

第五章 闪烁探测器

荧光物质，闪烁体。

时间特性好，探测效率高。

闪烁体

光电倍增管

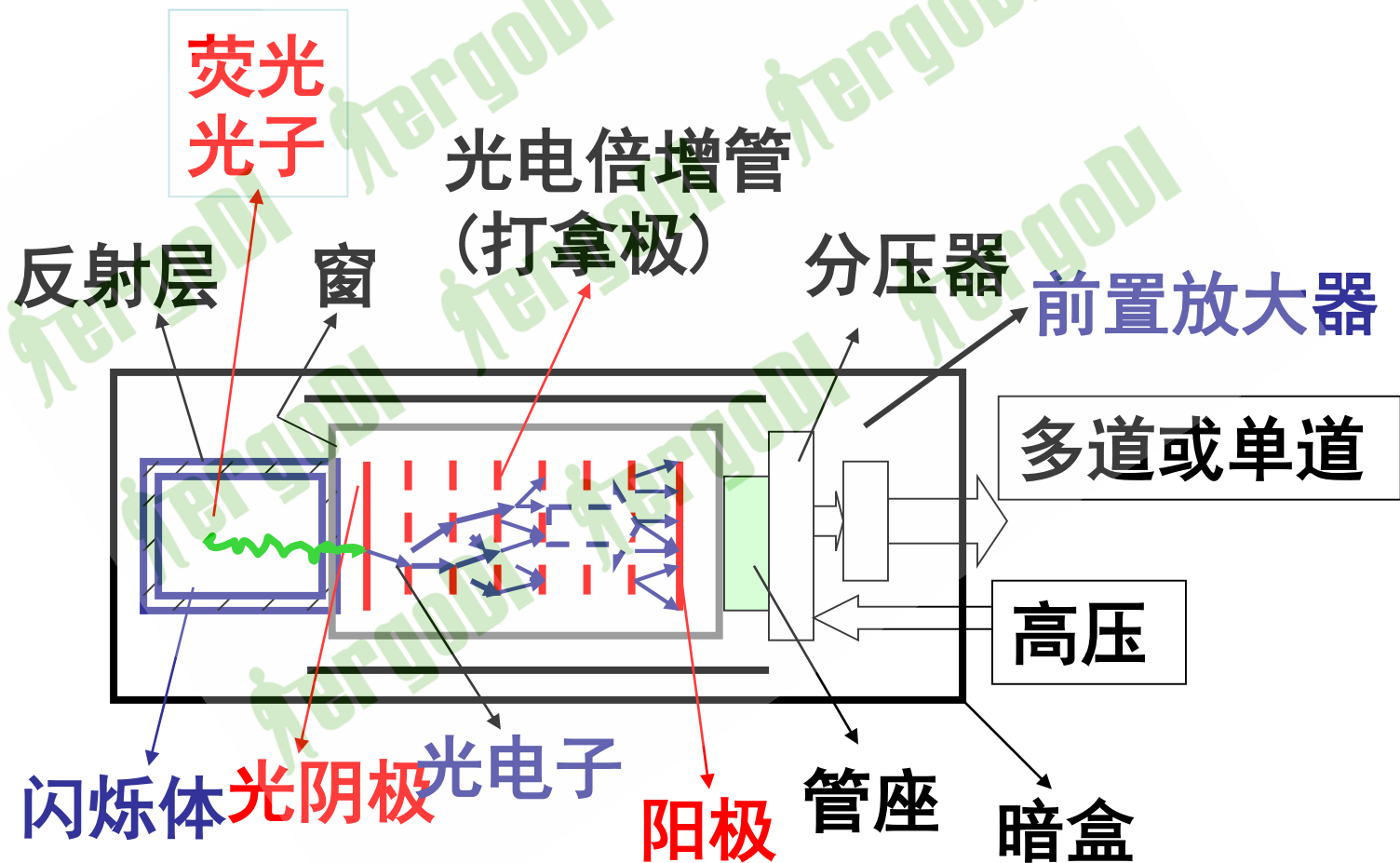
闪烁探测器的输出信号

闪烁探测器的性能

单晶 γ 能谱仪

§5.1 构成和工作原理

构成(探头):



闪烁探测器的工作过程：

- (1) 核辐射射入闪烁体使闪烁体原子**电离**或**激发**,受激原子**退激**而发出波长在可见光波段的**荧光**。
- (2) 荧光光子被收集到**光电倍增管(PMT)**的**光阴极**,通过光电效应打出**光电子**。
- (3) **电子运动并倍增**,并在**阳极**输出回路输出信号。

闪烁探测器可用来测量入射粒子的**能量**。 ?



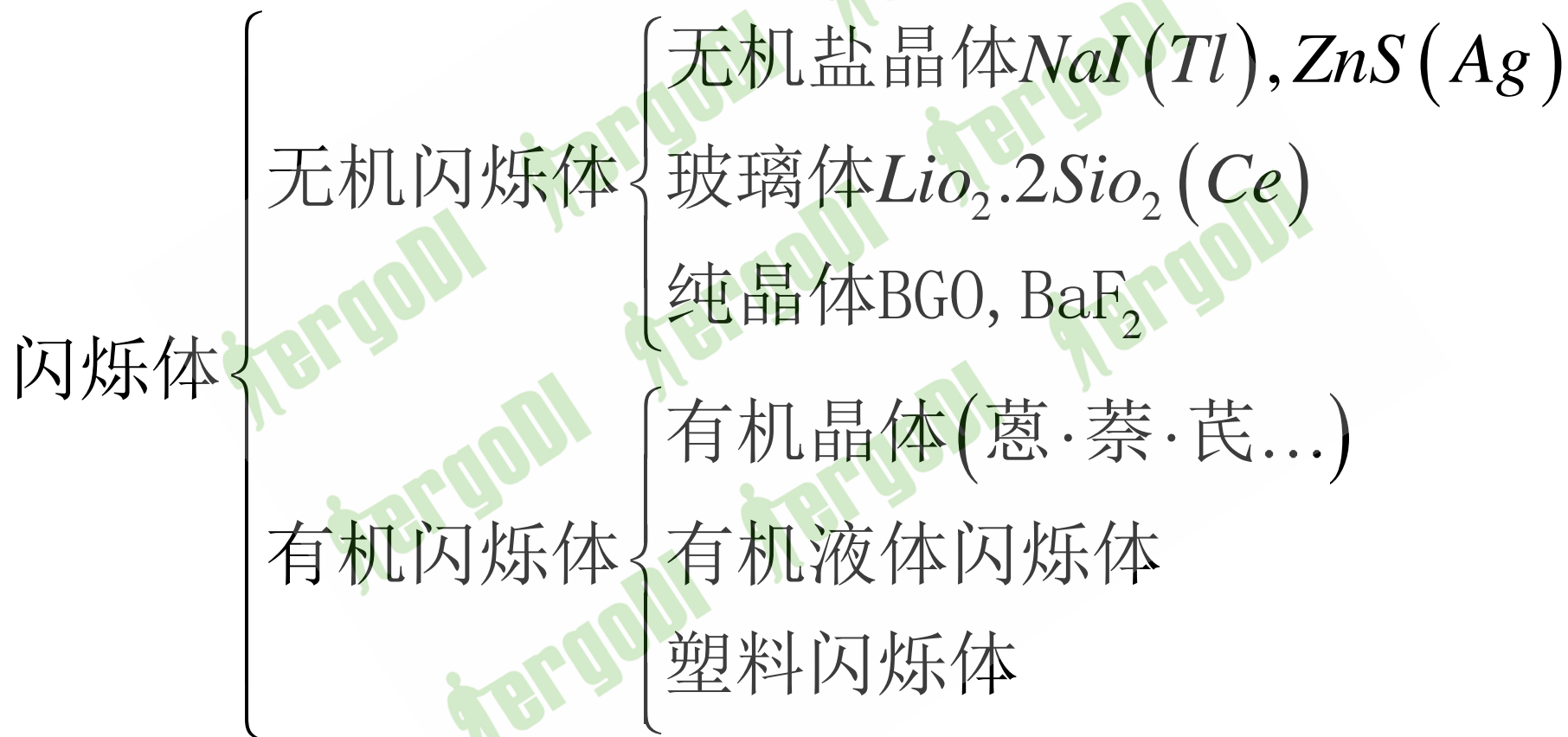
§5.2 闪烁体

理想的闪烁体：

探测效率高，转换效率高，线性范围大，
自吸收小，发光时间短，加工性能好。

- 一. 闪烁体的分类
- 二. 闪烁体的发光机制
- 三. 闪烁体的物理特性
- 四. 常用闪烁体

一、闪烁体的分类



二、闪烁体的发光机制

无机闪烁体:

光输出产额高、线性好, 发光时间较长。

有机闪烁体:

发光时间短, 光输出产额低。

1、无机闪烁体的发光机制

2、有机闪烁体的发光机制(自学)

无机闪烁体的发光机制：

掺杂的无机晶体：NaI (TI)、CsI (TI)，也叫卤素碱金属晶体。

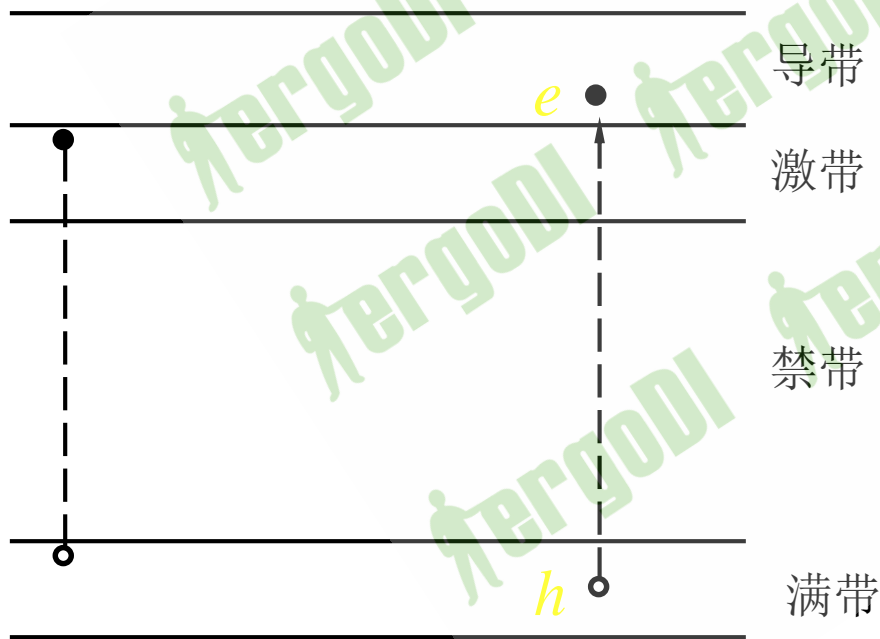
导体： $E_g < 0.1\text{eV}$
半导体： $E_g = 0.6 \sim 2.5\text{eV}$
绝缘体： $E_g > 3\text{eV}$
NaI(TI)： $E_g = 7.3\text{eV}$



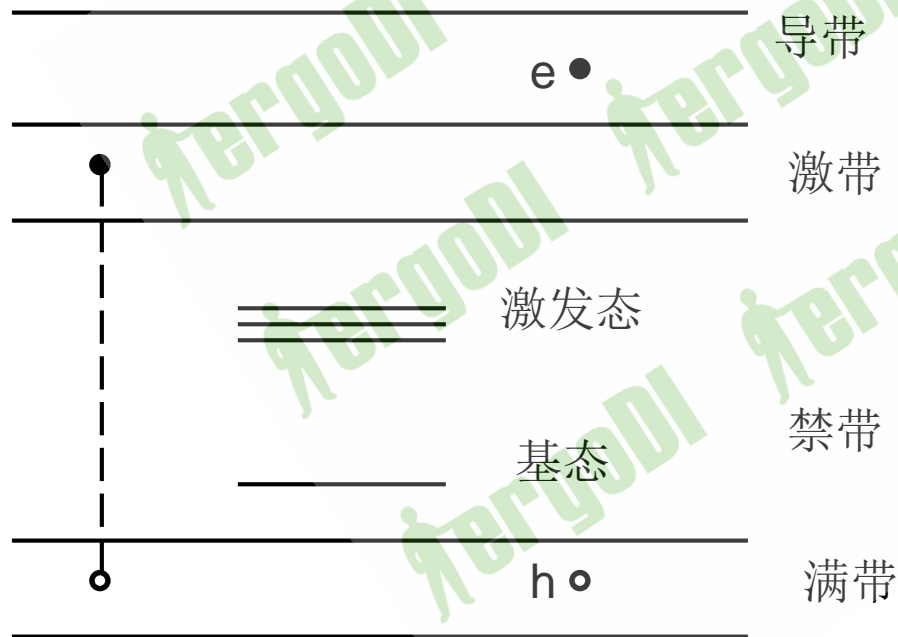
- ▼ 导带上自由电子和满带上空穴可以复合成激子；
- ▼ 入射粒子可以产生电子-空穴对，也可产生激子。退激可能发出光子，也可能晶格振动而不发光。

纯离子晶体：

退激发出的光子容易被晶体自吸收，传输出的光子少禁带宽度大，退激发光在紫外光范围，光阴极不响应



在晶体中掺杂,叫做激活剂,含量 10^{-3} 量级。杂质形成特殊晶格点,并在禁带中形成局部能级。原子受激产生的电子-空穴迁移到杂质能量的激发态和基态上,使杂质原子处于激发态。



杂质原子退激:

荧光: $<10^{-7}$ sec.

猝灭: 转换为晶格的热运动.

磷光: 亚稳态, 发光时间较长。

在NaI(Tl)中产生一对电子-空穴对需要~**20eV**能量。
如果入射带电粒子在NaI(Tl)中损失1MeV能量，产生的电子-空穴对数：

$$N_e = \frac{1 \times 10^6}{20} = 5 \times 10^4$$

NaI(Tl)的闪烁光能占入射能量~**13%**，吸收1MeV能量产生总光能：

$$E_{ph} = 1 \times 10^6 \times 0.13 = 1.3 \times 10^5 \text{ eV}$$

闪烁光子平均能量~**3eV**，产生光子数：

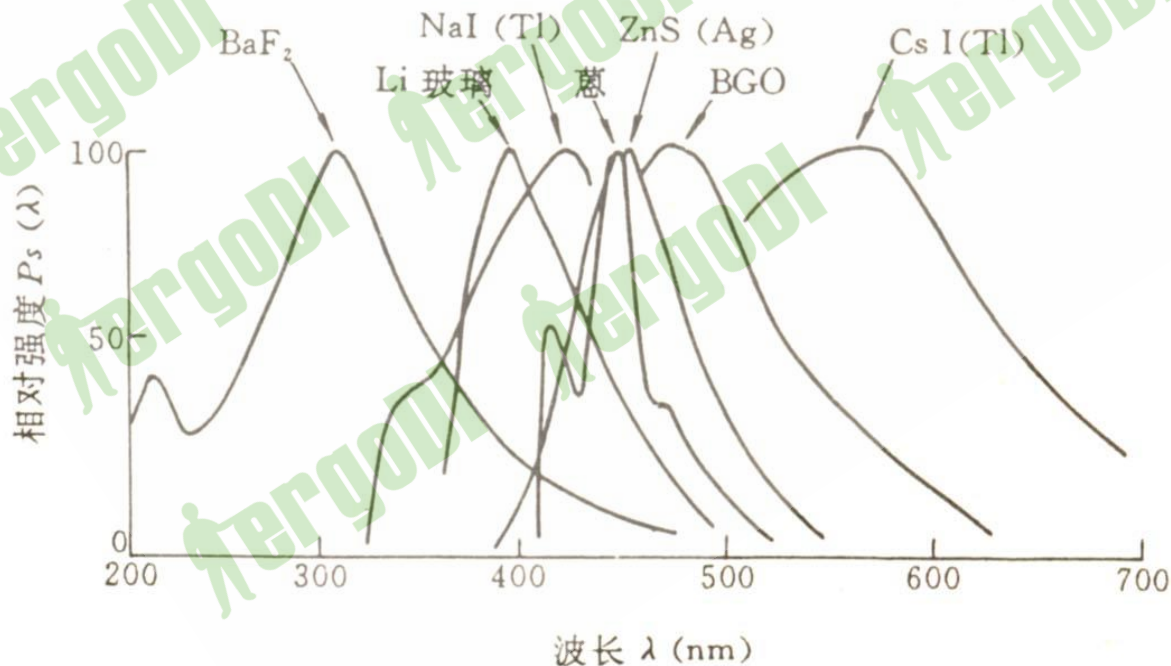
$$N_{ph} = \frac{1.3 \times 10^5}{3} = 4.3 \times 10^4$$

三、闪烁体的物理特性

- 1、发光光谱
- 2、发光效率(能量转换效率、光能产额及相对值)
- 3、发光时间
- 4、闪烁体其他特性

1、发光光谱

- 特点：发射光谱为**连续谱**。各种闪烁体都存在一个**最强波长**；要注意发射光谱与光电倍增管光阴极的光谱响应是否匹配。



2、发光效率

- 闪烁体将所吸收的**射线能量**转化为**光**的比例。

- 发光效率：
$$C_{np} = \frac{E_{ph}}{E} \times 100\%$$

- E_{ph} 闪烁体发射光子的**总能量**；
- E 入射粒子损耗在闪烁体中的**能量**。

- 以 **NaI(Tl)** 为例：

对 β 粒子 $C_{np} = 13\%$ ，对 α 粒子 $C_{np} \approx 2.6\%$

光输出 (光能产额、光产额)

定义: $S = \frac{n_{ph}}{E}$ 光子数/MeV

n_{ph} 为产生的闪烁光子总数。

发光效率与光输出的关系:

$$S = \frac{n_{ph}}{E} = \frac{E_{ph}}{h\bar{\nu}} \cdot \frac{1}{E} = \frac{C_{np}}{h\bar{\nu}}$$

例：以 NaI(Tl) 为例，对 1MeV 的 β 粒子，发射光子平均能量 $h\bar{\nu} = 3\text{eV}$ 求光产额

解：根据公式

$$S = \frac{C_{np}}{h\bar{\nu}}$$

$$S = \frac{0.13}{3\text{eV}} = 4.3 \times 10^4 \text{ 光子数} / \text{MeV}$$

练习：

当入射粒子在蒽晶体内损失1MeV能量时，产生20300个平均波长为447nm的光子，试计算蒽晶体的闪烁效率。

3、闪烁发光时间

- 闪烁体的发光过程包括闪烁的**上升和衰减**两个过程。
- 对大多数无机晶体，闪烁衰减成**指数**规律，有：

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- 式中： τ 为受激原子衰减时间常数
 t 时刻已退激发出的光子数 $N_{\text{光子}}(t)$ 为

$$N_{\text{光子}}^r(t) = N_0 - N(t) = N_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

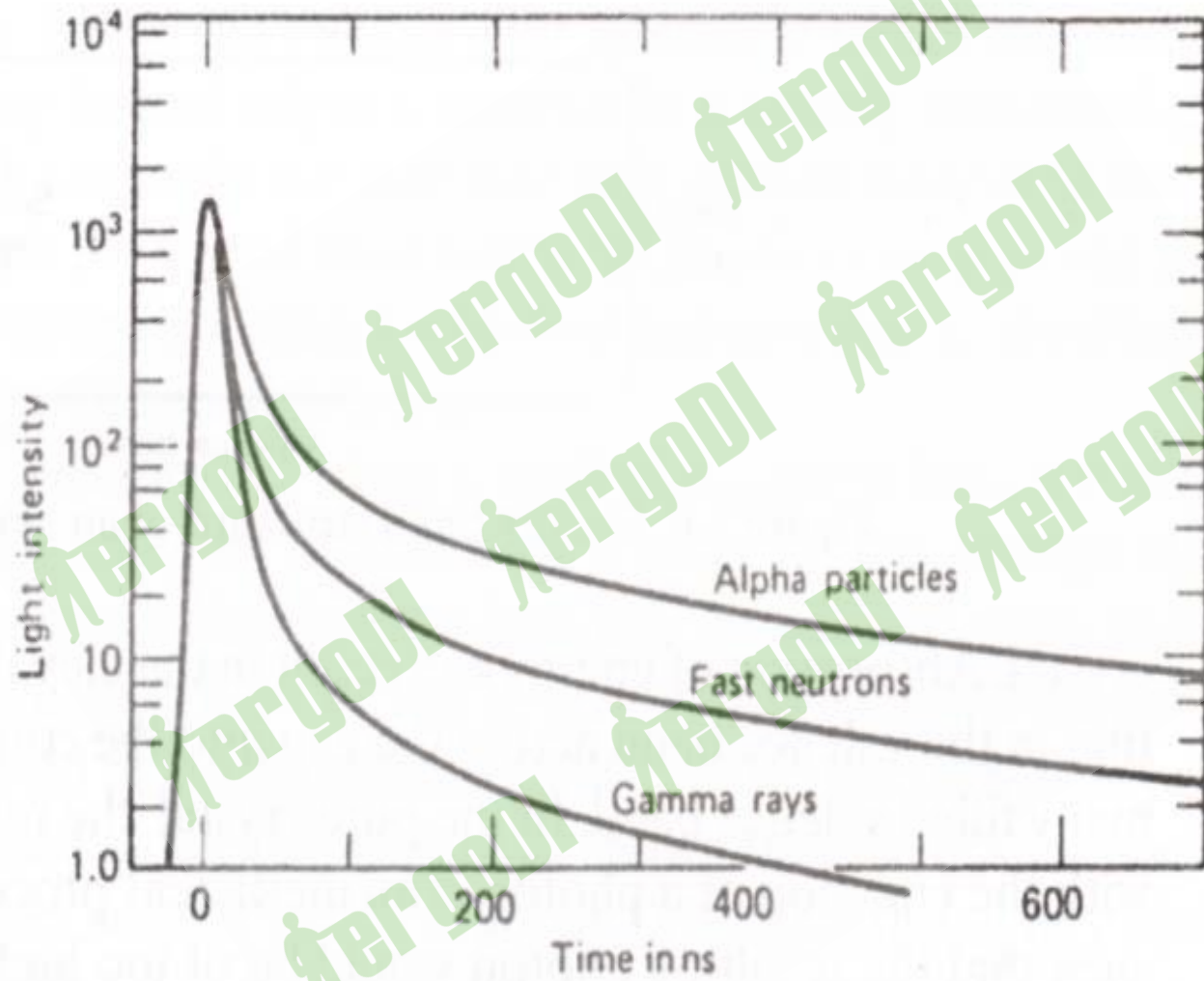
- 则单位时间内发出的光子数为(发光强度):

$$I(t) = \frac{dN_{\text{光子}}}{dt} = \frac{N_0}{\tau} e^{-t/\tau}$$

对大多数有机晶体和少数无机晶体，发光衰减有快慢两种成份，其衰减规律为：

$$I(t) = I_f e^{-t/\tau_f} + I_s e^{-t/\tau_s}$$

快、慢两种成分的**相对比例**随入射粒子而变化。
见书P243，图4.7



四. 常用闪烁体

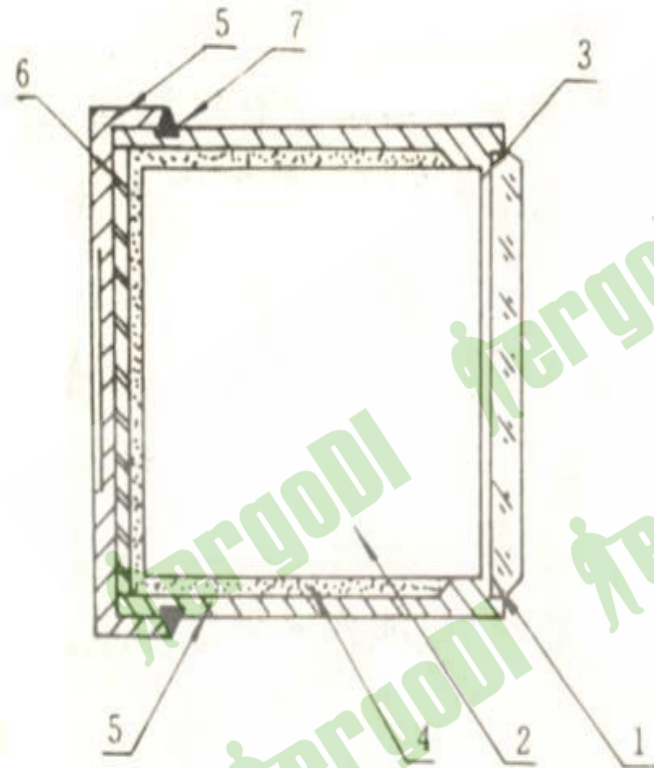
- 1、NaI (Tl) 晶体
- 2、CsI (Tl) 和CsI (Na) 晶体
- 3、BGO晶体 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
- 4、ZnS (Ag) 晶体
- 5、液体闪烁体
- 6、塑料闪烁体

1、NaI(Tl)晶体

优点:

密度大， $\rho=3.67\text{g/cm}^3$ ，探测效率高；
Z高，碘(Z=53)占重量85%，光电截面大；
相对发光效率高，为葱的2.3倍；
发射光谱最强波长415nm，与PMT光谱响应配合；
晶体透明性能好；
能量分辨率较高，~7.5%,662keV- γ 。

缺点：容易潮解。



- 1-硬质玻璃;
- 2-NaI(Tl)晶体;
- 3-光学耦合剂;
- 4-光反射层;
- 5-金属铝壳;
- 6-海绵垫衬;
- 7-密封环氧树脂。

NaI(Tl)晶体封装结构

2、CsI(Tl)和CsI(Na)晶体

优点:

- 密度大, $\rho = 4.51 \text{g/cm}^3$;
- Z高, 铯($Z=55$), 碘($Z=53$) ;
- 机械强度高;
- 加工性能好;
- CsI(Tl)可以用作粒子鉴别。

缺点: CsI(Na)容易潮解; CsI(Tl)轻度潮解。

3、BGO晶体 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ， 锗酸铋)

优点:

- 密度大, $\rho = 7.13\text{g/cm}^3$;
- Z高, 铋($Z=83$);
- 机械性能好;
- 化学稳定性好;
- 光学透明性好。

缺点: 发光效率低, 为NaI(Tl)的8~14%。

4、ZnS(Ag)晶体

- 发光效率高；
- 多晶粉末；
- 透光性差，厚度约 $10\sim 20\text{mg}/\text{cm}^2$ 。

5、有机液体闪烁体

- 发光衰减时间短， $\sim 2.4\text{ns}$ ；
- 透明度好，制备容易，成本低。

6、塑料闪烁体

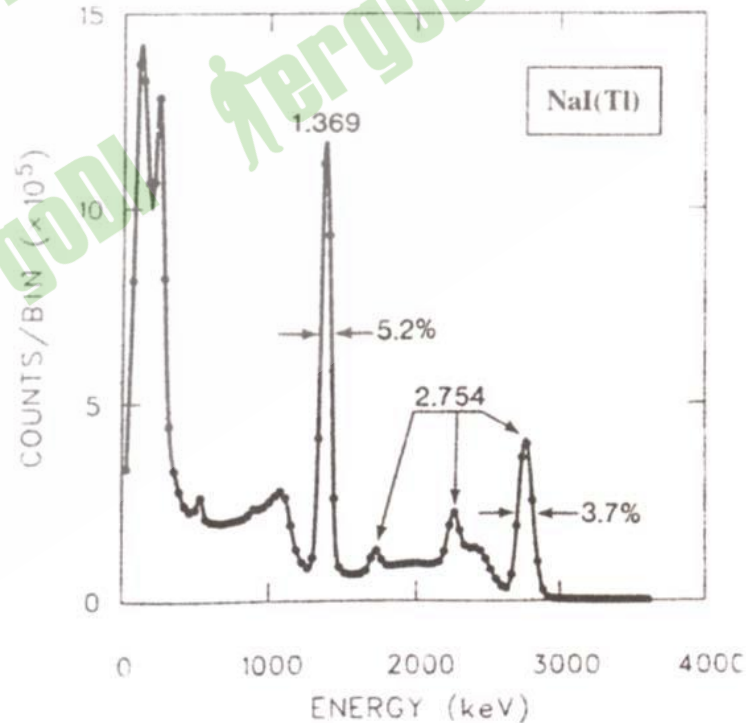
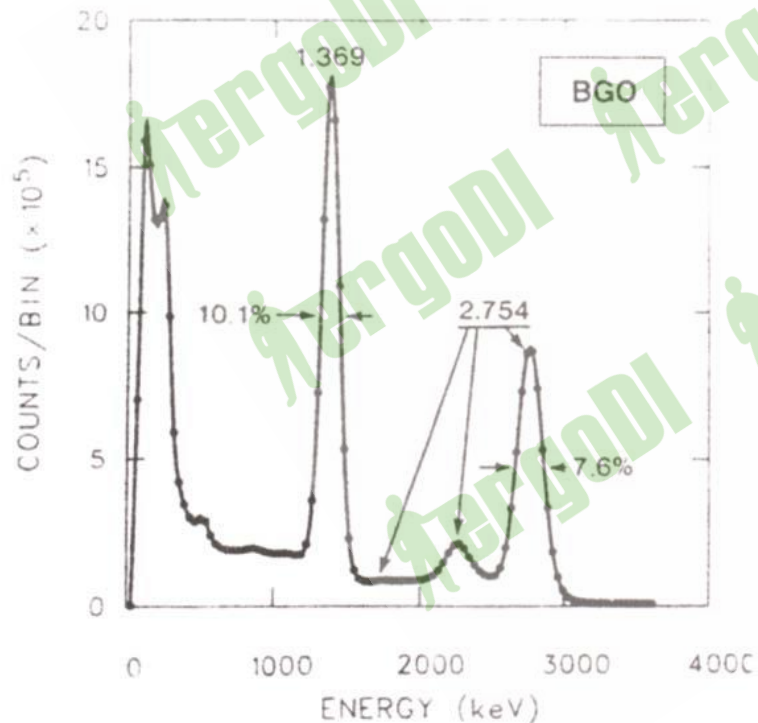
- 发光衰减时间短，**1~3ns**；
- 透明度高，光传输性能好；
- 机械性能好，性能稳定；
- 耐辐射特性好。
- 由溶剂(苯乙烯)+荧光物质+波长转换剂，聚合而成

7. 闪烁体的选择

- 闪烁探测器的性能与闪烁体有很大关系。
- 在实际应用中闪烁体的选择应考虑：
 - ①选用的闪烁体在测量一种核辐射时能排除其他辐射的干扰。
 - ②要考虑测量的物理量；
 - ③应考虑放射源的特点；
 - ④考虑与所用的光电倍增管的配合及经济方面的因素。

问题:

试解释NaI(Tl)闪烁探测器的能量分辨率优于BGO闪烁探测器的原因，为何后者的探测效率要更高一些？



闪烁体	原子序数 Z	密 度	发光效率
NaI(Tl)	11, 53	3.67	100
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	83, 32, 8	7.13	7~14

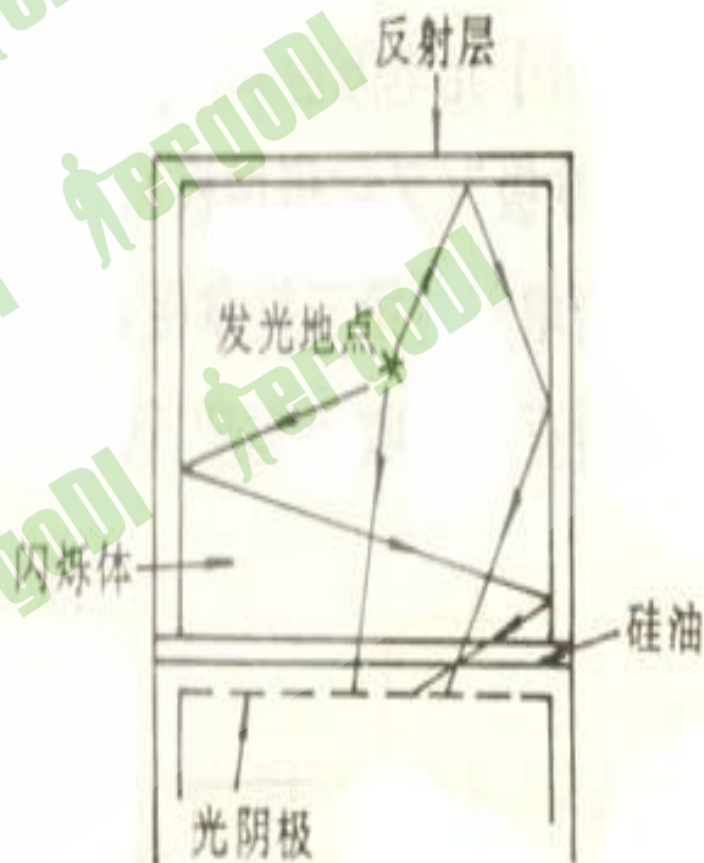
§5.3 光学收集系统

- 反射层、耦合剂和光导。

- **反射层作用：**

把闪烁体中向各个方向发射的光有效地反射到光电倍增管的光阴极上。

氧化镁、二氧化钛、聚四氟乙烯塑料袋等。



• 光学耦合剂

作用：排除交界面间的空气，减少光在交界面的全反射，使光有效地传输到光电倍增管的光阴极。

当光子由光密物质(n_1)射向光疏物质(n_2)时,发生全反射的临界角:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

加入折射率大的透明媒质，增大临界角，透射光增加。

用折射系数 $n=1.4 \sim 1.8$ 的**硅脂(或硅油)**。

- 光导:

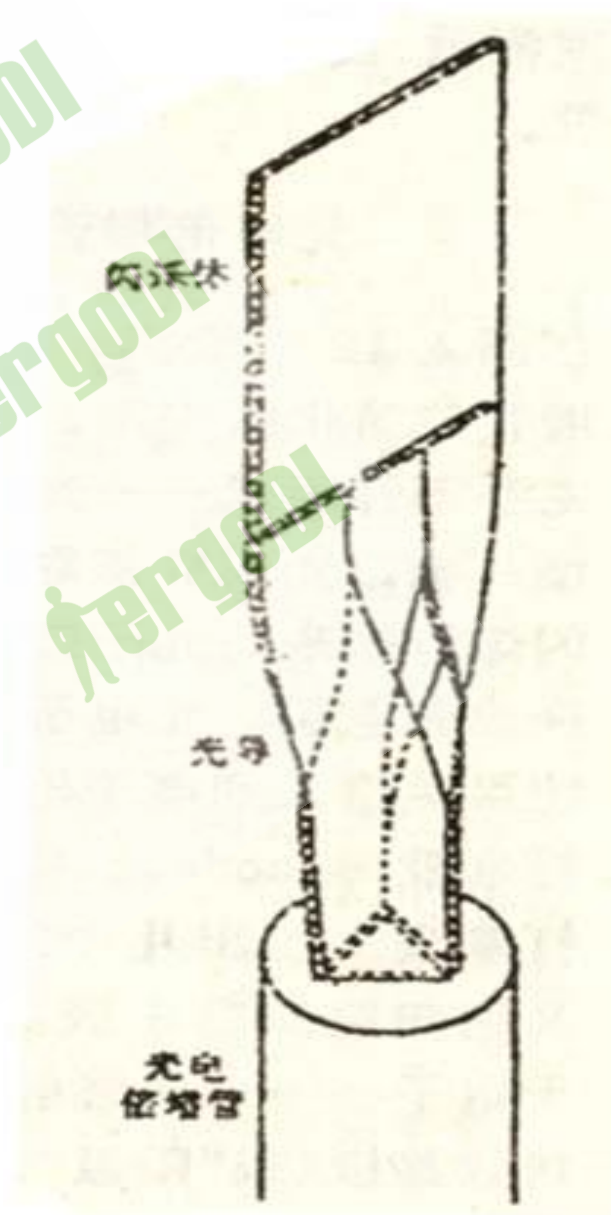
- 具有一定形状的光学透明固体材料, 连接闪烁体与光电倍增管。

- 闪烁体窗面积、形状与PMT窗面积、形状不同时;

- 强磁场中探测时, 用较长的光导连接, 把闪烁体与PMT分隔开;

- 在空间较小处, 用光纤连接较小的闪烁体与PMT;

- 用硅油填充闪烁体-光导、光导-PMT的交界面。



§5.4 光电倍增管

光电倍增管，通道型电子倍增器件

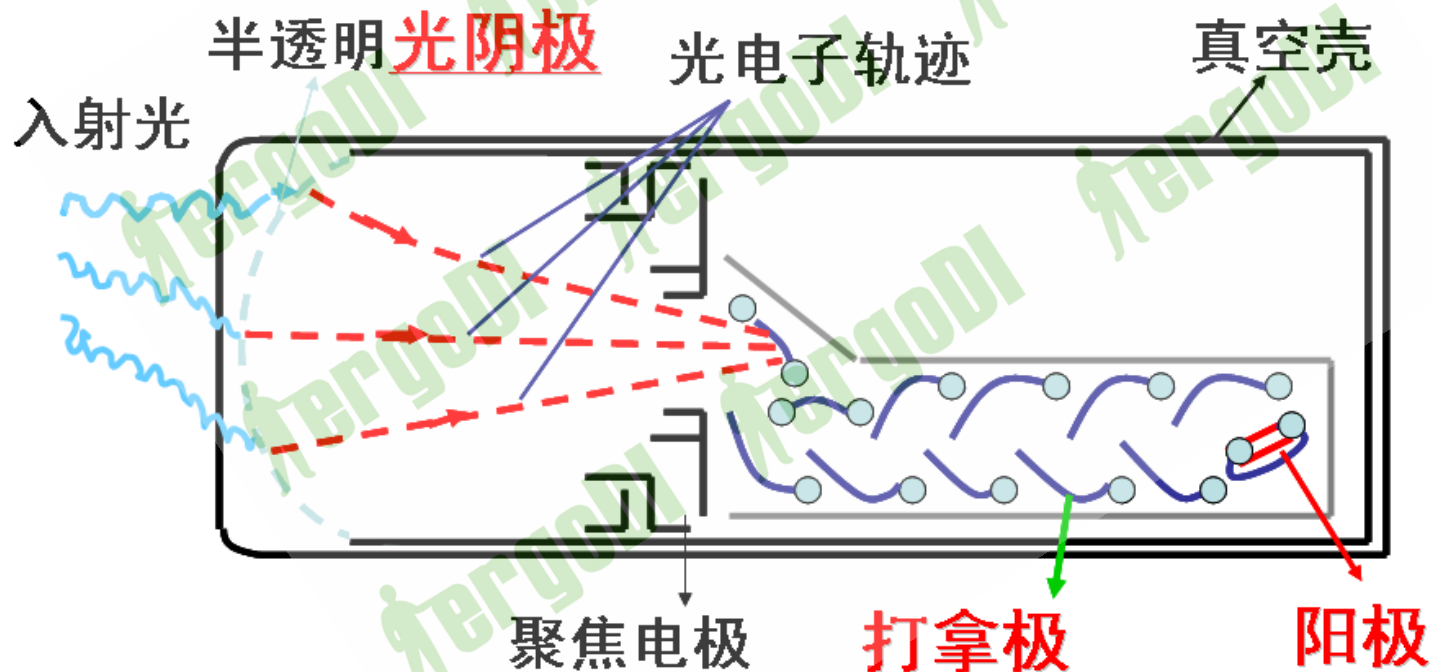
一. 光电倍增管的结构与工作原理

二. 光电倍增管的供电回路

三. 光电倍增管的主要性能

一、光电倍增管的结构与工作原理

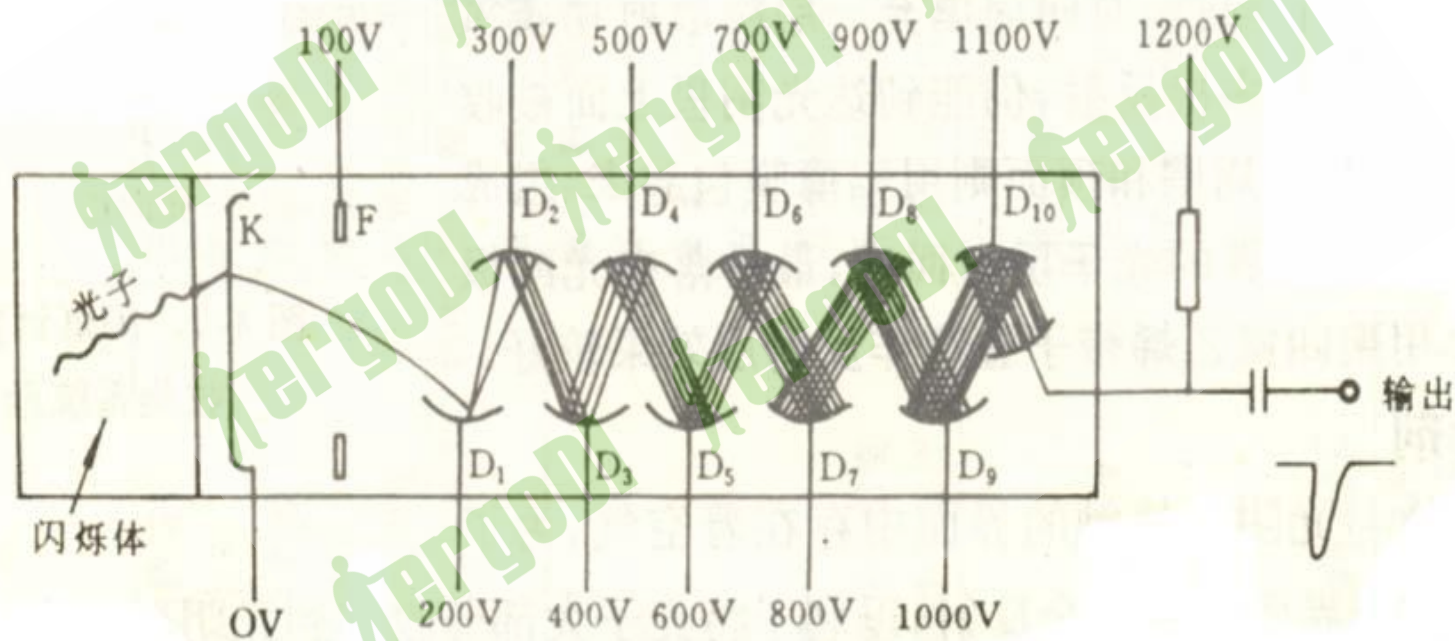
- 光阴极，电子倍增系统(打拿极)，电子收集(阳极)极，聚焦极及加速极。



光阴极：通常为化合物材料。

电子光学系统：聚焦极、加速极。

阳极：镍、钽、钨，二次电子发射小。



工作原理:

光阴极由于光电效应将闪烁体发出的微弱的光转变成光电子，光电子经电子光学系统加速、聚集后射向倍增极，电子不断增加，阳极收集最后一极倍增极的二次电子而输出一个电信号。

分类

聚焦型

具有较快的响应时间，
用于时间测量或需要
响应时间快的场合。

直线结构

环状结构

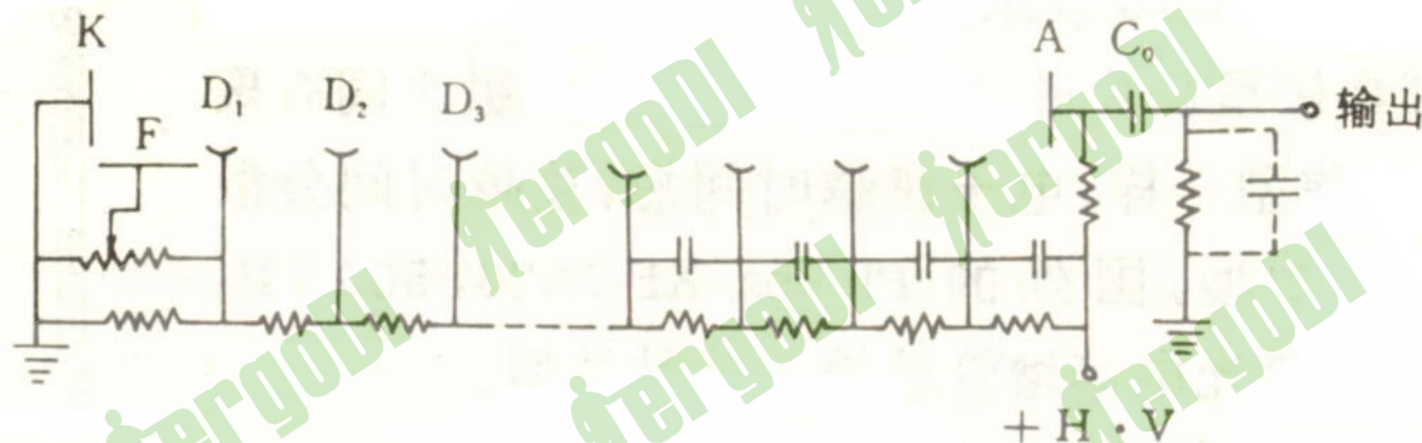
非聚焦型

电子倍增系数较大，
多用于能谱测量系统。

百叶窗结构

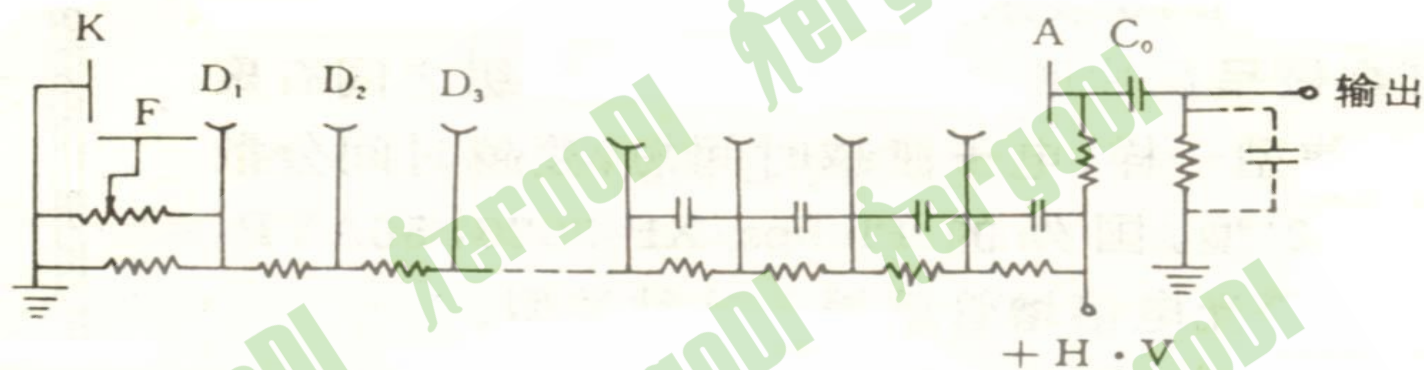
盒栅型结构

二. 光电倍增管的供电回路

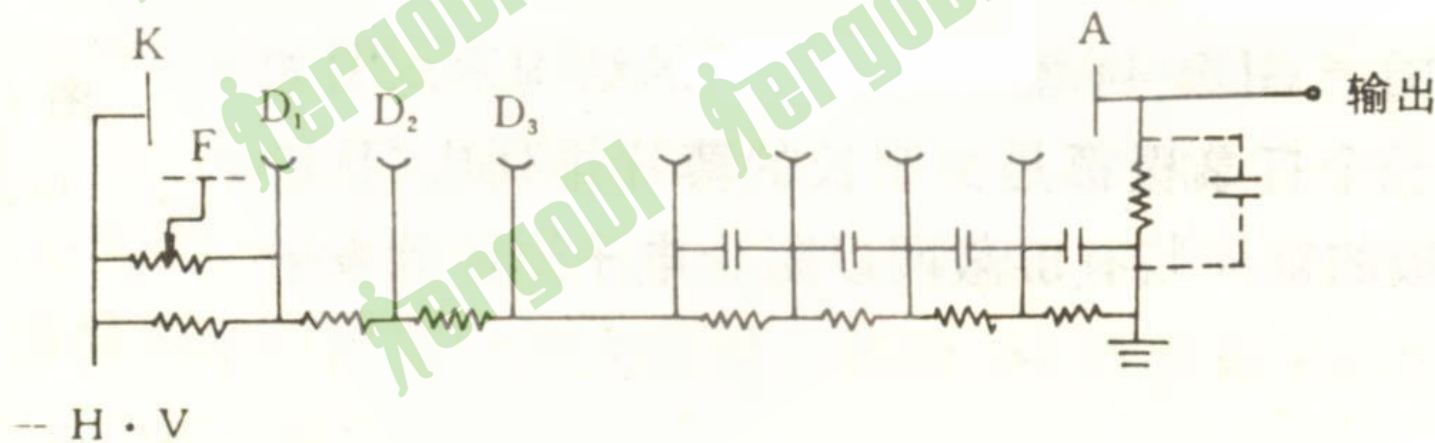


- **K-D1**电压较高，提高S/N和能量分辨率；
- 中间各打拿极一般均匀分压；
- 最后几个打拿极间高电压、大电流，电容稳压；
- 最后打拿极与阳极间电压较小。

正高压供电方式:



负高压供电方式:



三、主要性能

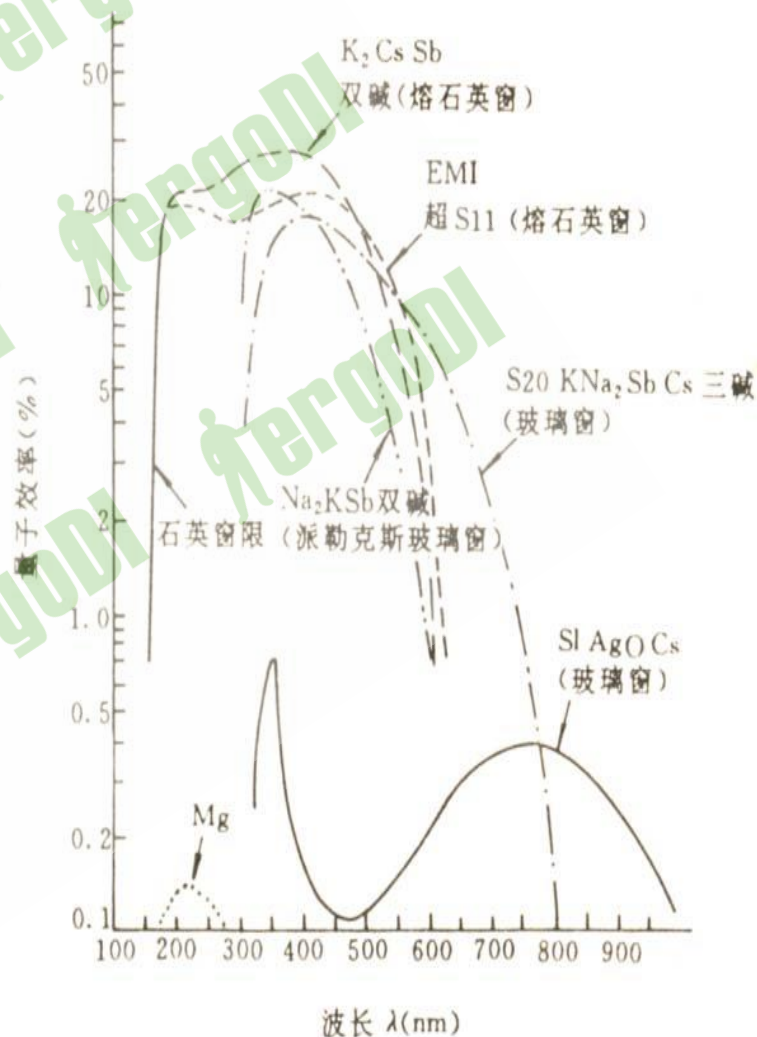
1) 光阴极的光谱响应

光阴极受到光照射后,量子效率随波长的关系曲线。

量子效率:

$$Q_k(\lambda) = \frac{\text{发射光电子数}}{\text{入射光子数}}$$

光阴极光谱响应需要与闪烁体发射光谱匹配。



2) 光阴极(阳极)的光照灵敏度

$$S_k = \frac{i_k}{F} (\mu A / lm)$$

$$S_A = \frac{i_A}{F} (\mu A / lm)$$

其中：i 是光电子流(μA)，F是光通量(lm)。

3) 光电倍增管的电流放大倍数

$$M = \frac{\text{阳极收集到电子数}}{\text{第一打拿极收集到电子数}} = (a\delta)^n$$

其中：a为各级的电子收集效率， δ 为各级电子倍增系数，
n为倍增级数

4) PMT 暗电流与噪声

当工作状态下的光电倍增管完全与光辐射隔绝时，其阳极仍能输出电流(暗电流)及脉冲信号(噪声)
成因：

- (1) 光阴极的热电子发射
- (2) 管内残余气体电离和激发
- (3) 工艺——尖端放电及漏电

5) PMT 的稳定性

稳定性是指在**恒定**辐射源照射下，光电倍增管的**阳极电流随时间**的变化。

包含两部分：

短期稳定性，指**建立稳定工作状态**所需的时间。一般在开机后**预热**半小时才开始正式工作。

长期稳定性：在工作达到稳定后，**略有下降的慢变化**，与管子的材料、工艺有关，同时与周围的环境温度有关。长期工作条件下，须采用“**稳峰**”措施。