

光电倍增管简介及使用特性

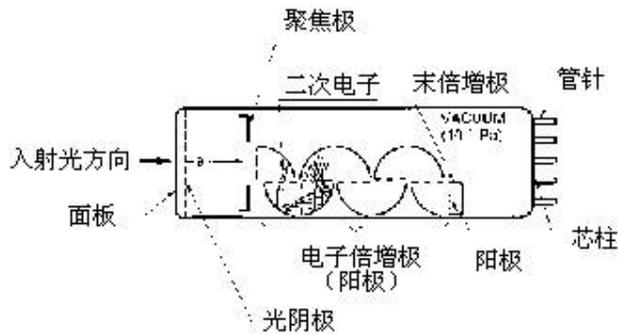
介绍

今天我们使用的光电器件中，光电倍增管（PMT）是一种具有极高灵敏度和超快时间响应的光探测器件。典型的光电倍增管如图 1 所示，在真空管中，包括光电发射阴极（光阴极）和聚焦电极、电子倍增极和电子收集极（阳极）的器件。

当光照射光阴极，光阴极向真空中激发出光电子。这些光电子按聚焦极电场进入倍增系统，通过进一步的二次发射得到倍增放大。放大后的电子被阳极收集作为信号输出。

因为采用了二次发射倍增系统，光电倍增管在可以探测到紫外、可见和近红外区的辐射能量的光电探测器件中具有极高的灵敏度和极低的噪声。光电倍增管还有快速响应、低本底、大面积阴极等特点。

图1：端窗型光电倍增管的剖面图



这一章将讲解光电倍增管结构的主要特点和基本使用特性。

结构

一般，端窗型（Head-on）和侧窗型（Side-on）结构的光电倍增管都有一个光阴极。侧窗型的光电倍增管，从玻璃壳的侧面接收入射光，而端窗型光电倍增管是从玻璃壳的顶部接收入射光。通常情况下，侧窗型光电倍增管价格较便宜，并在分光光度计和通常的光度测定方面有广泛的使用。大部分的侧窗型光电倍增管使用了不透明光阴极（反射式光阴极）和环形聚焦型电子倍增极结构，这使其在较低的工作电压下具有较高的灵敏度。

端窗型（也称作顶窗型）光电倍增管在其入射窗的内表面上沉积了半透明光阴极（透过式光阴极），使其具有优于侧窗型的均匀性。端窗型光电倍增管的特点还包括它拥有从几十平方毫米到几百平方厘米的光阴极。

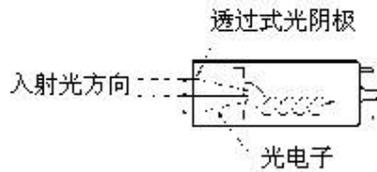
端窗型光电倍增管中还有针对高能物理实验用的，可以广角度捕集入射光的大尺寸半球形光窗的光电倍增管。

图3: 阴极的类型

a) 反射式



b) 透过式



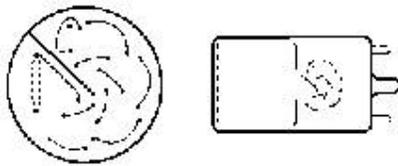
电子倍增系统

光电倍增管的优异的灵敏度（高电流放大和高信噪比）得益于基于多个排列的二次电子发射系统的使用，它使电子低噪声的条件下得到倍增。电子倍增系统包括从8至19极的被叫做打拿极或倍增极的电极。

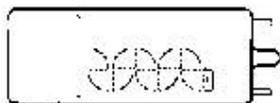
现在使用的电子倍增系统主要有以下几类：

1) 环形聚焦型

环形聚焦型结构主要应用于侧窗型光电倍增管。其主要特点为紧凑的结构和快速时间响应特性。



2) 盒栅型



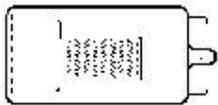
这种结构包括了一系列的四分之一圆柱形的倍增极，并因其相对简单的倍增极结构和一致性的改良而被广泛地应用于端窗型光电倍增管，但在一些应用中，其时间响应可能略显缓慢。

3) 直线聚焦型



直线聚焦型因其极快的时间响应而被广泛地应用于要求时间分辨和线性脉冲研究用的端窗型光电倍增管中。

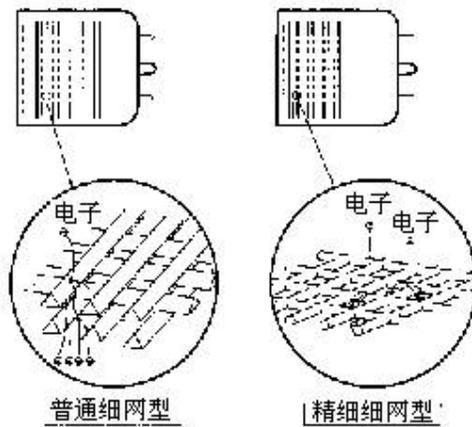
4) 百叶窗型



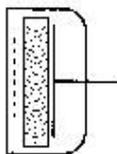
百叶窗型结构因倍增极可以较大而被用于大阴极的光电倍增管中，其一致性较好，可以有大的脉冲输出电流。这种结构多用于不太要求时间响应的场合。

5) 细网型

细网型结构拥有封闭的精密组合的网状倍增极，而使其具有极强的抗磁性、一致性和脉冲线性输出特性。另外，当使用交叠阳极或多阳极结构输出情况下，还具有位置灵敏特性。



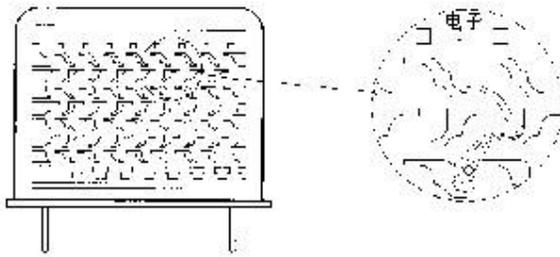
6) 微通道板 (MCP) 型



MCP 是上百万的微小玻璃管（通道）彼此平行地集成为薄形盘片状而形成。每个通道都是一个独立的电子倍增器。MCP 比任何分离电极倍增极结构具有超快的时间响应，并且当采用多阳极输出结构时，在磁场中仍具有良好的一致性和二维探测能力。

7) 金属通道型

金属通道型拥有滨松公司独有的机械加工技术创造的紧凑阳极结构，各个倍增极之间狭窄的通道空间，使其比任何常规结构的光电倍增管可以达到更快的时间响应速度。并可适用于位置灵敏探测。

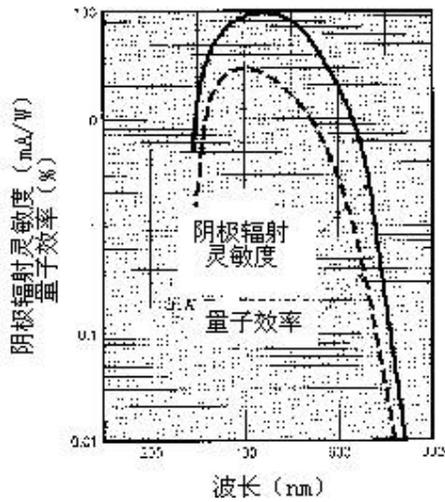


此外，上述结构中两种结构相混合也是可能的。混合的倍增极可以发挥各自的优势。

光谱响应

光电倍增管的阴极将入射光的能量转换为光电子。其转换效率（阴极灵敏度）随入射光的波长而变。这种光阴极灵敏度与入射光波长之间的关系叫做光谱响应特性。图 4 给出了双碱光电倍增管的典型光谱响应曲线。光谱响应特性的长波端取决于光阴极材料，短波端则取决于入射窗材料。在本书的附件里给出了不同型号的光电倍增管的光谱响应特性，其中长波端的截止波长，对于双碱阴极和 Ag-O-Cs 阴极的光电倍增管定义为其灵敏度降至峰值灵敏度的 1% 点，多碱阴极则定义为峰值灵敏度的 0.1%。

图4：端窗型双碱光电倍增管
典型光谱响应曲线



附件后的光谱响应特性曲线为典型值，对于每一支光电倍增管来讲，真实的数据可能会略有差异。

光阴极材料

光电倍增管的阴极一般是具有低逸出功的碱金属材料形成的光电发射面。常用的阴极材料有以下几种：

1) Ag-O-Cs

用此材料的透过型阴极具有典型的 S-1 谱，即具有从可见到红外（300-1200nm）的谱响应。因为 Ag-O-Cs 阴极有较高的热电子发射（请参考阳极暗电流章节），所以这种光电倍增管一般要在制冷器中工作，用于近红外区的光探测。

2) GaAs (Cs)

掺入活性 Cs 的 GaAs 材料也可以用作光阴极。这种光阴极比多碱光阴极复盖更宽的光谱范围，可以从近紫外到 930nm，并且响应曲线在 300-850nm 范围内较为平直。

3) InGaAs (Cs)

这种阴极材料比 GaAs 在红外区有了较大的扩展，可以达到 900 -1000nm，比 Ag-O-Cs 阴极有更高的信噪比。

4) Sb-Cs

这是一种具有在紫外和可见光范围光谱响应的广泛应用的阴极材料。主要应用在反射式光阴极上，不太适合于透过式光阴极。

5) 双碱材料 (Sb-Rb-Cs) (Sb-K-Cs)

这些材料与 Sb-Cs 材料具有相似的光谱响应特性, 但比 Sb-Cs 材料具有更高的灵敏度和更低的噪声。透过式双碱材料光阴极更具有与 NaI (TI) 闪烁晶体匹配的良好灵敏度光谱特性, 所以这种光电倍增管常用于放射性领域中的闪烁探测工作。

6) 高温双碱和低噪声双碱材料 (Na-K-Sb)

这种材料因为可以工作在高达 175℃, 所以常用于高温环境场合, 比如石油测井行业等。在室温下, 这种阴极材料具有很低的暗电流, 在光子计数应用方面较为理想。

7) 多碱阴极 (Na-K-Sb-Cs)

多碱阴极在紫外到近红外区很宽的光谱范围内具有较高的灵敏度。所以常用于宽光谱范围的分光光度计。应用特殊的阴极制作方法可以将光谱响应范围扩展至 930nm。

8) Cs-Te, Cs-I

这些材料的光谱响应范围在真空紫外和紫外线区, 因为对可见光没有响应, 所以也叫做日盲材料。Cs-Te 材料光谱响应范围可以达到 320nm, Cs-I 材料也可达到 200nm。

窗材料

光电倍增管一般使用以下窗材料:

1) 硼硅玻璃

这是一种常用的玻璃材料, 可以透过从近红外至 300nm 的入射光, 但不适合于紫外区的探测。在一些应用中, 常将双碱阴极与低本底硼硅玻璃 (也称无钾玻璃) 组合使用。无钾玻璃中只有极低含量的钾, 其中的 K^{40} 会造成暗计数。所以通常用于闪烁计数的光电倍增管不仅入射窗, 而且玻璃侧管也使用无钾玻璃, 就是为了降低暗计数。

2) 透紫玻璃 (UV 玻璃)

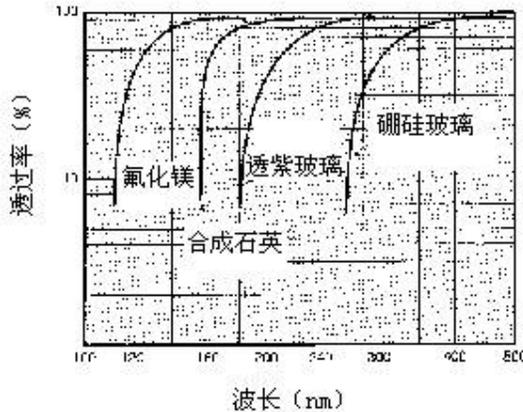
这种玻璃材料就象其名字所表达的那样, 可以很好地透过紫外光, 和硼硅玻璃一样被广泛使用。分光应用领域一般都要要求用透紫玻璃, 其截止波长可接近 185nm。

3) 合成石英

合成石英可以将透过的紫外光波长延伸至 160nm, 并且在紫外区比熔融石英玻璃有更低的吸收。合成石英材料的膨胀系数与芯柱用玻璃的膨胀系数有很大差别, 所以, 用热膨胀系数渐变的封接材料与合成石英逐渐过渡。因此, 此类光电倍增管的强度易受外界震动的破坏, 使用中要采取足够的保护措施。

4) 氟化镁 (镁氟化物)

图5：几种不同窗材料的典型透过率



该材料具有极好的紫外线透过性，但同时也有易潮解的不利因素。尽管如此，氟化镁仍以其接近 115nm 的紫外透过能力而成为一种实用的光窗材料。

如上所述，光电倍增管的光谱响应特性同时取决于光阴极和光窗材料，这一点对选择适当的光电倍增管很重要。

辐射灵敏度和量子效率

$$QE = \frac{S \times 1240}{\lambda} \times 100\%$$

如图 4 所示，光谱响应经常以不同波长下的辐射灵敏度和量子效率来表示。辐射灵敏度 (S) 即为某一波长下的光电倍增管阴极发射出的光电子电流与该波长的入射光能量的比值，单位为 A/W（安培/瓦）。量子效率 (QE) 为光阴极发射出来的光电子数量与入射光光子的数量之比。一般用百分比来表示量子效率。在给定波长下辐射灵敏度和量子效率有如下关系：

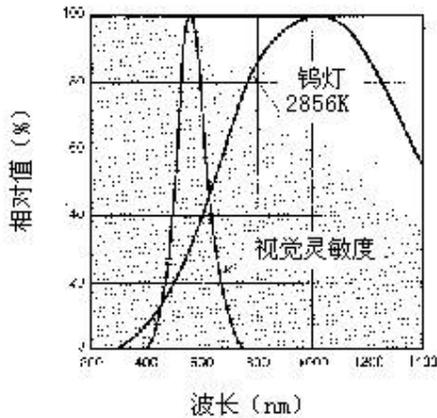
这里 S 为给定波长下的辐射灵敏度，单位为 A/W， λ 为波长，单位为 nm（纳米）。

光照灵敏度

由于测量光电倍增管的光谱响应特性需要精密测试系统和很长的时间，所以提供给用户每一支光电倍增管的光谱响应特性不现实，所以我们提供阴极和阳极的光照灵敏度。

阴极光照灵敏度是使用钨灯产生的 2856K 色温光测试的每单位通量入射光（实际用 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{Lm}$ ）产生的阴极光电子电流。阳极光照灵敏度是每单位阴极上的入射光通量（实际用 $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{Lm}$ ）产生的阳极输出电流（经过二次发射极倍增后）。虽然同样是用钨灯，测量时所加电压要作适当的调整。当光电倍增管具有相同或相似的光谱响应范围时，这些参数显然很有用。除了对钨灯产生的光没有响应的 Cs-I 和 Cs-Te 阴极的管子（这些管子将给出特定波长下的辐射灵敏度），滨松公司的光电倍增管的最终测试数据也常常提供这些参数。

图6: 眼睛对可见光的响应能力与
钨灯2856K色温光的能谱



阴极和阳极的光照灵敏度都是以 A/Lm (安培/流明) 为单位, 请注意, 流明是在可见光区的光通量的单位, 所以对于光电倍增管的可见光区以外的光照灵敏度数值可能是没有实际意义的 (对于这些光电倍增管, 常常使用蓝光灵敏度和红白比来表示)

蓝光灵敏度和红白比

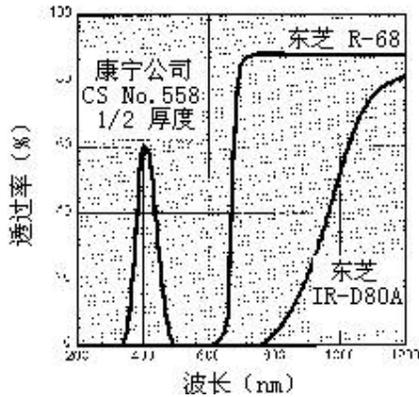
一般使用阴极蓝光灵敏度和红白比来简单地比较光电倍增管的光谱响应特性。

阴极蓝光灵敏度是使用钨灯产生的 2856K 色温光通过蓝色滤光片 (康宁公司 CS No.5-58 磨光至一半厚度) 后测试的每单位通量入射光 (实际用 10^{-5} ~ 10^{-2} Lm) 产生的阴极光电子电流。对于光通量, 通过蓝色滤光片后就不能再用流明表示了, 所以蓝光灵敏度表示为 A/Lm-b (安培/流明-蓝光)。因为与闪烁计数用的 NaI (Tl) 晶体产生的蓝色光谱非常相近, 蓝光灵敏度在使用 NaI (Tl) 晶体的场合比较重要, 对于能量分辨率更是决定性的参数。

红白比用于光谱响应扩展到近红外区的光电倍增管。这个参数是

使用钨灯产生的 2856K 色温光通过红色滤光片 (东芝公司专门用于 S-1 谱光阴极的 IR-D80A 或用于其它阴极的 R-68 滤光片) 后测试的阴极光照灵敏度除以去掉上述滤光片时的阴极光照灵敏度的商。

图7: 透镜的透过率



电流放大（增益）

光阴极发射出来的光电子被电场加速撞击到第一倍增极，以便发生二次电子发射，产生多于光电子数目的电子流。这些二次电子发射的电子流又被加速撞击到下一个倍增极产生又一次的二次电子发射，连续地重复这一过程，直到最末倍增极的二次电子发射被阳极收集，从而达到了电流放大的作用。这时可以观测到，光电倍增管的阴极产生的很小的光电子电流，已经被放大成较大的阳极输出电流。

电流增益就是光电倍增管的阳极输出电流与阴极光电子电流的比值。在理想情况下，具有 n 个倍增极，每个倍增极的平均二次电子发射率为 δ 的光电倍增管的电流增益为 δ^n 。二次电子发射率 δ 由下式给出：

$$\delta = A \cdot E^\alpha$$

这里的 A 为一常数， E 为极间电压， α 为一由倍增极材料及其几何结构决定的系数， α 的数值一般介于 0.7 和 0.8 之间。

$$\begin{aligned} \mu &= \delta^n = (A \cdot E^\alpha)^n = \left\{ A \cdot \left(\frac{V}{r+1} \right)^\alpha \right\}^n \\ &= \frac{A^n}{(r+1)^{\alpha n}} \cdot V^{\alpha n} = K \cdot V^{\alpha n} \end{aligned}$$

这样，具有 n 个倍增极，阴极和阳极间加入电压 V 的光电倍增管，其电流增益 μ 即可表示为：

图8：典型的电压-电流增益曲线

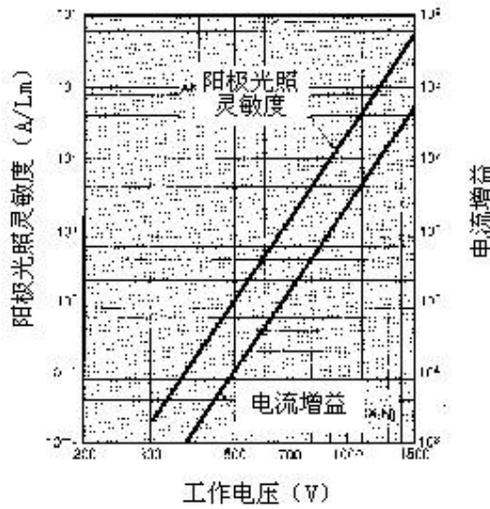
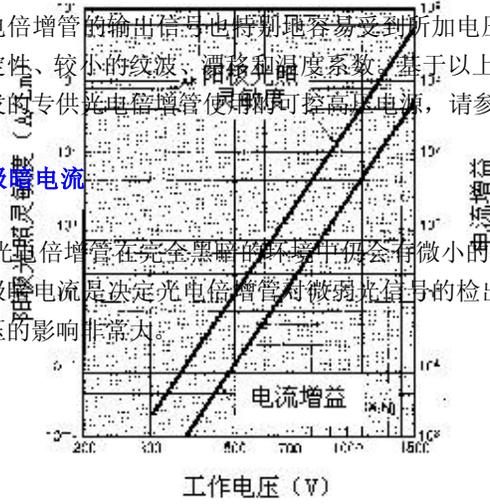


图8：典型的电压-电流增益曲线

一般的光电倍增管有9~12个倍增极，所以阳极灵敏度与所加电压可以有 $10^6 \sim 10^{10}$ 的变化。光电倍增管的输出信号也特别地容易受到所加电压的波动的影响，所以供电电压一定要有很好的稳定性、较小的纹波、漂移和温度系数。基于以上原因，我公司亦可提供充分考虑上述因素设计开发的专供光电倍增管使用的可控制电源，请参阅相关样本。

阳极暗电流

光电倍增管在完全黑暗的环境中仍会有微小的电流输出。这个微小的电流叫做阳极暗电流。阳极暗电流是决定光电倍增管对微弱光信号的检出能力的重要因素。如图9所示，阳极暗电流受电压的影响非常大。



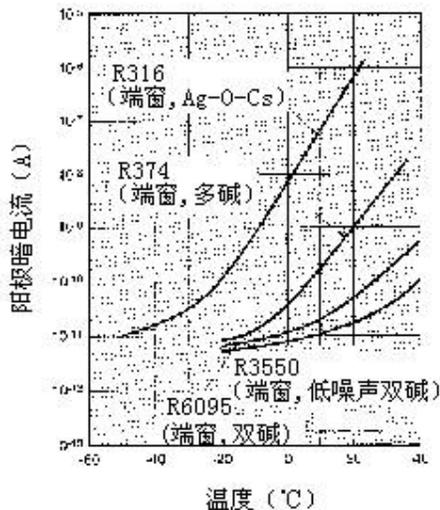
阳极暗电流的主要来源有以下几种：

- 1) 电子热发射

因为光阴极和倍增极材料具有较低的逸出功，所以在室温下会发射出大量的热电子。大部分的暗电流源于这种热电子发射，特别是那些来自光阴极的热电子，因为它们要经过倍增极的放大。将光电倍增管冷却是降低热电子发射的有效手段，这一点对诸如光子计数等要求光电倍增管具有极低暗计数特性的应用显得及其重要。

图 10 给出了几种光阴极的暗电流与温度的关系。在室温下，那些在红光和红外区具有灵敏度的，特别是 S-1 谱的光阴极具有较高的暗电流。滨松公司同样提供了各种尺寸光电倍增管使用的电子制冷器（C659、C4877 等）。详情请参阅相关样本。

图 10: 暗电流的温度特性



2) 残留气体电离 (离子反馈)

光电倍增管内的残留气体与电子碰撞会产生电离。当这些离子撞击光阴极或前几极倍增极时也会发射出二次电子，导致较大的阳极脉冲噪声输出。这些噪声脉冲常常在主信号脉冲后作为后脉冲被观察到，从而可能在测试光脉冲时产生问题。现在的光电倍增管在结构设计时，已经采取措施最小化后脉冲。

3) 玻璃发光

当电子脱离预定轨道飞出，打击到玻璃壳时会产生辉光并导致暗脉冲输出。为了减小此类暗脉冲，可以将光电倍增管的阴极与地等电位，使用正电压，但是使用不方便。为此，滨松公司提供了一种在光电倍增管的玻壳上涂覆导电层并联接至阴极的称作“HA 涂层”的服务。需详细信息请与我公司联系。

4) 漏电流

漏电流源于光电倍增管的芯柱和管基、管座等，是暗电流的一部分。尤其是当光电倍增管工作在较低电压和较低温度时其所占暗电流成分愈大。图 9 和图 10 中暗电流曲线的过分倾斜主要是有漏电流引起的。

光电倍增管的表面污染和水分附着造成漏电流增大，因此要尽量避免。在测定微弱电流时，要

清洁、干燥芯柱、管基、管座等。

5) 场致发射

当光电倍增管工作电压接近极限工作电压时，强大的电场使电极发出场致发射电子，从而造成暗脉冲输出。因此，建议光电倍增管工作在比极限工作电压低 20%~30% 的电压以下。

黑暗环境中的光电倍增管，其暗电流随时间而减小。一般样本中给出的暗电流值为光电倍增管在黑暗中 30 分钟后所测得。

等效输入噪声 ENI

等效输入噪声 ENI 是为了得到与阳极暗电流相等的阳极输出电流所需要的入射光，用瓦特 (W) 或流明 (Lm) 为单位表示。可由下式计算：

$$ENI = \frac{\sqrt{2.3 \cdot db \cdot \mu \cdot \Delta f}}{S} \quad (\text{瓦})$$

其中： q = 电量

Idb = 黑暗中 30 分钟后的阳极暗电流 (单位：安培)

μ = 电流增益

Δf = 系统的带宽 (一般为 1 赫兹)

S = 固定波长下的阳极辐射灵敏度 (安培/瓦)

或阳极光照灵敏度 (安培/流明)

对于一般的光电倍增管，ENI 的值可由上式得出。通常 ENI 的值约为 10^{-15} 和 10^{-16} 瓦。

磁场影响

图11:典型的与光电倍增管轴向垂直磁场的磁屏蔽效果曲线

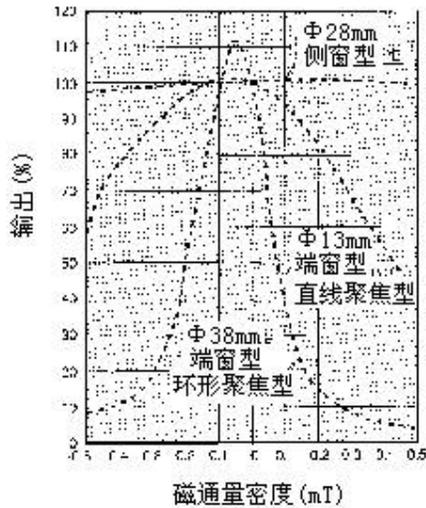
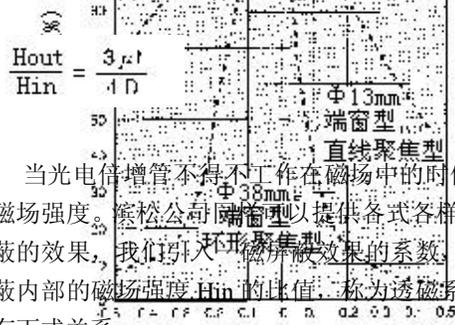


图11:典型的与光电倍增管轴向垂直磁场的磁屏蔽效果曲线

大多数光电倍增管在磁场中的性能会受到磁场的影响。磁场会使电子脱离预定轨道而造成增益的减少。这种减少由与光电倍增管的型号及其在磁场中的方向有关。图 11 给出了几种不同结构和电子倍增系统的光电倍增管在磁场中的所受影响的典型曲线。一般而言，从阴极到第一倍增极的距离越长，光电倍增管就越容易受到磁场的影响。因此，端窗型，特别是大口径的光电倍增管，使用中要特别注意这一点。

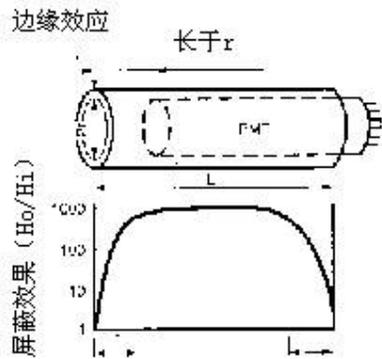


当光电倍增管不得不工作在磁场中的时候，可能需要使用磁屏蔽套筒来减小管子所处环境的磁场强度。赛松公司可以提供各式各样的磁屏蔽套筒，详情请与我公司联系。为了表示磁屏蔽的效果，我们引入磁屏蔽效果的系数，即光电倍增管的磁屏蔽的外部磁场强度 H_{out} 与磁屏蔽内部的磁场强度 H_{in} 的比值，称为透磁系数 μ ，磁屏蔽筒的厚度 t (mm)，内壁直径 D (mm) 有下式关系：

$$\frac{H_{out}}{H_{in}} = \frac{3 \mu t}{4 D}$$

需要注意的是，如图 12 所示，磁屏蔽效果与磁屏蔽筒长出光电倍增管端面的距离有关。可以看到，磁屏蔽筒至少应长出光电倍增管端面一个半径的长度。

图12: 磁屏蔽筒的边缘效应



滨松公司可以提供细网型光电倍增管, 与其他电子倍增系统的光电倍增管相比, 细网型光电倍增管可以避免很高的外界磁场影响。此外, 当环境磁场较强, 而测试光也较强时, 可以考虑使用三倍增极型或四倍增极型的光电倍增管。

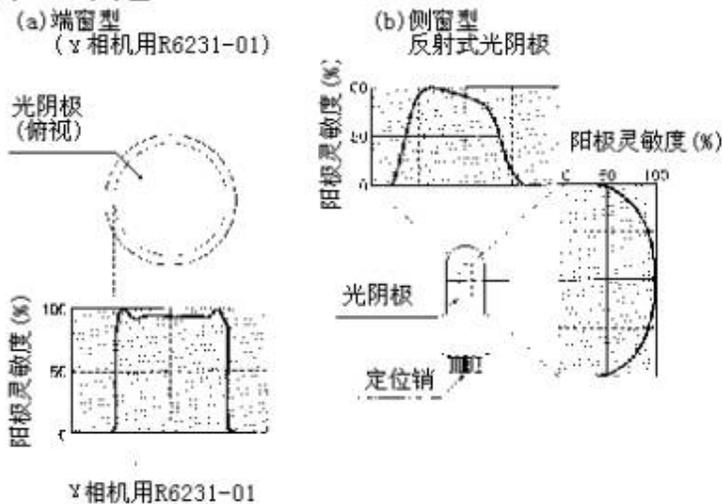
均匀性

均匀性是指入射光照射光阴极的不同位置时的灵敏度变化。

尽管光电倍增管在结构、电子轨迹等的设计上考虑将阴极和倍增极产生的二次电子有效地收集到第一倍增极或下一倍增极上, 但在聚焦和放大过程中仍然会有电子偏离预定轨道, 造成收集效率的降低。这种收集效率的降低, 受光电子从阴极上发射出来的位置的影响, 从而反应出了光电倍增管的均匀性。当然, 均匀性也取决于光阴极本身表面镀层的均匀特点。

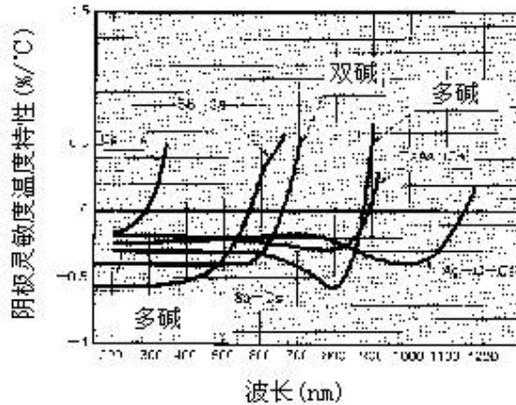
一般, 端窗型光电倍增管因其阴极与第一倍增极的几何结构特点, 在均匀性方面优于侧窗型光电倍增管。特别是用于 γ 相机的光电倍增管的均匀性, 因为光电倍增管的均匀性对 γ 相机的整体性能而言是个决定性的因素。

图13: 均匀性



温度特性

图14: 阳极灵敏度的典型温度特性

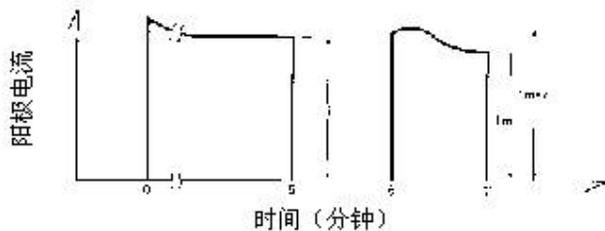


降低光电倍增管的环境温度，可以减少热电子发射，从而降低暗电流。光电倍增管的灵敏度也受到温度的影响。在紫外和可见光区，光电倍增管的温度系数为负值，到了长波截止波长附近则呈正值。图 14 给出了典型光阴极的温度系数与波长的关系。由于在长波截止波长附近温度系数变得很大，所以在一些应用中需要很好地控制光电倍增管的环境温度。

滞后特性

当工作电压或入射光产生变化之后，光电倍增管会有一个几秒钟到几十秒钟的不稳定输出过程。在达到稳定状态之前，输出信号会有些微的过脉冲或欠脉冲现象（参见图 15）。这个过程叫做滞后，滞后特性在分光光度测试中应予以重视。

图15: 滞后测试

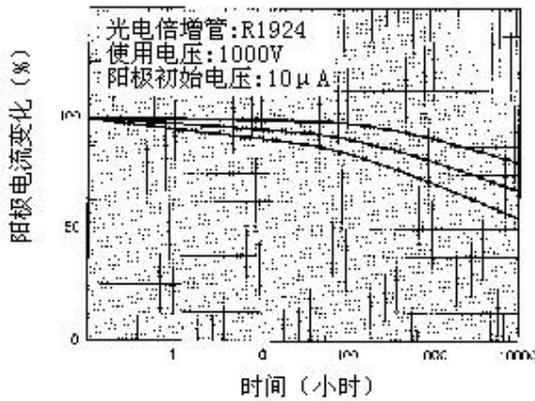


滞后特性是由于二次电子偏离预定轨道和电极支撑物、玻壳等的静电荷引起的。当工作电压或入射光产生改变时，就会出现明显的滞后。对此，滨松公司的侧窗型光电倍增管采用的“反滞后设计”，实际上已经消除了滞后现象。

时间及寿命特性

长时间连续使用光电倍增管，尽管使用条件没有任何改变，其输出电流随时间也会出现轻微的变化。这个变化叫做漂移，或者，当时间长至 10^3 到 10^4 小时的时候，叫做寿命特性。图 16 给出了典型的寿命特性。

图16: 寿命



漂移主要是由于最末倍增极受到大电流轰击造成的。所以，稍低的工作电压有利于减小漂移。在强调稳定性的场合，平均阳极电流最好在 $1\mu\text{A}$ 或更低的水平。

时间特性

在测试脉冲光信号时，阳极输出信号必须真实地再现一个输入信号的波形。这种再现能力受到电子渡越时间、阳极脉冲上升时间和电子渡越时间分散（TTS）的很大影响。

如图 17 所示，电子渡越时间就是脉冲入射光信号（脉冲宽度低于 50nm ）入射到光阴极的时刻，与阳极输出脉冲幅度达到峰值的时刻两者之间的时间差异。阳极脉冲上升时间定义为全部光阴极被脉冲光信号（脉冲宽度低于 50nm ）照射时，阳极输出幅度从峰值的 10% 到 90% 所需的时间。对于不同的脉冲入射光信号，电子渡越时间会有一些起伏。这种起伏就叫做电子渡越时间分散（TTS），并定义为单光子入射时的电子渡越时间频谱的半高宽（FWHM）（参见图 18）。渡越时间分散（TTS）在时间分辨测试中是较主要的参数。

图19: 电压-时间响应特性关系

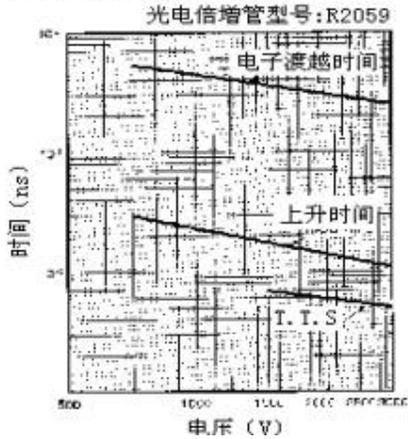
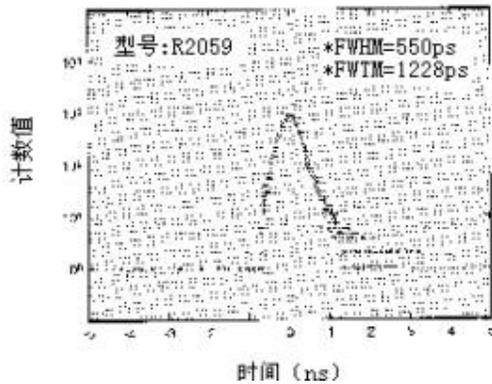


图18: 电子渡越时间分散 (TTS)



时间响应特性取决于倍增极结构和工作电压。通常，直线聚焦型和环形聚焦型倍增极结构的光电倍增管比盒栅型和百叶窗型倍增极结构的光电倍增管有较好的时间特性。而将常规的倍增极替换为MCP的微通道板型光电倍增管，比其他类型倍增极的光电倍增管有更好的时间特性。例如，因为在阴极、MCP和阳极间加入了较短的平行电场，相对于普通的光电倍增管，微通道板型光电倍增管的渡越时间分散（TTS）得到了极大的改善。图19展示了R2059型光电倍增管（直径51mm，端窗型，12倍增极，线性聚焦型）的时间响应特性与工作电压的关系。

分压器设计

图20: 分压电路示意图
(a) DC输出型

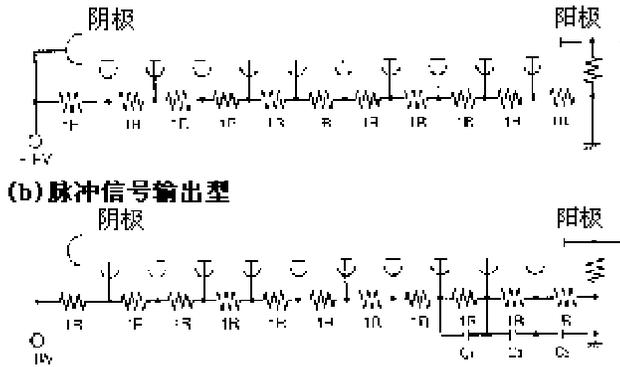


图21: 使用分压器(a)的输出特性

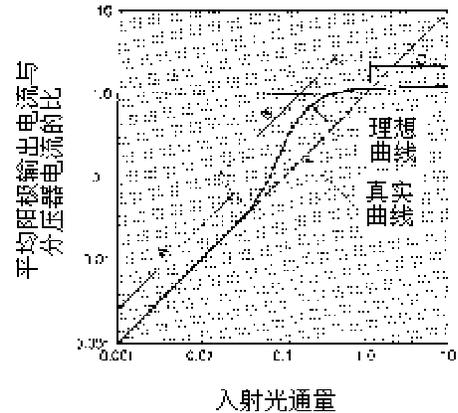
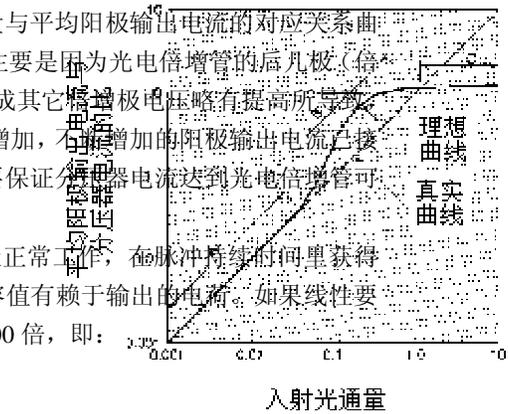


图20: 分压电路示意图
(a) DC输出型

图21: 使用分压器(a)的输出特性

光电倍增管各倍增极的极间电压，一般由包括一系列电阻的分压器来提供。图20为典型的分压电路。(a)为直流(DC)输出型得基本电路，图(b)为测试脉冲信号时使用。

图21为使用电路(a)作为分压器的光电倍增管的入射光通量与平均阳极输出电流的对应关系曲线。在入射光通量区域(B区)，理想的线性发生了背离，这主要是因为光电倍增管的后几级(倍增极和阳极)的电压降低，使得分压器电压重新分配，而造成其它倍增极电压略有提高所导致。其结果是光电倍增管的灵敏度略有提高。随着入射光通量的增加，不断增加的阳极输出电流已接近了流过分压器的电流值而趋于饱和(C区)。因此，一定要保证分压器电流达到光电倍增管可能达到的平均阳极电流的至少20倍以上。



测试脉冲信号光时需要有较大的电流输出。为了使倍增极正常工作，在脉冲持续时间里获得较大的峰值电流(通常为 $20\mu A$)，所以需要较大的电容。电容值有赖于输出的电荷。如果线性要求优于1%，电容的取值要达到每个脉冲的输出电荷的至少100倍，即：

$$C > 100 \frac{I \cdot t}{V} \quad (\text{法})$$

这里的I为峰值输出电流(安培)，t为脉冲宽度(秒)，V是电容所加电压(伏)。

在高能物理等高脉冲输出应用时，极间电压保持不变，而随着入射光的增强，输出会在某一点出现饱和。这是由于随着电极间的电荷密度的增加，逐渐增强的空间电荷效应扰乱了电子束电流的缘故。为了降低空间电荷效应影响，在电荷密度较高的后几个倍增极和阳极上所加的电压应适当地提高，增强后几个倍增极和阳极的电压梯度。基于这种考虑，一般使用锥型分压器(图22)。锥型分压器的使用使得脉冲线性度较使用普通分压器线路(均分压线路)提高了5~10倍。

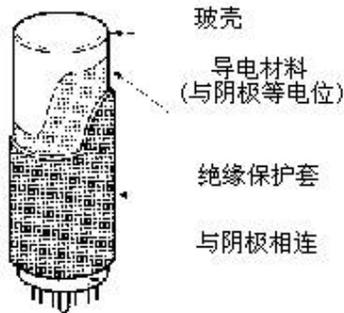
滨松公司可以提供一系列的分压器管座一体化组件。这些组件紧凑、坚固、轻便，采用短线路联接，便于使用，可以最大限度地发挥光电倍增管的性能。

阳极接地与 HA 涂层

如图 20 所示，对于分压器电路，从一般技术上讲，我们习惯于将阳极接地，而使用负高压电源联接至阴极使用。这种设计方案有利于将光电倍增管作为电流源，或方便与前置放大器的联接。但是将阳极接地却使光电倍增管的管壳与接地端或磁屏蔽筒的电场作用，导致电子撞击光电倍增管的内壁，从而产生噪声。另外，对于端窗型光电倍增管，如果接近阴极的面板或侧壁接地，玻璃材料的微小的电导将会在阴极（接入负高压时）与地之间形成微小的电流，而可能造成阴极的恶化。对此，在设计光电倍增管的屏蔽壳，或使用磁屏蔽套筒时要特别注意。

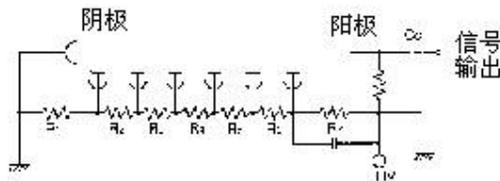
另外，光电倍增管在使用诸如海绵乳胶等的固定材料时也一定要选择绝缘性能好的材料。对于这个问题，可以使用如图 23 所示的在光电倍增管的外壳涂覆黑色导电层并连接到阴极（即 HA 涂层）的方法加以解决。

图 23 HA 涂层



如上面提到的，HA 涂层可以有效地消除外部电压对光电倍增管侧壁的影响。但是如果入射窗处有地电位物料，就没有太好的办法了。如果入射窗玻璃产生打火现象，会对噪声有极大的影响，并且会造成阴极的损坏而降低灵敏度，而这种损坏对于光电倍增管来说是不能恢复的。为了解决这个问题，需要象图 24 那样将光电倍增管的阴极接地，而将阳极接入正高压。例如在闪烁计数领域，为了避免打火，习惯地将阴极接地，而阳极接入正高压。这种设计方案，需要使用一个隔直电容 C_c 将正高压与后续电路分隔开，并使 DC 信号得不到输出。

图 24：阴极接地示意图

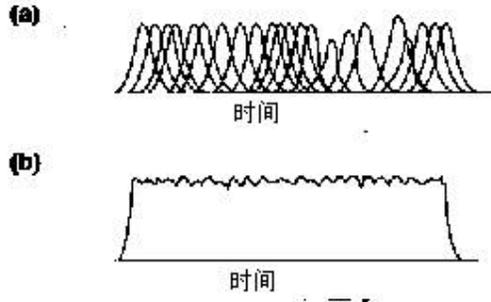


单光子计数

光子计数法对于使用光电倍增管探测极微弱光是个有效的方法，并在天文光度测量、化学发光和

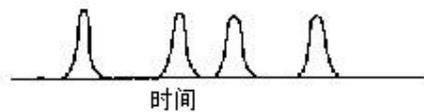
生物发光等领域有较多应用。对于一般的应用，大量光子进入光电倍增管并在阳极输出大量的如图 25 (a) 的脉冲序列。阳极输出是一个如图 25 (b) 的带有波动的直流信号。

图25: 输出信号交迭



当入射光强逐渐降低，以至于入射的光子分散得类似图 26 时，这种状态称作单光子（或光电子）情况。输出的脉冲数与入射光成正比例，并且对这些脉冲计数的方法在信噪比和稳定性等方面，优于采用平均脉冲的电流测定方法。这个对脉冲计数的光量测量技术叫做光子计数法。

图26: 离散的输出脉冲（单光子事件）



如图 27，由于光电倍增管在输出由入射光子产生的单个脉冲的同时，也会输出一系列的噪声脉冲。简单地统计这些脉冲而不采取有效的手段排除噪声脉冲，将得不到正确的结果。排除噪声最有效的方法就是采用区分每个脉冲的大小、高度的方法。

图27: 输出脉冲及区分

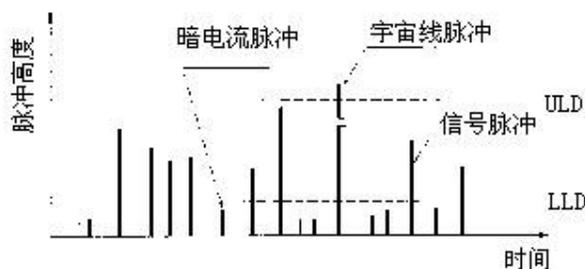
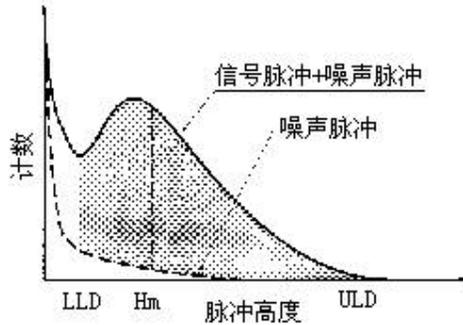


图 28 为光电倍增管输出的典型的脉冲高度分布 (PHD)。在 PHD 中，低脉冲高度基准 (LLD) 在波谷的位置，而高脉冲高度基准 (ULD) 是在输出脉冲较少的底部。绝大部分低于 LLD 的脉冲是噪声，同时绝大部分高于 ULD 的脉冲来源于宇宙射线等外界因素。这样，通过对介于 LLD 和 ULD 之间的脉冲的计数，可以正确地探测光的强度。在 PHD 中， H_m 是脉冲的高度，通常 LLD 为 H_m 的 $1/3$ ，ULD 为 H_m 的 3 倍。大多数情况下，ULD 可以忽略掉。

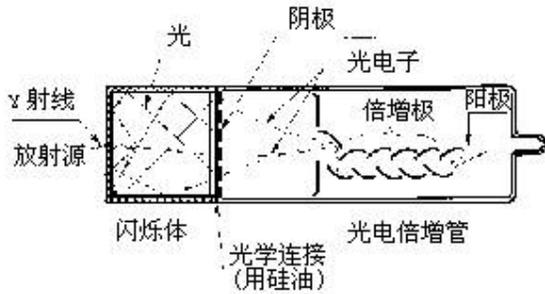
考虑上述内容，PHD 中清晰的波峰和波谷是用于光子计数的光电倍增管的一项重要特性。

图28：典型的脉冲高度分布



闪烁计数

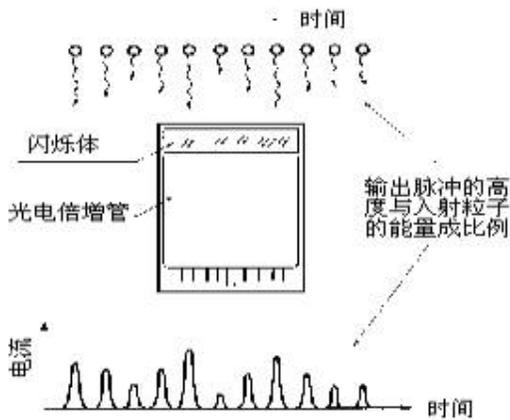
图29：闪烁探头示意图



闪烁计数是探测射线的有效方法，它具有探测效率高和灵敏的特点。闪烁计数器是接收射线后产生光的被叫作闪烁体的透明晶体与光电倍增管的组合体。

射线探测中有两个参数需要测试，一个是单个粒子的能量，另一个是粒子数。射线探测就是要测试这两个数字，即射线的能谱和强度。

图30：入射粒子与光电倍增管输出



当射线进入闪烁体，闪烁体立即发出闪光。这种发光量与射线的能量有一定的比例关系。光电倍

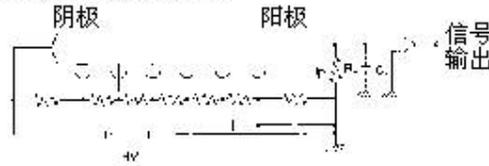
倍增管探测到单个的闪光，并形成包括了能量与脉冲数信息的脉冲输出，如图 30 所示。通过多道脉冲高度分析仪（MCA）分析这些信息，可以得到脉冲高度分布（PHD）或能谱，从而准确地得出不同能量的辐射粒子数。图 31 为光电倍增管与 NaI（Tl）闪烁体相结合探测 γ 射线（ Fe^{55} 、 Cs^{137} 、 Co^{60} ）得出的脉冲高度分布图以及能谱图。对于脉冲高度分布曲线，较为重要的是在各能量水平有一特征峰，进而得出脉冲幅度分辨率（能量分辨率），即放射探测的最主要的特性参数。图 32 给出了探测 Cs^{137} 源能量分辨率的定义。

波高分布谱线取决于响应闪烁体闪光光谱的光电倍增管的量子效率，因此应该选择光谱响应接近闪烁体发光光谱的管子。因此，端窗型双碱阴极光电倍增管与最常用的铯激活的碘化钠闪烁体，即 NaI（Tl）的组合有着广泛的应用。

负载电阻

光电倍增管输出一个电流信号，而与其相联的后续电路，一般是基于电压信号而设计的，因此，常用一个负载电阻来完成电流-电压的转换。在此，我们来研究一下负载电阻的选取。由于光电倍增管输出电流很小，而且实际上常常将其看作一个恒流源，因此，一般认为负载电阻可以任意大地选取，从而从一个较低的电流信号，得到一个很高的电压信号。但是实际上，较大的负载电阻会导致频率响应和输出线性的恶化。

图 34：光电倍增管输出线路

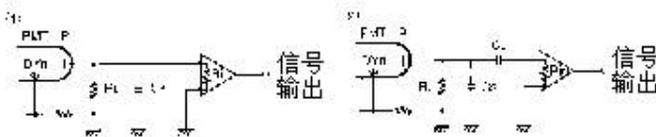


在图 34 里，若负载电阻为 R_L ，光电倍增管阳极和其它电极之间的静电电容量以及由于布线等引起的杂散电容量的总和为 C_s ，则截止频率 f_c 见下式：

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_s \cdot R_L}$$

上式可以看到，尽管光电倍增管和放大器有极快的响应时间，输出线路响应也将受到截止频率 f_c 的限制。如果负载电阻 R_L 值较高，在较高输出电流情况下，负载电阻将导致阳极电位电压降增大，造成阳极-末倍增极电压降低，从而降低了输出线性（输出电流与入射光的比例关系）。

图 35：放大器输入阻抗



$$F_{\text{in}} = \frac{R_L \cdot R_{\text{in}}}{R_L + R_{\text{in}}}$$

下面再讨论一下前置放大器的输入阻抗问题，如图 35，负载电阻为 R_L ，放大器内部输入阻抗为 R_{in} ，则两项并联合成电阻 R_0 可由下式计算：

显然， R_0 低于光电倍增管的负载电阻 R_L ，而且，比如 $R_L = R_{\text{in}}$ ，则有效负载为 R_L 的 1/2。可见，负载电阻的上限实际上就是放大器的输入阻抗，高于放大器的输入阻抗已没有实际效果。上面我们只是考虑了线路的阻抗问题，实际上还应考虑线路的杂散电容、杂散电感等的影响。使用频率较高时，要考虑到包括这些因素的特性阻抗。

综上所述，决定负载电阻值时，要注意以下几点：

在重视频率和振幅特性的场合，务必使用小的电阻；

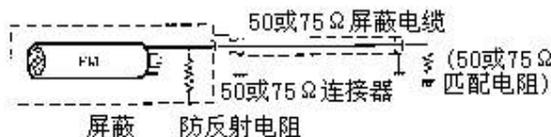
注重输出幅度线性的场合，使用输出电压低于几伏水平的电阻；

负载电阻值等于或小于后接放大器的输入阻抗。

快速输出电路

在检测具有高速脉冲光信号时，通常使用如图 36 所示的具有 50Ω 或 75Ω 特性阻抗的同轴电缆，来连接光电倍增管和后续电路。为了使波形在传输中不失真，后续回路应与电缆的特性阻抗相匹配。这时，从光电倍增管来看，阻抗与电缆的长度无关，就是电缆的特性阻抗，因此，传输波形不会失真。如果后续回路匹配不好，从光电倍增管来看，阻抗同频率有关，而且这个阻抗值因电缆的长度而变，波形将发生畸变。因此必须使用同相应频率范围的电缆相匹配的连接器。

图 36：典型防散弹现象的连接



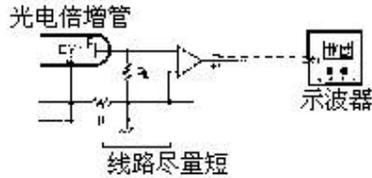
后续回路的不匹配，使得光电倍增管的输出脉冲能量未被完全接收，一部分反射到光电倍增管，如果光电倍增管的电缆一端匹配的话，这种反射的能量回被接收；如果不匹配，光电倍增管是开放的，这种反射能量再次反射给后续端，也就是说，一部分脉冲在电缆中往复，形成散弹反射现象，给后续端，在主脉冲后显示一个振荡脉冲。为了防止发生这种现象，首先要在后续端准确地施行匹配，同时，光电倍增管端也应加一个与电缆阻抗相匹配的电阻。这样，反射脉冲的影响即可消除。但同时，光电倍增管的输出脉冲幅度要减小一半。

另外看一下使用示波器观测高速脉冲波形的情况（见图 37）。这种作法受示波器灵敏度方面的限制，需要接入一个小阻值的电阻，而且一般需要放大器。

用匹配电阻作终端的同轴电缆，其优点是在一定范围内电缆长度对特性没有影响。但匹配电阻很

小，使得输出电压也较低，所以需要—个增益较高的放大器来补偿。放大器的内部噪声影响了正常测试结果。对此，应将光电倍增管与放大器尽可能地接近，并在对频率特性无影响的范围内尽量使用大的负载电阻，以得到所需的输出电压。

图37：利用示波器观测高速脉冲波形



高速宽频带放大器用视频或脉冲 IC 可使制作更为简单。但是，IC 容易产生噪声等问题，在使用时必须充分把握其特性。

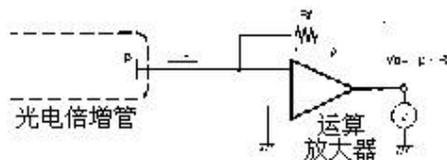
在频率较高的场合，会有基线漂移的问题。这是在信号回路的某个地方使用偶合电容隔断直流分量引起的，因而观测到的零线并非本来接地的零线，而是输出脉冲的平均移动零线。在这个基线以上的脉冲高度会受脉冲重复次数的影响，波形观测、脉冲高度甄别时，要予以注意。

前置放大器

如果手头没有高灵敏度的电流计，用一个运算放大器，接一个便宜的电压表，就可以测定微小电流。这里说明一下光电倍增管的电流-电压变换问题，基本电路如图 38，输出电压 V_0 有下列关系：

$$V_0 = -R_f \cdot I_p$$

图38：使用运算放大器作电流-电压转换

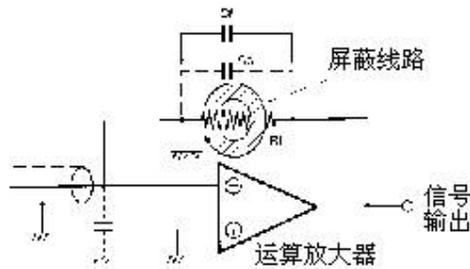


这种关系可以这样来解释，前置放大器的输入阻抗极大，光电倍增管输出的电流全部进入反相放大器的输入端，绝大部分的电流将会流过 R_f ，然后流出前置放大器的输出端，这样，输出电压 V_0 即为 $-R_f \cdot I_p$ 。使用这样的前置放大器，显然不能无限制地增大输出电压，实际上最大输出电压大约等于前置放大器的工作电压。限制测试最小电流的主要因素有，前置放大器的输入偏置电流 (I_{os})、 R_f 的质量，以及其它如使用的绝缘材料的质量、布线方法等。

如果考虑前置放大器的输入偏置电流 (I_{os})，将其叠加进输入电流中，则输出电压变为： $V_0 = -R_f \cdot (I_p + I_{os})$ 。此外，温漂也会带来问题。一般， R_f 采用温度系数较小的金属膜电阻，高阻值电阻则采用真空封装型电阻，温度影响较大的碳膜电阻一般不宜采用。当需要探测低于 100pA 的电流时，除了要考虑上述因素外，整个电路所需材质也要认真选择。例如，不宜采用胶木，而应选用特富龙、聚苯乙烯等材料。此外，一般用途的同轴电缆会因为受力而产生噪声，所以应选用

低噪声同轴电缆线。另外，测试这么低的微电流还要求前置放大器使用 FET 型输入法。

图 39：提高运算放大器的频率响应特性



在图 39 中，如果电容 C_f (包括各种杂散电容的因素) 与 R_f 并联，线路的时间特性为 $(R_f \cdot C_f)$ ，所以，时间参数受到这个值的限制，特别是 R_f 选取较高阻值时，又是个特殊的问题。如图所示，将 R_f 通过接地电位的金属屏蔽板中间的孔，可以减小 C_f ，同时可以提高频率响应特性。当选用同轴电缆输入，电缆的容抗 C_c 和 R_f 形成振荡回路，使信号产生摆动现象和噪声，并加以放大。解决方法是给 R_f 并连 C_f ，以次来减小高频的增益。但正如上面所述，这样作会降低响应速度 $(R_f \cdot C_f)$ 。

本文内容来自互联网，著作权归原作者所有。由电子零件城 (<http://www.epcity.com/>) 整理并制作成 PDF 文件，仅供个人学习之用，不得用于任何商业目的，否则后果自负。如果您认为本 PDF 文件侵犯了您的任何权利，请来信 epcity@epcity.com 通知，本站立即删除。

搜集整理：电子零件城-笨笨兔 (QQ: 154502842) 2004-04-10