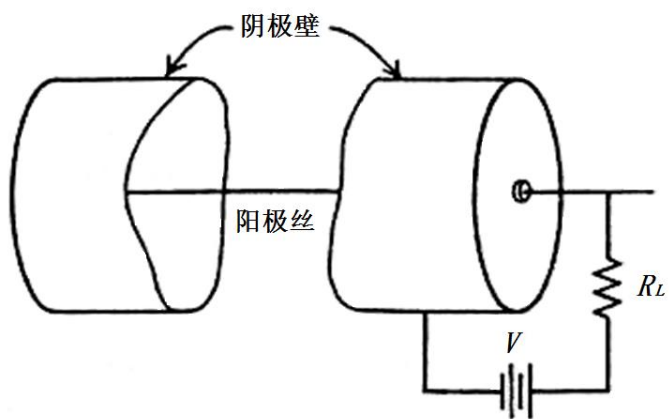
如何实现强
电场？



2. 正比计数器工作原理

1 结构特点

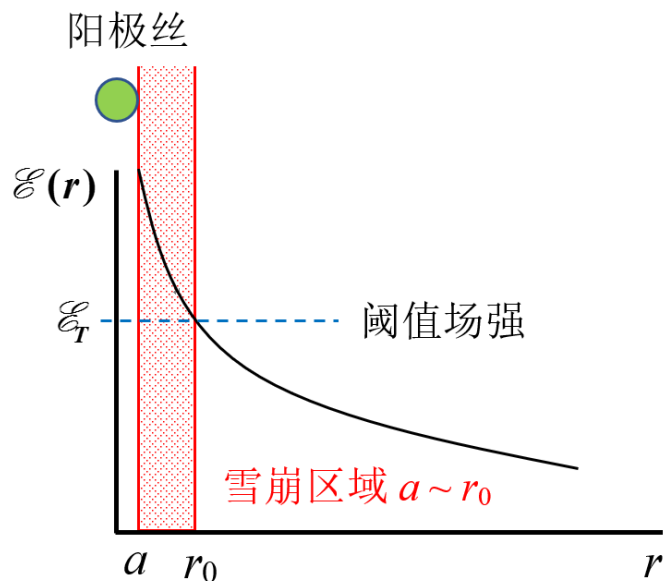
采用非均匀电场，一般以圆柱型为主（盘、球亦可）



2. 正比计数器工作原理

1 结构特点

设计思想： 利用圆柱形电场的特点，在阳极丝附近产生小范围的强电场区域。



场强分布：

$$\mathcal{E}(r) = \frac{V_0}{r \ln b/a}$$

阈值电压：

$$V_T = \mathcal{E}_T \times a \cdot \ln b/a$$

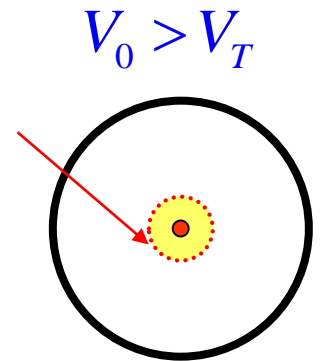
2. 正比计数器工作原理

1 结构特点

当 $V_0 > V_T$ 时，仅在 $a \sim r_0$ 区间内发生碰撞电离。

➤ r_0 很小，入射粒子在 r_0 内产生初始电离的可能性很小，可以忽略。

雪崩区域：
 $a \sim r_0$



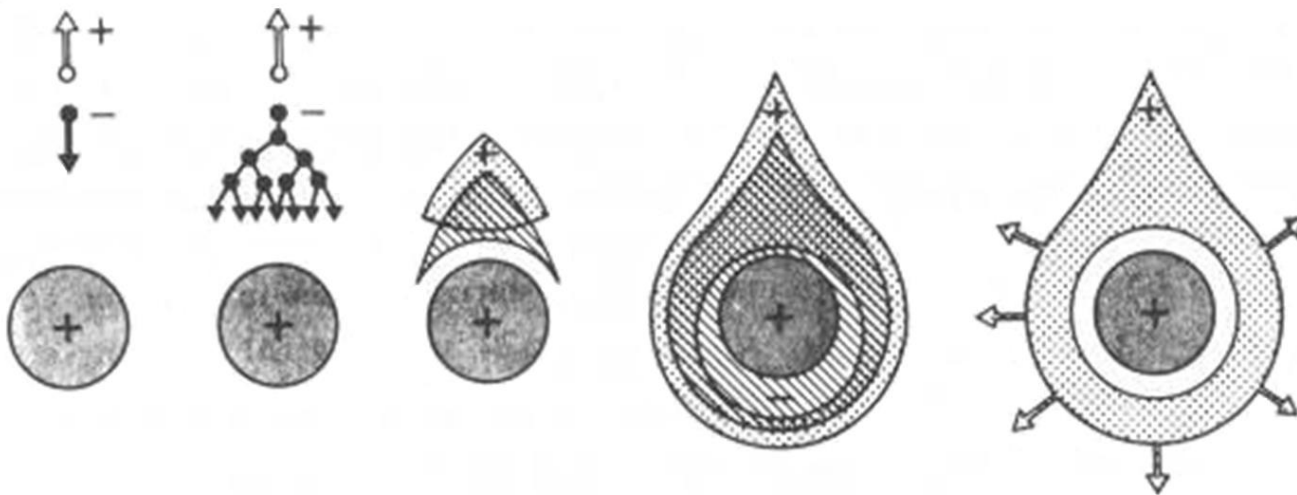
例： $V_0 = 2000 \text{ V}$ ， $a = 0.01 \text{ cm}$ ， $b = 1 \text{ cm}$ ，
阈值场强为 10^4 V/cm ， 则 $r_0 = 0.043 \text{ cm}$ ，
因此，雪崩区体积仅占 0.18% 。

➤ 不同位置的初始电离电子都经过同样的气体放大区域，具有相同放大倍数。

2. 正比计数器工作原理

2 气体放大

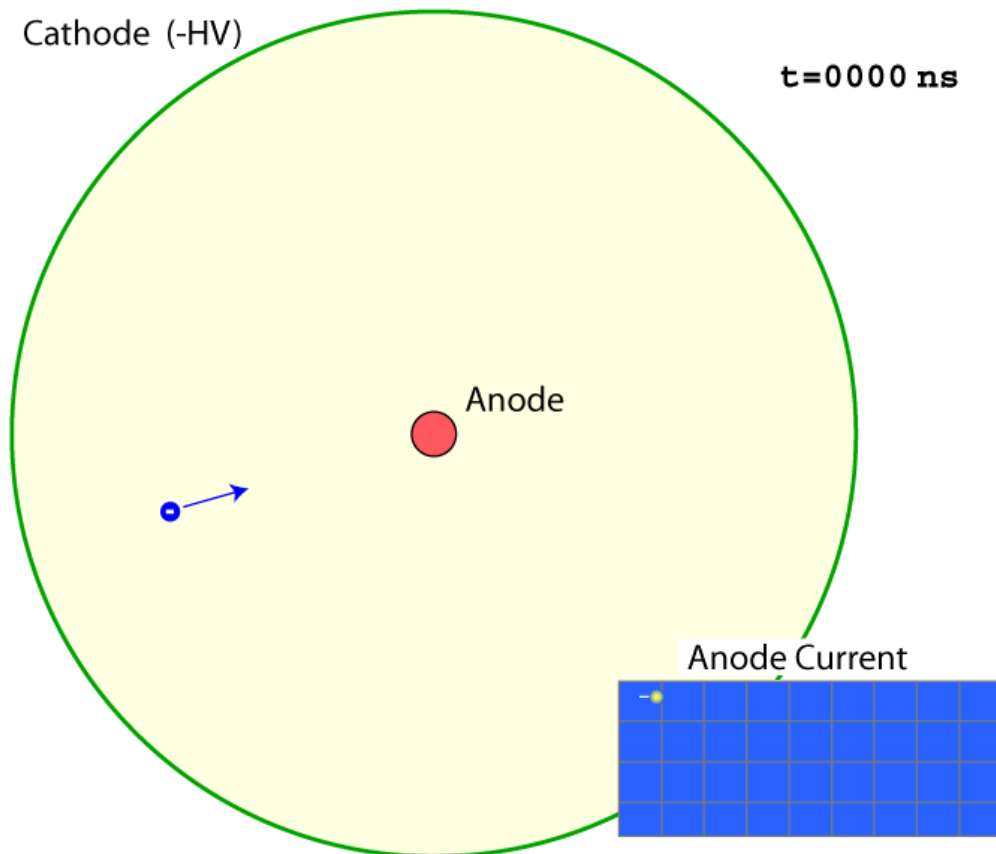
- 原初电离电子漂移进入雪崩区发生**雪崩放大**。
- 雪崩电子被阳极丝吸收。
- **正离子**向阴极漂移，同时在阳极丝**产生感应信号**。



2. 正比计数器工作原理

2

气体放大



正比计数器

1. 知识回顾
2. 正比计数器工作原理
3. 正比计数器输出信号
4. 课堂小结

3. 正比计数器输出信号

假定：

- (1) $A \gg 1$ ，则原初电离产生的离子对输出信号贡献可以忽略。
- (2) 全部输出信号均为正离子由阳极表面向阴极漂移而在外回路流过的感应电流。

3. 正比计数器输出信号

1 电流信号

输出总电流为：

$$I(t) = \frac{AN_0e}{V_0} \vec{\mathcal{E}}(r(t)) \cdot \vec{u}^+(r(t))$$

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}(r) &= \frac{V_0}{r \ln b/a} \\ u^+(r) &= \mu^+ \frac{\mathcal{E}(r)}{P} \end{aligned} \right\}$$

$$I(t) = \frac{A \cdot N_0 \cdot e \cdot V_0 \cdot \mu^+}{P \cdot r^2(t) \cdot (\ln b/a)^2}$$

$$u^+(r) = \frac{dr(t)}{dt}$$

$$u^+(r) = \frac{\mu^+}{P} \cdot \frac{V_0}{r(t) \ln b/a}$$

$$\left. \begin{aligned} u^+(r) &= \frac{dr(t)}{dt} \\ u^+(r) &= \frac{\mu^+}{P} \cdot \frac{V_0}{r(t) \ln b/a} \end{aligned} \right\} r^2(t) = a^2 + 2 \frac{\mu^+ V_0 \cdot t}{P \ln b/a}$$

3. 正比计数器输出信号

1 电流信号

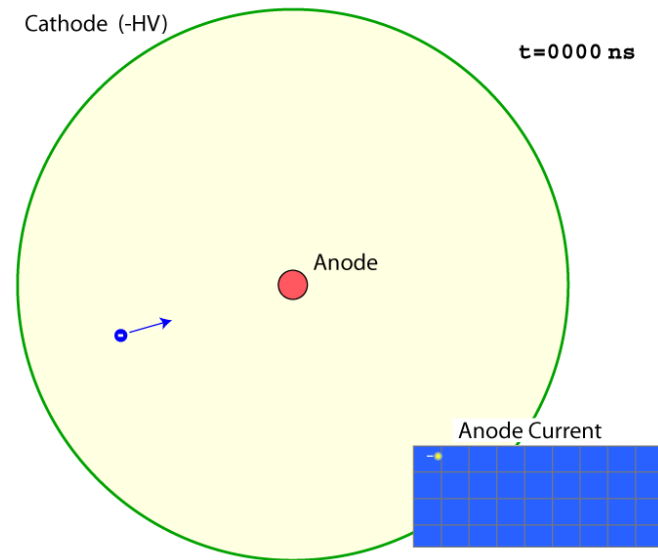
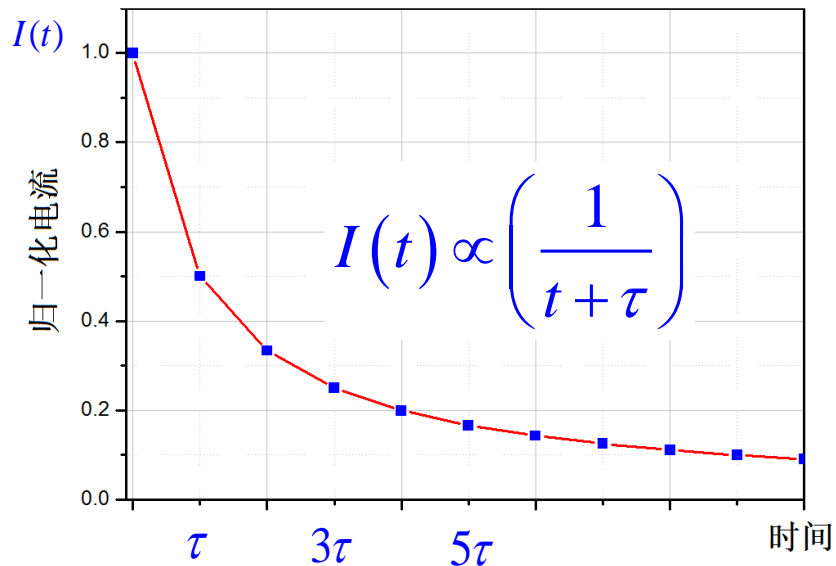
化简后：
$$I(t) = \frac{AN_0e}{2\ln b/a} \left(\frac{1}{t+\tau} \right)$$

其中，
$$\tau = a^2 \frac{(\ln b/a) \cdot P}{2V_0\mu^+} \approx 10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ s}$$

τ 仅取决于正比计数器结构、工作气体及工作电压。

3. 正比计数器输出信号

1 电流信号

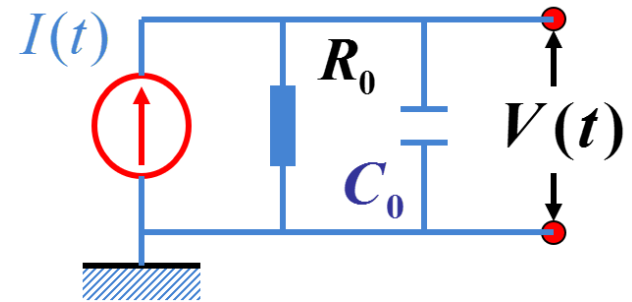


由于 τ 很小，电流随时间而迅速下降。

3. 正比计数器输出信号

2 电压信号

$$I(t) = \frac{V(t)}{R_0} + C_0 \frac{dV(t)}{dt}$$



$$V(t) = \frac{AN_0 e}{2C_0 \ln b/a} e^{-t/R_0 C_0} \int_0^t e^{t'/R_0 C_0} \left(\frac{1}{t' + \tau} \right) dt'$$

- (1) 电压脉冲幅度正比于 $AN_0 e$ ，正比于入射粒子能量。
- (2) 具有快的响应时间 (μs 量级)。

正比计数器

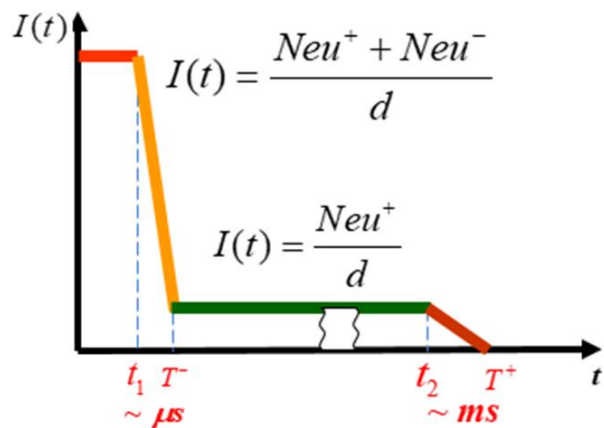
1. 知识回顾
2. 正比计数器工作原理
3. 正比计数器输出信号
4. 课堂小结

4. 课堂小结

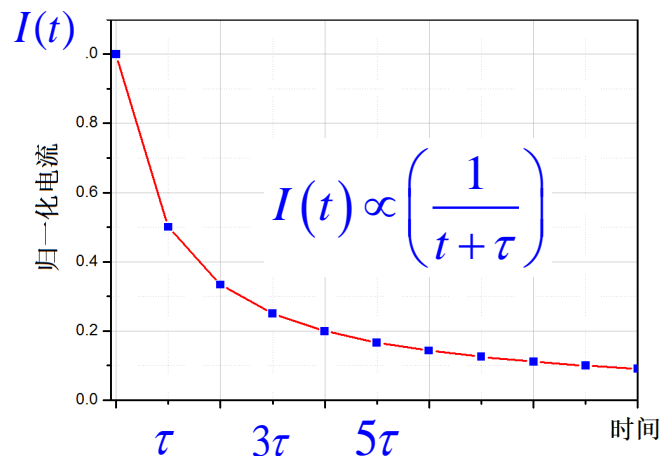
- (1) 通过圆柱形特殊电场分布，构建小范围强电场，实现不同位置电离电子具有相同放大倍数。
- (2) 正比计数器信号由离子漂移运动产生，电压幅度正比于粒子能量，且具有较快的时间响应。

思考题

- (1) 中间金属丝相对于管壁是否可以施加负高压？为什么？
- (2) 为什么同样是正离子漂移引起的感应信号，离子型脉冲电离室信号很慢（ $\sim ms$ ），而正比计数器离子信号却很快（ $\sim \mu s$ ）？



平板电离室



正比计数器



敬请批评指正！

部分图片摘自清华大学《核辐射物理及探测学》课件，在此表示感谢！