

光电发射器件

当物质中的电子吸收足够高的光子能量,电子将逸出物质表面成为真空中的自由电子,这种现象称为光电发射效应或外光电效应。发射出来的电子称为光电子,可以发出光电子的物体称为光电发射体,光电子形成的电流称为光电流。

利用外光电效应设计制作的器件称为光电发射器件,其主要包括光电管和光电倍增管两类。真空光电发射器件具有极高的灵敏度、快速响应等特点,它在微弱辐射的探测和快速弱辐射脉冲信息的捕捉等方面具有相当大的应用空间。

3.1 光电管

光电管分为真空光电管和充气光电管。真空光电管主要由光电阴极和阳极两部分组成,因管内常被抽成真空而被称为真空光电管,有时为了提高光电管的抗击穿能力,在管内部充入某些特定的惰性气体形成充气型光电管,无论哪种光电管,都是基于外光电效应工作,将光信号转换成电信号的二极管,可以说,它们基本上是结构最简单的一类光电发射型器件。

根据对照射光光谱响应区域的不同,光电管也可以分为紫外线管、可见光管及红外线管;而按入射光入射方式的不同,则可分为侧窗式和端窗式两类,前者是指入射光透过玻壳侧壁入射,而后者则是从玻壳顶端进入。光电管还可以根据光电阴极的工作模式分为反射式和透射式,反射式采用不透明的厚层阴极,光线从光电阴极正面入射,光电子也从光电阴极正面射出,但入射光线方向与光电子发射方向相反,所以也可以称为正面受光光电管。透射式则采用半透明的薄层阴极,光线入射方向与光电子发射方向一致,也就是说,光线从阴极背面入射,电子从阴极正面发射,所以就可以称为背面受光光电管。光电管所用光电阴极可以有多种,所以也可以根据光电阴极材料的不同分成铯铷型、银氧铯型、铯钠钾铯型、碲铯型和镓砷铯型等。

1. 真空光电管

真空光电管的结构主要由光电阴极、阳极、玻壳和引出线组成。如图 3.1 所示,当入射

的光线透过光窗照射到光电阴极上时,光电子从阴极发射到真空中,在电场的作用下,光电子在极间做加速运动,最后这些光电子被阳极(接收极)收集。在阳极外电路中,就可以测出光电流的数值,光电流的大小主要取决于阴极的灵敏度和光照的强度等因素。真空光电管的工作原理如图 3.2 所示。

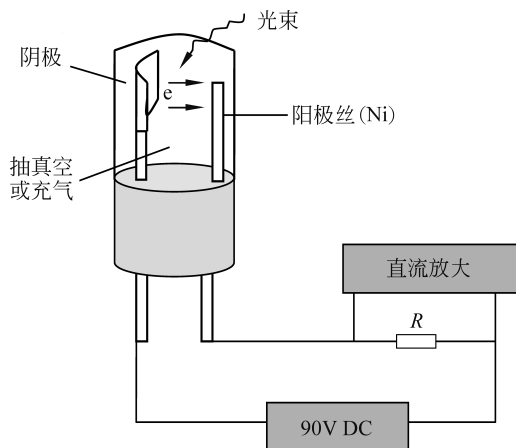


图 3.1 真空光电管的结构

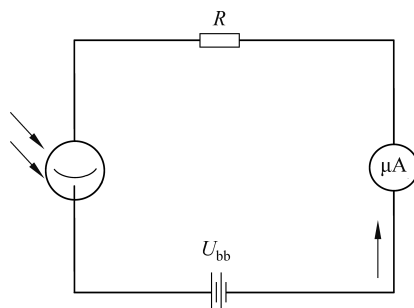


图 3.2 真空光电管的工作原理图

2. 充气光电管

充气光电管的结构和真空光电管的结构相同,只是在真空管内部充满适当的惰性气体,利用气体的电离作用放大电流,以使灵敏度得到提高的光电管就是充气光电管。在光电管中通常充入几十至几百帕的低压惰性气体,光电阴极在入射光照射下所发射的光电子,在加速电场作用下向阳极运动的过程中,会与气体分子发生碰撞而引起分子电离,形成电子和正离子。电离产生的电子在电场作用下与光电子一起向阳极运动并再次使气体电离,如此不断繁衍的结果,使充气光电管的电流增加。同时,正离子也在同一电场作用下向阴极运动,构成离子流,它同样使光电管输出电流增加。因此,在阳极电路内就形成了数倍于真空光电管的光电流,这就是充气放电管的电离放大作用。

对充入充气光电管的气体性质主要要求:化学稳定性良好,不与阴极发生化学作用,也不被阴极吸收,原子量大小适当。原子量太大,正离子渡越时间增长,当频率提高时,惰性显著,输出电流减少,原子量太小,电离电位太高,在一定的阳极电压下电离得到的电子和正离子减少,同样导致输出电流降低。大多数充气管充以氖气,因为氖的原子量比较恰当,又是惰性气体。

光电管在国民经济各部门和国防工业、文化教育及科学研究等领域都有广泛的应用,尤其是自动化和电气化生产的控制中,光电管更是主要的器件。例如,利用光电管对不同波长和不同强度光的敏感特性,可辨别物体的颜色,测量物体的透明度和薄膜材料的厚度,可以测量 X 射线强度、溶液浓度和液体流速;光电管与光电控制线路相配合,可用于机械加工的安全装置,传送带上自动计数,门的自动开闭和种子、水果的检验分类。美国最近研发的一种新型透明光电管,可将普通的窗户玻璃直接改变成太阳能电池板,而且不影响光线通透。

3.2 光电倍增管

利用真空光电管探测微弱光辐射时,由于灵敏度较低,因此必须在其输出电路中接入放大器放大光电流,使得测量装置的性能往往受放大器性能的限制。而利用气体电离放大的充气光电管探测微光辐射时,虽然灵敏度有一定提高,但其他重要参数都不理想,因此,探测微弱光辐射最有效的方法是在真空光电管内增加二次电子倍增极,利用二次电子发射提高其灵敏度,这就是光电倍增管。

光电倍增管是现代精密微辐射探测仪中最关键的电子器件,也是在紫外、可见光和红外波段最灵敏的非成像型探测器,广泛用于光学测量、天文测量、核物理研究、频谱分析等领域。光电倍增管的突出优点是:放大倍数很高,一般可达几万倍到几百万倍,即灵敏度很高;光电特性的线性好,工作频率高;性能稳定,使用方便等。

3.2.1 光电倍增管的工作原理与结构

1. 工作原理

光电倍增管是光电阴极和二次电子倍增器相结合的一种真空光电器件,它的工作原理是建立在外光电效应、二次电子发射和电子光学的基础上的。它的工作过程是:入射光透过光窗照射到光电阴极上,引起阴极发射光电子,光电子在电子光学输入系统和第一倍增极加速电压作用下,被加速、聚焦并打上第一倍增极,倍增极产生几倍于入射光电子的二次电子,这些二次电子在相邻倍增电极间的电场作用下又被依次加速和聚焦,打上第二、第三级倍增极,分别产生第二、第三级二次电子,直到末级倍增极产生的二次电子被阳极所收集,输出被放大了数十万倍以上的电流,使原来十分微弱的光信号得到十分强烈的增强。

2. 结构

光电倍增管主要由光窗、光电阴极、电子输入系统、电子倍增系统、阳极和管壳组成,其工作原理示意图如图 3.3 所示。

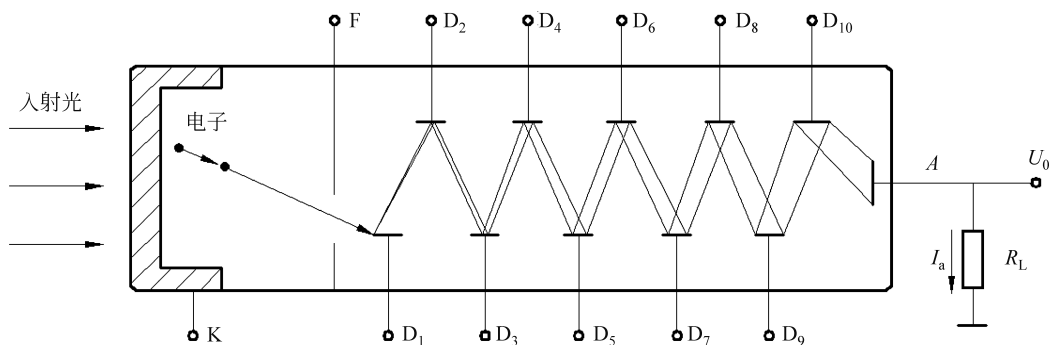


图 3.3 光电倍增管的工作原理示意图

为了满足各种不同的需要,光电倍增管的种类繁多,其分类方法也有多种。例如,按

光电阴极材料的不同分为铯铯、银氧铅、双碱、多碱光电倍增管等；按光窗位置的不同分为端窗式和侧窗式；按光电阴极工作方式的不同分为透射式和反射式。这些分类与光电管的分类是相同的，由于光电倍增管自身的特点，还有一些分类方法，如按倍增极的数目多少分为单级和多级光电倍增管；按倍增系统的结构分为圆笼式（圆周式）、直列式（瓦片式）、盒子式和百叶窗式等；另外，还可按阴极面的形状分为凹镜窗式（包括球形、球冠形、柱面形）、平板镜窗式（包括正方形、长方形、六角形和圆形）及棱镜窗式三类；按管子的特点分为耐高温管、耐高压管、耐振管和高稳定管等。

1) 光电阴极和光窗

光电倍增管光谱响应的长波限制取决于光电阴极材料本身的性能，而短波限制则取决于光窗材料的透射性能，所以两者的选取要根据光电倍增管需要使用的波长范围确定。

光电倍增管常用的光电阴极有以下几种：

- (1) 银氧铯(Ag-O-Cs)阴极，主要用于对红外光的探测。
- (2) 铯铯(Sb-Cs)阴极，近年来已逐渐被铯钾铯(Sb-K-Cs)阴极所取代。
- (3) 双碱阴极，主要指铯钾铯(Sb-K-Cs)或铯铷铯(Sb-Rb-Cs)阴极，噪声较低，主要用于闪烁计数器中。
- (4) 多碱阴极，指铯钾钠铯(Sb-K-Na-Cs)阴极，用于光谱仪与光子计数等方面，有很宽的光谱响应。

(5) 砷化镓(GaAs)阴极，同样有宽的光谱响应，而且灵敏度更高。

光窗指的是光电倍增管管壳上用以透过光辐射的部分。光窗通常分为端面窗与侧面窗两种，侧窗式使用反射型阴极，端面窗式则与透射型阴极配合使用。目前常用的光窗材料有以下几种。

- (1) 钠钙玻璃，它可以透过波长 3100Å 到红外的所有辐射。
- (2) 硼硅玻璃，短波限约为 3000Å。
- (3) 紫外玻璃，短波限约为 1900Å。
- (4) 石英玻璃，短波限为 1700Å。
- (5) 蓝宝石玻璃，它能透过短到 1450Å 的紫外辐射。

2) 电子光学输入系统

光电倍增管的电子光学系统主要包括光电子的聚焦与接收，以及相邻两个倍增极之间二次电子的聚焦与接收两部分。

解决光电子的聚焦与接收的这部分电子光学系统称为电子输入系统，它是指从光电阴极到第一倍增极的区域，一般在这个区域中都设置有聚焦极。电子输入系统的设计应使光电子收集效率尽可能达到 100%，即阴极发射的光电子应力求全部打上第一倍增极，同时还要求光电子从阴极到达第一倍增极的渡越时间的零散尽可能小。

3) 电子倍增系统

电子倍增系统是指由一系列倍增极按一定的几何位置排列构成的综合系统，每个倍增极都由二次电子发射材料制成，所以又称为二次电子发射极。

对倍增极的要求：作为实用的倍增极材料，首先，要求二次电子发射系数 δ 要大，特别是在低电压下要有较大的 δ 值。其次，要求热发射要小，以降低倍增管的噪声；还希望

二次电子发射要稳定,要求在较高的环境温度和较大的一次电流长时间作用下,二次发射系数不下降。最后,要求倍增极容易制备。

倍增系统的结构形式:单级倍增极的倍增管结构简单,但放大倍数只比真空光电管高 7~10 倍,所以目前应用最普遍的还是多级光电倍增管,其中倍增极的结构形式主要有以下几种,如图 3.4 所示。

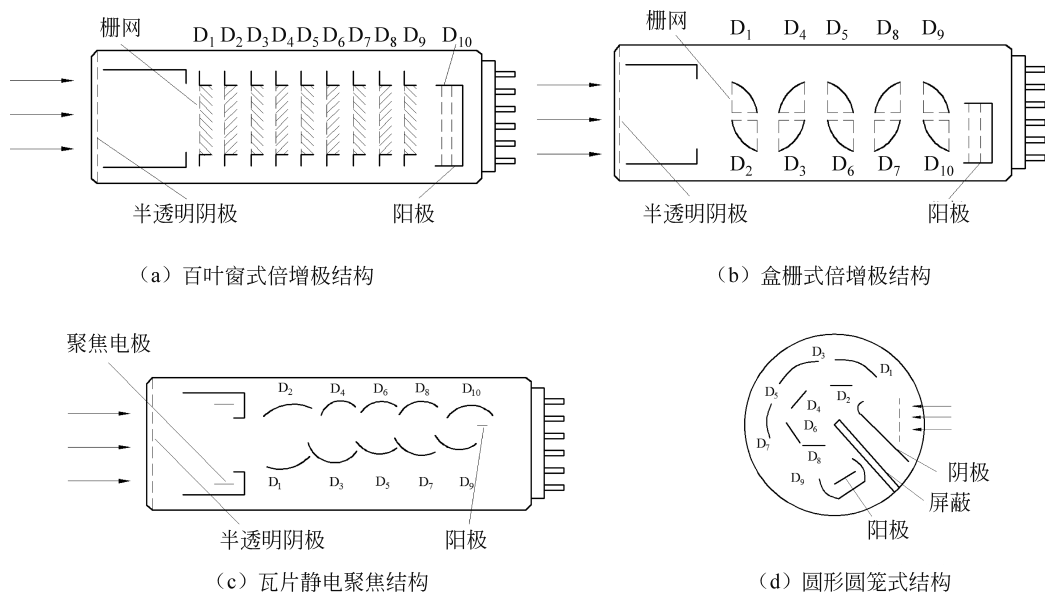


图 3.4 光电倍增管系统的主要结构形式

(1) 百叶窗式。百叶窗式倍增极结构如图 3.4(a)所示。它的每一个倍增极都由一组互相平行并与管轴成一定倾斜角(一般为 45°)的同电位二次电子发射叶片组成,在叶片的电子入射方向上连接有金属网,下一级倍增极上的叶片倾斜方向与上一级倍增极上的叶片相反。叶片连接金属网可以屏蔽前一级减速电场的影响,提高电子的收集效率。百叶窗式倍增系统的特点是:有效工作面大,放大倍数就大,而且输出电流大而稳定。极间电场接近均匀一致,电压波动对放大倍数的影响不敏感。增、减倍增极级数灵活,制作简单;受磁场影响小。其缺点是:有部分二次电子可能未经倍增就穿过倍增极面打到下一级倍增极上,造成放大倍数降低,渡越时间零散增大,其电子收集效率经合理设计后可达 88%。

(2) 盒栅式。盒栅式倍增极的形状是 $1/4$ 圆柱面,并在两端加上盖板形成盒子形状,盖板可以屏蔽杂散电场对阴极工作表面的影响,而在阴极前加有栅网,所以又称盒栅式倍增系统,如图 3.4(b)所示。图中,上、下两个盒栅电极连接在一起构成半圆柱形,左、右两行的电极相向排列,并在上、下方向错开(管轴方向错开)一个圆柱半径的距离。

栅网与盒栅(倍增极)具有相同电位,栅网的存在加强了倍增极对入射电子的吸引力,提高了电子的收集效率,防止了二次电子向入射方向发射。这种倍增系统具有收集效率高、可达 95%,结构紧凑、牢固,倍增极尺寸形状一致、制作方便,均匀性与稳定性较好等

优点。其不足是：电子在倍增极之间聚焦能力差，极间电子渡越时间零散也较大。

(3) 瓦片静电聚焦式。在这种倍增管中，各个倍增极也是半圆柱瓦片形状，但它们沿着管子轴线直线依次排列，如图 3.4(c)所示。因为倍增极形状一样，所以它同样具有放大倍数高、极间渡越时间零散小的优点。

(4) 圆形圆笼式。圆笼主倍增系统中各个倍增极的形状都类似于半圆柱状的瓦片，沿圆周依次排列，如图 3.4(d)所示，这种结构紧凑，体积小巧。使用半圆柱瓦片式的倍增极可以形成对二次电子的会聚电场，使电子轨迹在极间会聚交叉并落在下一级倍增极中心附近，使电子能得到充分利用，倍增极的电子收集效率几乎可达到 100%。同时，倍增极表面的电场比较强，电子在极间的渡越时间零散较小。

除以上 4 种基本的倍增系统结构形式外，还有其他形式的倍增系统。由于对电子的聚焦情况不同，倍增系统可分为聚焦型和非聚焦型。瓦片式倍增极，包括圆笼式和瓦片式结构，都属聚焦型，而盒栅式和百叶窗式结构属非聚焦型。聚焦型结构的共同特点是：聚焦电场大；二次电子被会聚收敛，电子渡越时间的零散性小；可以制成紧凑小巧的结构。

4) 阳极

光电倍增管的阳极是收集最后一级倍增极发射出来的二次电子，并通过引线输出放大电流信号的电极。对阳极的要求首先是接收性能良好，工作在较大电流时阳极附近空间产生的空间电荷效应很小，可以忽略不计。其次是阳极的输出电容要很小，即阳极对最后级及其他级倍增极之间的电容很小。

目前，光电倍增管的阳极都采用栅网状结构，它置于倒数第二倍增极与末级倍增极之间，靠近最后一级倍增极的位置，来自倒数第二级倍增极的电子穿过栅网阳极后，打上末级倍增极，末级倍增极上发射的二次电子被阳极收集。

图 3.5(a)、(b)分别为圆笼式、瓦片式光电倍增管的实物照片。



图 3.5 光电倍增管实物图

3.2.2 光电倍增管的基本特性

1. 光电阴极的灵敏度、量子效率

1) 灵敏度

光电发射阴极的灵敏度主要包括光谱灵敏度与积分灵敏度两种。在单一波长辐射作用于光电阴极时，光电阴极输出电流 I_k 与单色辐射通量 Φ_{ex} 之比称为光电阴极的光谱灵

敏度 $S_{k\lambda}$, 即

$$S_{k\lambda} = I_k / \Phi_{e\lambda} \quad (3-1)$$

其单位是 $\mu\text{A}/\text{W}$ 或 A/W 。

在某波长范围内的积分辐射作用于光电阴极时, 光电阴极输出电流 I_k 与入射辐射通量 Φ_e 之比称为光电阴极的积分灵敏度 S_k , 即

$$S_k = \frac{I_k}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda} d\lambda} \quad (3-2)$$

其单位是 mA/W 或 A/W 。

2) 量子效率

在单色辐射作用于光电阴极时, 光电发射阴极单位时间发射出去的光电子数 $N_{e\lambda}$ 与入射的光子数 $N_{p\lambda}$ 之比称为光电阴极的量子效率 η_λ (或称为量子产额), 即

$$\eta_\lambda = \frac{N_{e\lambda}}{N_{p\lambda}} \quad (3-3)$$

量子效率和光谱灵敏度是一个问题的两种描述方法。它们之间的关系为

$$\eta_\lambda = \frac{I_k/q}{\Phi_{e\lambda}/h\nu} = \frac{S_{k\lambda}hc}{\lambda q} = \frac{1240S_{k\lambda}}{\lambda} \quad (3-4)$$

式中, 波长 λ 的单位为 nm 。

2. 阳极光照灵敏度

当光电倍增管加上稳定电压, 并工作在线性区域时, 阳极输出电流 I_a 与入射在阴极面上的光通量 Φ_k 的比值

$$S_a = \frac{I_a}{\Phi_k} \quad (3-5)$$

称为阳极的光照灵敏度, 单位为 A/lm 。显然, 阳极灵敏度是包括了倍增放大的贡献后, 光电倍增管将光能转换成电信号的能力。

3. 电流增益(放大倍数)

在一定的入射光通量和一定的阳极电压下, 光电倍增管的阳极输出信号电流与阴极信号电流的比值称为电流增益, 也称为放大倍数, 即

$$G = \frac{I_a}{I_k} \quad (3-6)$$

也可以用阳极光照灵敏度与阴极光照灵敏度的比值确定。

如果各级倍增极的二次电子发射系数 δ 均相等, 则阴极光电流经过 n 级倍增后, 电流增益也可以表示为

$$G = \delta^N \quad (3-7)$$

由于 δ 与工作电压有关, 所以放大倍数也是工作电压的函数。

4. 光电特性

光电倍增管的阳极电流与光电阴极入射光通量之间的关系称为光电特性。光电倍增管处于正常工作状态时, 光电特性应呈线性关系, 即 S_a 为常数, 比较好的光电倍增管应该

有宽的线性工作范围,如以偏离直线 3% 作为线性的界限,则满足线性要求的光通量范围可达。当光电倍增管接受强光照射时,光电特性就会出现非线性偏离,一般当光通量超过后,特性曲线就会明显偏离线性关系。光电倍增管工作时,光电阴极不能有强光照射,否则不仅会使光电特性偏离线性,甚至会损坏管子。

5. 暗电流

暗电流是在完全没有外界光辐射,而在规定的阳极电压下测得的输出电流。产生暗电流的原因主要有以下几种。

(1) 阴极和第一倍增极的热电子发射。因为光电阴极和倍增极都是低逸出功的发射体,它们在室温下就会有热电子发射,尤其是阴极和第一倍增极的热发射经过倍增大后就成为暗电流的主要来源。

(2) 极间漏电。正常情况下,极间漏电造成的暗电流远小于热发射电流。

(3) 场致发射。当倍增管极间电压足够高时,电极上的尖端、棱角和零件边缘毛刺等都可能产生场致发射。

(4) 光反馈。玻璃外壳在散射电子轰击下产生荧光,外界的强辐射场也可能引发玻壳发光,这些光通过玻壳和倍增系统反馈到光电阴极,引起光电子发射。

(5) 离子反馈。热发射、场致发射和光反馈产生的电子都可能引起管内残余气体的电离,电离产生的电子和正离子最终都会形成暗电流。

(6) 其他原因。如放射性辐射和宇宙射线都可能作用于光电阴极而产生光电子。

6. 阳极特性(伏安特性)

光电倍增管的阳极特性是指在一定入射光通量,阳极电流与末级电压(最末一级倍增极与阳极之间的电压)之间的关系曲线,即伏安特性,如图 3.6 所示。

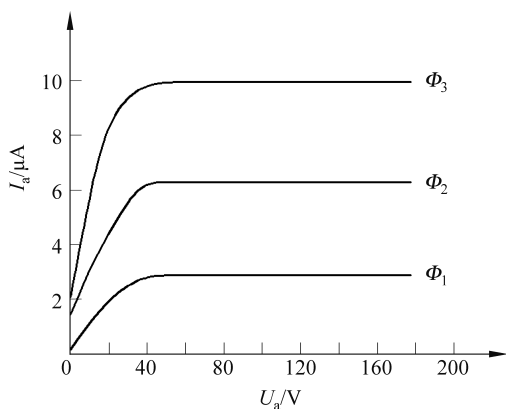


图 3.6 光电倍增管阳极伏安特性曲线

阳极电流一开始随末级电压增加而迅速上升,并很快趋于饱和。阳极电流及其饱和值随入射光通量的增加而增大,达到饱和值所对应的末级电压也会提高。当末级电压进一步提高时,阳极电流又开始下降,这是因为来自倒数第二倍增极的电子在高压下直接打上阳极,减少了最末一级倍增,使放大倍数降低造成的。

7. 稳定性

在入射光通量、工作电压等条件不变的情况下,阳极电流随工作时间的变化程度称为光电倍增管的稳定性,它与管内残余气体等因素有关。光电倍增管的稳定性在闪烁计数和光度学测量中是一个很重要的参量。

8. 噪声和灵敏度极限

光电倍增管的噪声是指它的输出电流偏离平均值的起伏,噪声将掩盖输出的微弱交

变信号本身的变化,因此,噪声的存在决定了光电倍增管可以探测到的交变光通量的最小值,这个最小值称为光电倍增管的灵敏度极限,或探测极限,或噪声等效功率。

光电倍增管中的噪声主要来自光电阴极的光电子发射和倍增极二次电子发射的统计特性而产生的散粒噪声。其次,一些外界干扰(如环境电磁场、背景漏光、电源电压波动等)和结构、工艺上的不完善等也会引发噪声的产生。

噪声常常是伴随着光电倍增管的暗电流考虑的,但两者又是有区别的,暗电流是一个直流成分,而噪声则为输出中引起的统计起伏,信号中的起伏为信号噪声,暗电流中的起伏为暗电流噪声。

3.2.3 光电倍增管的应用

光电倍增管作为灵敏的弱光探测器,在物理、化学、生物、医学、天文、气象、地质及国防事业上得到了十分广泛的应用。光电倍增管既可用于探测恒定的微辐射源,也可用于探测瞬变的微辐射源,可见光、红外光、紫外光、X射线,以及其他短波辐射,直到 γ 射线都是它的探测范围。光电倍增管的主要应用领域如下。

1. 光谱测量

光电倍增管的光谱响应特性使它可以用来测量指定波长范围内的辐射光功率,应用于生产控制、元素鉴定、化学分析和冶金分析等部门。这些检测都是与分光光度计配合进行的,分光光度计就是利用系列分光装置获得的,或者由特殊光源提供特定波长的单色光,检测该单色光在通过测试样品后的光强度,或者比较透过测试样品和标准样品的光强度分析物质的成分,或者检测样品的吸光度,对物质进行定量分析的一种光谱仪器。

发射分光光度计。利用电火花、电弧或气体放电等方法激发物质中的元素发光,光电倍增管就可以测量元素的特征谱线的波长和强度,从而进行定性和定量的化学分析。例如,在钢铁生产中使用真空光量计就可对合金元素的成分做出快速分析。

吸收分光光度计。吸收分光光度计可用于测量气体、透明溶液、半透明悬浊液、乳浊液和生理组织切片等的透明度和光谱吸收区,也可用来确定不透明材料的反射性能。

2. 激光技术

作为激光光辐射的接收器,具有银氧铯、多碱或镓砷铯光电阴极的光电倍增管已广泛应用于激光技术,如激光雷达、激光准直器、卫星激光测距、激光通信及激光行扫描摄影等设备中。

3. 探测电离辐射

记录电离辐射最常用的设备是闪烁计数器。闪烁计数器由闪烁体和光电倍增管组成,它的工作原理是:利用射线引起闪烁体闪烁发光,利用光电倍增管接收闪烁光并输出一个电脉冲直接放大记录。因此,闪烁计数器就可以用来发现和记录由电离辐射引起的单个光闪烁。由于这种电离辐射通常由 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线和中子流等射线激发,从而也就发现和记录了这些射线的存在和强弱。闪烁计数器的优点是:效率高,有很好的时间分辨率和空间分辨率,分别达到 10^{-9} s和 10^{-3} m量级。它不仅能探测各种带电粒子,还能探测各种不带电的核辐射,不仅能探测核辐射是否存在,还能鉴别它们的性质和种

类,不但能计数,还能根据脉冲幅度确定辐射粒子的能量,因此在核物理和粒子物理实验中应用十分广泛。

4. 飞点扫描技术

飞点扫描是一种利用高亮度的细光束对图像进行扫描,然后将被扫描图像发出的光(反射光或透射光)经由光电倍增管放大输出,从而将图像上不同几何位置上的光信号转变成不同时间的电信号,达到析像目的的技术。飞点扫描所用光源是一种特殊的小型阴极射线管(实际上就是一种特殊显像管),称为投射管。投射管的工作原理与显像管一样,只是电子束能量是恒定的,所加电压极高(约 27kV),上屏后亮度非常大,荧光粉的余辉时间极短。另外,电子枪的聚焦质量很好,扫描电子束的分辨率高。因而,电子束在荧光屏上可形成非常明亮、聚焦很好的极小光点,从屏上发出的光束经过透镜照射到图像上,每一瞬间只照射到图像的一个像素,被照亮的像素发出的光(图像为透明,如幻灯片时,发出的是透射光,图像不透明,如进行摄像时,发出的是反射光)射到光电倍增管上,被光电倍增管放大后转换成电信号输出。投射管中的电子束在偏转线圈作用下在荧光屏上进行扫描,扫描方式与显像管中电子束的扫描方式一样,因而屏上发出的光束也就在图像上进行扫描,飞点扫描的名称即由此而来。由于图像上各像素的明暗不同,因而光点扫描时各像素发出的光也就受到图像明暗的调制,使得经光电倍增管输出的电信号也同样得到了图像内容的调制。

5. 光子计数器

当需要探测的光辐射功率低到 $10^{-15} \sim 10^{-11} \text{ W}$ 时,输出信号就可以以单个光电子的脉冲数计算。光电倍增管阴极每发射一个光电子,阳极电路就输出一个脉冲,阳极电荷脉冲经前级放大后就转变为电压脉冲。为了消除暗电流中的直流漏电分量和来源于阴极之外的其他暗电流分量,以避免计数差错,电压脉冲还应经过分析器,只有幅度大于某一预订数值并有一定上升时间特性的脉冲才能通过而被识别出来。

6. 过程控制与快速检验

在固体、液体或气体的自动化流水生产线上可用光电倍增管测量透射光或反射光的光强,用于精确控制成品或半成品的质量,并能检测出它们的缺陷、异常情况以及色泽和透光密度的变化。例如,在光学镀膜机上可对被镀膜层的厚度进行准确控制,对照相正片放大的曝光量进行自动控制等。如果把闪烁体、放射源与光电倍增管组合在一起,还可以控制不透明材料的重量和厚度,如轧钢机轧钢厚度的自动控制。光电控制法还可以用来检验各种物品的质量。例如,水果、种子、糖果、纸张、电阻、宝石、玻璃制品及其他产品的颜色、尺寸存在缺陷,当这些物品从一个或几个光电倍增管面前快速通过时,就可以利用鼓风或机械臂等办法把次品剔除出去。

7. 光密度测量与色度测量

胶片、滤光片、各种溶液的浊度、烟道中的烟量等,都可以利用由光电倍增管构成的光密度测量仪进行光密度测量;同样,由光电倍增管组成的色散测量仪则可以用来定量地比较物体表面的反射颜色和溶液的透射颜色,在造纸厂、墨水厂可以确定纸张、墨水的质量;

在油漆工业上可确定油漆的配料和表面光洁度;在医疗上可作血液分析和生理组织分析;在化学工业上则可用于观察化学过程中的颜色变化等。

8. 石油勘探

在石油勘探中普遍使用放射性测井仪了解地层内的岩性以发现石油,放射性测井实际上就是闪烁计数器的一种应用。放射性测井可分自然伽马与中子伽马两种,前者直接利用岩层(或含同位素的水源)中的 γ 射线进行探测,后者在探头前端要安装中子源,利用它对岩层散射回来的 γ 射线强度的差别判断岩性。

9. 医学应用

如同位素扫描机(黑白、彩色),使用前先给被检查人员体内注射某种同位素和标记化合物,然后利用光电倍增管、闪烁体和准直器等进行扫描探测,利用人体器官不同部位的正常组织病变区域对各种同位素吸收性能的不同,记录 γ 射线强度的差别进行诊断。宫颈癌荧光探测器利用紫外线激发荧光素,根据正常组织与病变区产生的荧光亮度的不同,光电倍增管探测到的信号就有差别,从而做出诊断。对于食道癌与胃癌,根据癌细胞对四环素吸取能力很强,而四环素又是一种荧光材料的特点,也可用荧光探测法进行检查。先让被检查者口服四环素 1.5g,然后抽血检查,用 365nm 的紫外线照射,如果血液中含有四环素成分,则将会发出波长 510nm 的荧光,用对波长 510nm 的可见光具有高灵敏度的光电倍增管就可检测到信号输出,证明被检查者未得癌症;反之,光电倍增管未检测到 510nm 信号输出,被检查者就患有癌症。

10. 污染监控

用光电测量仪可以分析溶液、气体以及其他逸散物中沾污物的性质和污染程度,应用于工厂废品处理与环境卫生部门。

光电管和光电倍增管的应用例子还有很多,如测量 α 射线、 γ 射线和 β 源的剂量,甚至可以用于普朗克常数的测定,它们是各种检测仪器中的关键器件,直接决定仪器的质量和水平。

思考与习题 3

一、选择题

- 光电子发射探测器是基于()的光电探测器。
A. 内光电效应 B. 外光电效应 C. 光生伏特效应 D. 光热效应
- 在光电倍增管中,吸收光子能量发射光电子的部件是()。
A. 光入射窗 B. 光电阴极 C. 光电倍增极 D. 光电阳极
- 光电倍增管的短波限和长波限的区别是()。
A. 光电阴极材料、倍增极材料和窗口材料
B. 光电阴极材料和倍增极材料
C. 窗口材料和倍增极材料
D. 光电阴极材料和窗口材料

4. 下列选项中,符合光电倍增管电子光学系统作用的选项有()。

- A. 将光电阴极发射的光电子尽可能多地汇聚到第一倍增极
- B. 使光电阴极发射的光电子到达第一倍增极的渡越时间零散最大
- C. 使达到第一倍增极的光电子能多于光电阴极的发射光电子量
- D. 使进入光电倍增管的光子数增加

5. 已知某光电倍增管的阳极灵敏度为 100A/lm , 阴极灵敏度为 $2\mu\text{A/lm}$, 要求阳极输出电流限制在 $100\mu\text{A}$ 范围内, 则允许的最大入射光通量为()。

- A. 10^{-6}lm
- B. $5 \times 10^{-6}\text{lm}$
- C. 10^{-7}lm
- D. $5 \times 10^{-7}\text{lm}$

二、填空题

1. 光电倍增管是一种真空光电器件, 主要由光入射窗口、光电阴极、_____、_____和阳极组成。
2. 一定波长的光子入射到光电阴极时, 该阴极发射的光电子数与入射的光子数的比值称为_____。
3. 光电倍增管增益定义为_____。
4. 光电倍增管分压电阻通常要求流过电阻链的电流比阳极最大电流大_____倍以上。
5. 光电倍增管的倍增极主要结构有_____、_____、_____、_____。

三、简答与计算题

1. 何谓“光电发射阈值”? 它与“电子逸出功”有何区别?
2. 何谓光电倍增管的增益特性? 光电倍增管各倍增极发射系数 δ 与哪些因素有关?
3. 说明光电倍增管的短波限和长波限由什么因素决定。
4. 怎么理解光电倍增管的阴极灵敏度与阳极灵敏度? 两者有何区别? 两者有何关系?
5. 已知某光电倍增管的阳极灵敏度为 100A/lm , 阴极灵敏度为 $2\mu\text{A/lm}$, 需要阳极输出电流限制在 $100\mu\text{A}$ 范围内, 求允许的最大入射光通量。
6. 光电倍增管 GDB44F 的阴极光照灵敏度为 $0.5\mu\text{A/lm}$, 阳极光照灵敏度为 50A/lm , 要求长期使用时阳极允许电流限制在 $2\mu\text{A}$ 以内, 求:
 - (1) 阴极面上允许的最大光通量。
 - (2) 当阳极电阻为 $75\text{k}\Omega$ 时, 求最大输出电压。
 - (3) 若已知阴极材料为 12 级的 Cs_3Sb 倍增极, 倍增系数 $\delta = 0.2(U_{\text{DD}})^{0.7}$, 试计算它的供电电压。
7. 总结光电倍增管的基本结构与工作原理。
8. 调研资料, 查阅光电倍增管在实际生活中的应用。