

当光照射到真空中的金属或半导体时,若满足一定的条件则会有电子从其表面逸出到真空中。光电子发射探测器正是基于此效应而研制的一种真空光电探测器件。它具有极高的灵敏度和响应速度,尤其适合于探测微弱光信号及快速弱脉冲光信号。目前,光电倍增管已被广泛应用于医疗设备、分析仪器及工业测量系统。

5.1 光电阴极

在光电子发射探测器中,具有光电子发射效应的材料称为光电阴极(Photocathode)。金属和半导体材料都具有光电子发射功能。但金属光电发射的量子效率都很低,大多数金属的光谱响应都在紫外或远紫外,因此它们只能适用于要求对紫外灵敏的光电器件。随着光电器件的发展,特别是微光夜视器件的发展,需要在可见光、近红外、远红外范围内具有较高量子效率的光电子发射材料,从而研制出了目前被广泛应用的各种实用半导体光电阴极。下面介绍几种常用的光电阴极。

1. 银氧铯光电阴极

银氧铯(Ag-O-Cs)光电阴极是1929年发明的一种实用光电阴极,它对可见光和近红外灵敏,世界上第一只电视摄像管和第一只红外变像管就是用银氧铯做成。

如图5-1所示,从银氧铯光谱响应曲线可以看出,它有两个峰值,一个在紫外区,处在约 $0.35\mu\text{m}$ 处;另一个在红外区,位于 $0.8\mu\text{m}$ 左右,它在整个可见光及近红外都敏感,阈值波长可达 $1.2\mu\text{m}$ 。透射型光谱范围为 $0.3\sim 1.2\mu\text{m}$,光谱响应极大值处的量子效率小于1%,它的灵敏度对透射型的半透明阴极来说,一般为 $30\sim 60\mu\text{A}/\text{lm}$ 。

Ag-O-Cs光电阴极有两个明显的缺点:一是在室温下热电子发射较大,典型值在 $10^{-14}\sim 10^{-11}\text{A}/\text{cm}^2$;二是该光电阴

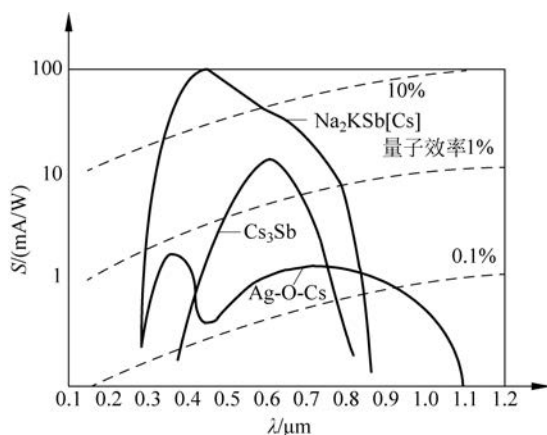


图 5-1 几种光电阴极的灵敏度与波长的关系



5.1
微课视频

极存在疲乏现象,即随所用时间增长,光电子发射能力下降。光强越强,疲乏越厉害;波长越短,疲乏越严重,对红外线几乎观察不到疲乏;阳极电压增高,疲乏增大;温度降低,疲乏增大。

Ag-O-Cs 光电阴极的制备工艺简单、成本低,在实际应用中较为广泛。

人物介绍

吴全德(1923年12月—2005年12月),浙江黄岩人,电子物理学家、教育家,中国科学院学部委员,中国光电阴极理论研究的开拓者。他于1963年首先提出了Ag-O-Cs光电阴极的固溶胶模型,指出了这种光电阴极的结构是金属银超微粒子埋藏于氧化铯半导体中,他从理论上讨论了基质中金属微粒的成核、生长条件,提出了离子晶体或共价晶体中固溶胶粒的形成和生长理论,并给出了金属微粒-半导体薄膜的能带结构和电子态分布,以此为基础讨论了Ag-O-Cs光电阴极的导电机理、光吸收、光电激发和光电子运输过程以及光电子发射的量子产额公式,此理论被国内外权威学者称为“吴氏理论”。



吴全德

2. 单碱锑化物光电阴极

单碱锑化物(Single Alkali Antimonide)是金属锑与碱金属形成的具有稳定光电发射特性的发射体,如 Cs_3Sb 、 Rb_3Sb 、 K_3Sb 。几十年来,对这种光电阴极的成分和结构进行了较深入的研究, Sb - Cs 光电阴极是目前理论和工艺方面最成熟的一种光电阴极,光电管和光电倍增管通常选用这种光电阴极材料。

经化学分析发现 Sb - Cs 光电阴极是材料为 Cs_3Sb 的P型半导体,主要杂质能级是受主引起的,受主能级处在价带附近,所以 Cs_3Sb 阴极热发射低,电导率高。锑铯阴极具有氧敏化的特点,敏化后它的灵敏度可提高1.5~2倍,并使光谱响应曲线向长波方向移动,长波阈值达800~900nm。在 Cs_3Sb 上再蒸发一层 Cs_2O ,其作用是降低 Cs_3Sb 层的电子亲和势,因而长波阈延长,光发射电流增大。

锑化铯光电阴极对紫外线到可见光范围内的光均敏感,其光谱响应在可见光区,如图5-1所示,光谱峰值在蓝光附近,阈值波长截止于红光,其短波部分的光谱响应可到紫外区。它的灵敏度比Ag-O-Cs阴极高,灵敏度为 $100\sim 150\mu A/lm$,量子效率可达15%~25%,暗电流约 $10^{-16} A/cm^2$ 。当探测较高强度的入射光时,会产生大的光电流,但由于锑化铯光电阴极的电阻比多碱锑化物光电阴极的电阻低,所以电流可在阴极内流动而损耗很小。因此,锑化铯阴极适用于测量光强相对较大或低温引起阻值变大而导致动态范围问题的场合。一般地,锑化铯主要用作反射型光电阴极。

3. 多碱光电阴极

1955年,A. H. Sommer发现, Cs - K - Na - Sb 组合的多碱(Multialkali)光电阴极在整个可见光谱内具有比其他光电阴极材料都高的量子效率。

多碱阴极 Na_2KSb 光谱响应曲线如图5-1所示。阴极的量子效率一般为20%左右,高的可达30%,长波阈延伸到870nm,峰值位置在420nm,积分灵敏度在 $150\sim 300\mu A/lm$,灵敏度重复性好,暗电流为 $3\times 10^{-16} A/cm^2$ 。

Sb-Rb-Cs、Sb-K-Cs, 由于材料构成中含有两种碱金属元素, 因此把这类光电阴极称为双碱光电阴极(Bialkali Photocathode)。透射型(Transmission Type)双碱光电阴极与铯化铯光电阴极的光谱响应范围相近, 但灵敏度更高, 暗电流更小。由于这一类光电阴极具有与NaI闪烁器相匹配的探测灵敏度, 因而被广泛应用于辐射测量中的闪烁计数。另外, 反射型(Reflection Type)双碱铯化物阴极虽然在材料构成方面并无不同, 但由于采用了不同的加工工艺, 而使其在长波段也获得了更高的灵敏度, 光谱响应范围从紫外区一直延伸到700nm。

耐高温、低噪双碱铯化物(Na-K-Sb)也包含两种碱金属。它们的光谱响应范围和双碱铯化物光电阴极几乎相同, 但灵敏度比后者要低。一个重要的特点是它们可以在高达175°C的环境中正常工作, 而普通的光电阴极只能工作在50°C以下。这使得它们适合于石油勘探等特殊场合, 因为在这样的场合下, 光电倍增管要长时间处在高温环境中。此外, 在室温下, 这种光电阴极的暗电流很小, 因而在光子计数等对噪声控制有较高要求的弱光测量应用中非常有用。

4. 紫外光电阴极

1) 碘化铯(CsI)光电阴极

碘化铯对可见光辐射不敏感, 因此被称为“日盲”型光电阴极。当入射光波长大于200nm时其灵敏度急剧下降, 因此仅用作真空紫外探测。MgF₂晶体和人造硅因其高紫外线透射率而被选用为窗口材料。尽管碘化铯对波长小于115nm的光具有高灵敏度, 但当采用MgF₂晶体作为光入射窗时, 这种光波并不能被有效地透射。为了探测波长小于115nm的入射光, 通常的办法是在真空环境中去掉光入射窗而改用一个电子倍增器, 该倍增器有第一级倍增极, 在这个倍增极的表面上沉积了碘化铯。

2) 碲化铯(CsTe)光电阴极

碲化铯对波长大于300nm的光不敏感, 因此, 它也被称为“日盲”型光电阴极。透射型和反射型碲化铯光电阴极具有相同的光谱响应范围, 但后者较前者有更高的灵敏度。人造硅或MgF₂晶体常被用作光入射窗材料。

5. 负电子亲和势光电阴极

1) 负电子亲和势光电阴极的原理

1963年美国西蒙斯(R. E. Simmons)根据半导体能带理论提出负电子亲和势(Negative Electron Affinity, NEA)概念。1965年荷兰人席尔(J. J. Scheer)和范拉(J. Van Laar)用铯激活砷化镓得到零电子亲和势的光电阴极, 并首先研制出GaAs-Cs负电子亲和势光电阴极, 光照灵敏度达500μA/lm, 长波限为900nm。此后, 人们又制出其他III-V族化合物光电阴极, 如InP、Ga_xIn_{1-x}As(0<x<1)、Ga_yIn_{1-y}P_zAs_{1-z}(0<y<1, 0<z<1)等, 统称为III-V族化合物负电子亲和势光电阴极。

从图5-2所示的能级图可见, 光电子要逸出表面, 首先要使电子受激到导带上去, 然后向表面运动而散射掉一部分能量, 在到达表面时的电子要克服表面有效电子亲和势才能逸出。实用光电阴极中, 真空能级与体内导带底E_c之间能量差即有效电子亲和势(Effective Electron Affinity)E_{Aeff}均大于0, 即都为正值。光子入射到光电阴极后的能量守恒表达式为

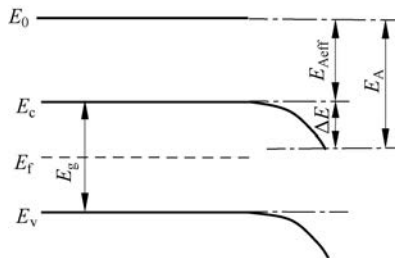


图5-2 表面能带弯曲的能级图

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - (E_{\text{Aeff}} + E_{\text{g}}) \quad (5-1)$$

只有 $h\nu > E_{\text{Aeff}} + E_{\text{g}}$ 时,才有光电子逸出。其阈值波长为

$$\lambda_{\text{th}} = \frac{hc}{E_{\text{th}}} = \frac{hc}{E_{\text{Aeff}} + E_{\text{g}}} \quad (5-2)$$

由式(5-2)可知,如果要扩展探测器长波方向的光谱响应,必须减小 E_{Aeff} ,在 E_{Aeff} 等于零或小于零时,阈值波长最大。

席尔等用 Cs 吸附在 P 型 GaAs 表面得到了零电子亲和势,后来,人们用(Cs,O)吸附在 GaAs 上得到了负电子亲和势光电发射体,其白光灵敏度比当时任何光电发射材料都高,从此开始了用 Cs 或(Cs,O)激活 III-V 族化合物而得到一系列负电子亲和势光电阴极的新时期。

以 GaAs-Cs₂O 光电阴极为例分析。在 P 型 GaAs 表面上蒸积单分子层 Cs,然后交替蒸 O 和 Cs 而形成 Cs₂O 层。P 型 GaAs 的逸出功为 4.7eV,禁带宽度为 1.4eV,Cs₂O 是一种 N 型半导体,它的禁带宽度约为 2.1eV,逸出功是 0.6eV,电子亲和势为 0.4eV。图 5-3 给出了 P 型 GaAs 和 N 型 Cs₂O 的能带图,图 5-4 给出了两种材料结合后表面能带的弯曲情况。表面 N 型材料有丰富的自由电子,衬底 P 型材料有丰富的空穴,它们相互扩散形成表面电荷局部耗尽。耗尽层的电势下降 E_{d} ,造成能带弯曲。体内光生电子在表面附近受到耗尽层区内建电场的作用很容易到达表面,但光生电子仍然具有体内材料导带 E_{c1} 的能级,此时光生电子逸出表面需克服的电子亲和势为

$$E_{\text{Aeff}} = E_0 - E_{\text{c1}} = E_{\text{A2}} - E_{\text{d}} \quad (5-3)$$

由图 5-4 可知,由于掺杂浓度足够高,能带弯曲足够大,使得 $E_{\text{d}} > E_{\text{A2}}$ 或 $E_0 < E_{\text{c1}}$,从而 $E_{\text{Aeff}} < 0$,这样就形成了负电子亲和势。



图 5-3 动态效果

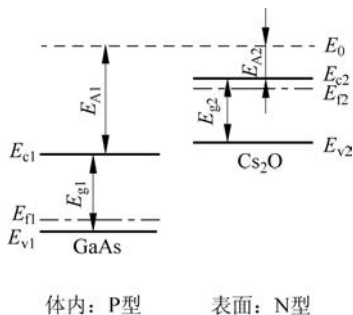


图 5-3 GaAs 和 Cs₂O 的能带图

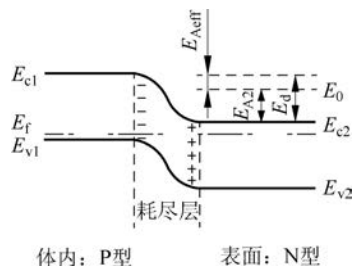


图 5-4 负电子亲和势材料表面能带弯曲情况

在 $E_{\text{Aeff}} > 0$ 的半导体光电发射中,价带电子吸收光子能量后被激发到导带,在向表面运动的过程中,因散射要损失一部分能量,电子停留在导带高能态的时间非常短,在 $10^{-14} \sim 10^{-12}$ s 就失去能量而到达导带底。由于 $E_{\text{Aeff}} > 0$,有一个表面势垒阻挡,这部分电子没有能量逸出,只有在短于 $10^{-14} \sim 10^{-12}$ s 内迁移到表面且具有超过 E_{Aeff} 的剩余能量的电子才能逸出,这部分电子占总激发电子的比例很小,因此这种阴极量子效率低,且逸出深度只有几十纳米而不能再深。

对于 NEA 光电阴极,即使被激电子在 $10^{-14} \sim 10^{-12}$ s 内落到了导带底,只要在它们还没被复合掉之前扩散到表面,就可以逸出,原因有二:一是因为此时不但没有正的 E_{Aeff} 阻

止电子,反而还由于表面负电子亲和势的存在,在表面区建立的电场对电子有一指向表面的作用力,使电子能量增加,因而落到导带底的电子都可以逸出表面;二是由于被激电子在导带底的平均存在时间,或说它们的寿命可长达 10^{-8} s,比从高能态降到导带底时间长几个数量级。只要电子在寿命时间内扩散到表面,包括导带底的电子,都可以逸出表面,所以 NEA 阴极的逸出深度大大增加,与此寿命值相对应的扩散长度也就是 NEA 的逸出深度,约为 $1\mu\text{m}$,与一般半导体光电发射体相比,NEA 材料的光电子逸出深度增加了2~3个数量级,且量子效率显著提高。图 5-5 给出了负电子亲和势光电阴极的光谱响应曲线,其中虚线表示量子效率。

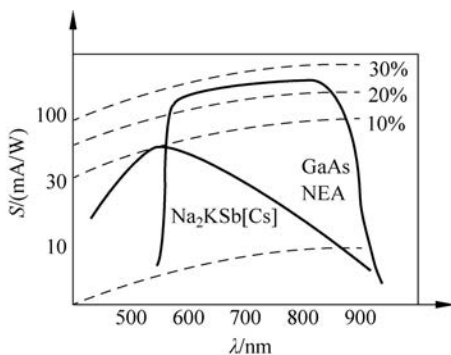


图 5-5 负电子亲和势光电阴极的光谱响应曲线

NEA 光电阴极发射的电子,大部分是从导带底发射出来的,或因散射而远离表面的电子重新返回表面发射出去,正是由于这些冷电子扩散至表面再发射出去,使 NEA 光电阴极发射的光电能量分布比较集中,角度分布也比较集中,减少了像散,分辨力也有明显的提高,NEA 阴极阈值波长也增长了。

2) NEA 阴极的量子效率

量子效率是光电阴极的一个重要特性,它决定着阴极的积分灵敏度,影响着阴极制成的像增强器的亮度增益、噪声、极限分辨率。由于在 NEA 光电阴极中光电子主要是由逸出的热化电子组成的,通过求解热化电子浓度的扩散方程可得出 NEA 光电阴极量子产额。负电子亲和势光电阴极具有以下特点: ①高吸收,低反射性质; ②高量子效率,50%~60%; ③光谱响应可以达到 $1\mu\text{m}$ 以上; ④冷电子发射光谱能量分布较集中,接近高斯分布; ⑤光谱响应平坦; ⑥暗电流小; ⑦在可见、红外区能获得高响应度; ⑧工艺复杂,售价高。

5.2 光电倍增管的原理与结构

5.2.1 光电倍增管的工作原理

一个典型的光电倍增管通常由入射光窗、光电阴极、电子光学系统、电子倍增极和阳极组成,如图 5-6 所示。光入射到光电倍增管后被探测,并经过以下过程形成输出信号:

- (1) 入射光透过入射光窗入射到光电阴极上。
- (2) 光电阴极的电子受入射光子激发,从表面逸出到真空中。
- (3) 逸出的光电子经过电场加速和电子光学系统聚焦后入射到第一倍增极上,由于二次激发,第一倍增极将发射出比入射光

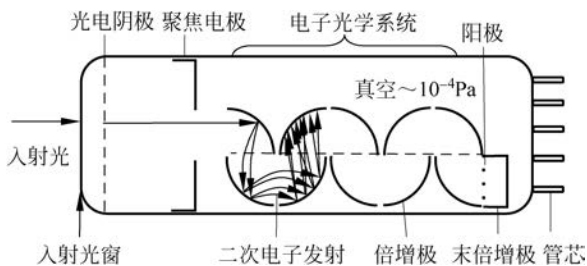


图 5-6 光电倍增管的结构与工作原理



5.2 微课视频



图 5-6 动态效果

电子数目更多的二次电子。

(4) 经过一级倍增后的光电子在第一与第二倍增极之间电场的作用下高速运动至第二倍增极,同样的,在第二倍增极上也产生二次发射和电子倍增。以此类推,入射光电子经 N 级倍增极倍增后,光电子被放大 N 次。

(5) 经过 N 次倍增的光电子被阳极收集,形成阳极电流在负载电阻上产生信号电压。

5.2.2 光电倍增管的结构

光电倍增管的结构如图 5-6 所示。由五部分组成,各部分功能如下: ①入射光窗——接收入射光线的窗口; 光电阴极——在光子激发下产生光电子,并从其表面逸出到真空中; 电子光学系统——一是聚焦尽可能多的从光电阴极发射的光电子到第一倍增极上,二是使光电子在电子光学系统中的渡越时间尽可能相等,以保证光电倍增管的快速响应; 倍增极——产生二次电子发射并使之逐级倍增; 阳极——收集逐级倍增后的光电子,形成光电流。

1. 入射光窗(Input Window)

光电倍增管通常有侧窗和端窗两种形式,如图 5-7 所示。侧窗型光电倍增管是通过管壳的侧面接收入射光,而端窗型光电倍增管则是通过管壳的端面接收入射光。侧窗型光电倍增管一般使用反射型光电阴极,而且大多数采用鼠笼型倍增极结构。端窗型光电倍增管通常使用半透明光电阴极,光电阴极材料沉积在入射光窗的内侧面。一般半透明光电阴极的灵敏度均匀性比反射型阴极好,而且阴极面可以做成从几十平方毫米到几百平方厘米大小各异的光敏面。为使阴极面各处的灵敏度均匀、受光均匀,阴极面常做成半球状。



图 5-7 光电倍增管光窗类型

大多数的光电阴极都对紫外区辐射具有高灵敏度,但由于紫外辐射光容易被窗口材料吸收,因此其短波限由窗口材料的

紫外透射率决定。常用的入射光窗材料有以下几种:

1) MgF_2 晶体(MgF_2 Crystal)

碱金属卤化物在紫外波段具有较高的透射率,但普遍存在水解问题。其中, MgF_2 晶体几乎不水解,紫外透射波长可达 115nm。

2) 蓝宝石(Sapphire)

蓝宝石是一种 Al_2O_3 晶体,其紫外区透射率介于透紫外玻璃和熔融石英之间,但当波长小于 150nm 时透射率却比熔融石英高。由于蓝宝石不需要过渡材料封接,因此整个管子的长度可做得比较短。

3) 熔融石英(Synthetic Silica)

熔融石英透射波长可以低至 160nm 的紫外辐射,并且与混合硅相比,它的紫外吸收更小。由于石英和 Kovar 的热膨胀不同,因此不适合作为芯柱材料。熔融石英作窗口时,一般用硼硅玻璃做芯柱,然后把不同膨胀系数的玻璃材料做过渡封接,最后与石英封接。由于过渡封接处容易炸裂,故操作时应加倍小心。

4) 透紫外玻璃(UV-transmitting Glass)

正如名字所言,该玻璃透紫外辐射性能很好。紫外波段的截止波长约 185nm。

5) 硼硅玻璃(Borosilicate Glass)

硼硅玻璃是最常使用的窗口材料。由于其热膨胀系数和 Kovar 合金非常接近,因此也被称为“Kovar 玻璃”,适于作为芯柱材料。硼硅玻璃并不透射波长小于 300nm 的紫外光,因而不能用作探测该紫外波段辐射的窗口材料。此外,某些采用双碱光电阴极的端窗型光电倍增管在制作时使用了一种特殊的硼硅玻璃(也称无钾玻璃),该玻璃仅含有很少量的钾,避免了钾带来的背景噪声。对于闪烁计数这类要求低背景噪声的应用而言,使用由硼硅玻璃制作光电倍增管入射光窗无疑是最佳选择。

2. 光电阴极(Photocathode)

光电阴极是光电倍增管中的光电子发射器件。目前,大多数的光电阴极采用的是含有碱金属的复合半导体材料,具有较低的逸出功。常用的光电阴极有 Ag-O-Cs、Sb-Cs,以及多碱(Sb-K-Na-Cs)光电阴极、负电子亲和势光电阴极(GaAs: Cs-O)等,主要根据所探测光的光谱范围来选取。实际应用中的光电阴极大约有十种,尽管种类繁多,但每一种光电阴极都可归结为透射型(半透明)或反射型(不透明)且具有不同器件特性。20 世纪 40 年代早期,美国电子工程设计发展联合协会(Joint Electron Devices Engineering Council, JEDEC)提出了一种以“S 号”表征不同光电阴极光谱响应的方法,其分类的依据就是光电阴极和窗口材料的组合方式。

3. 电子光学系统(Electron Optical System)

电子光学系统主要有两方面的作用,一是聚焦尽可能多的从光电阴极发射的光电子到第一倍增极,而对于杂散热电子则将其散射掉以提高信噪比,一般用电子收集率 ϵ 表示;二是使阴极发射的光电子在整个电子光学系统中的渡越时间(Transition Time)尽可能相等,以保证光电倍增管的快速响应,该参数常用渡越时间的离散性表示,设计电子光学系统时应尽可能使渡越时间的离散性接近零。

4. 电子倍增极(Electron Multiplier)原理

为了在电极上更有效地收集光电子和二次电子,并使渡越时间的离散性最小化,需要对电子的运动轨迹进行分析以优化电极的设计。

电子在光电倍增管内的运动受电场的影响,而电场的分布又取决于电极的配置、空间布局及其上施加的电压这三个因素。借助于高运算速度、大存储空间的现代计算机对电子的运动轨迹进行数值分析已经成为可能,并可借此预言特定条件下的电子运动轨迹,从而优化电极的设计。

设计光电倍增管的关键在于规划好电子从光电阴极到第一倍增极的运动轨迹。具体设计时通过综合考虑光电阴极的外形(平面窗或球面窗)、聚焦极的外形、排列和外加偏压这几个因素,可以得出一个最优的电子运行轨迹,使得光电阴极发射的光电子有效地聚焦在第一倍增极上。当某种应用环境要求光电倍增管具有最小的电子渡越时间时,则电极的设计除了选用最恰当的配置外,还需要它能形成比通常情况更强的电场。

整个倍增极部分通常有几个甚至十几个二次发射电极(倍增极),这些电极都做成曲面状。为了防止离子或光从未极向前极反馈,需要合理安排各倍增极在管内的位置。

1) 电子倍增极

如前所述,通过合理设计光电倍增管内部的电极结构及电势分布,可以获得最优的性能。从光电阴极发射的光电子被第一级到最末级(可达 19 级)的所有倍增极倍增并最终被

阳极收集,其光电流放大倍数可达 10^8 倍。

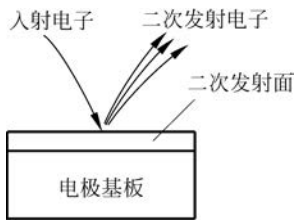


图 5-8 倍增极的二次发射、倍增模型

倍增极采用的二次发射材料主要是碱金属铯化物、氧化铍、氧化镁、磷化镓和磷砷化镓。这些材料涂覆在用镍、不锈钢或镀铜合金制作的衬底电极上,形成倍增极。图 5-8 显示了倍增极的二次发射、倍增模型。

当具有能量 E_p 的基础电子(Primary Electron)(或称一次电子)打到倍增极表面时,将发射 δ 倍二次电子。 δ 称为二次发射系数,定义为二次发射电子数与入射基础电子数的比。理想情况下,若每一倍增极的平均二次发射系数为 δ ,则具有 N 级倍增极的光电倍增管的总电流增益为 δ^N 。

由于有众多的倍增极结构可用,而它们的电流增益、时间响应、线性度等因倍增极数及其他因素不同而各不相同,因此具体应用时应根据实际需要适当选用最佳的倍增极类型。

2) 倍增极结构

根据电子轨迹的形式可将倍增极分为两大类,即聚焦型(Focusing Type)和非聚焦型(Non Focusing Type)。凡是由前一倍增极来的电子被加速和会聚在下一倍增极上,在两个倍增极之间可能发生电子束交叉的结构称为聚焦型。非聚焦型倍增极形成的电场只能使电子加速,电子轨迹都是平行的。

目前,光电倍增管采用了许多不同类型的倍增极,由于这些倍增极的内部结构和总级数不同,因此在增益、时间响应、均匀性和二次电子收集效率等参数上表现出不尽相同的特性。实际中应根据应用的需要选用最合适的倍增极类型。典型的倍增极结构如图 5-9 所示。

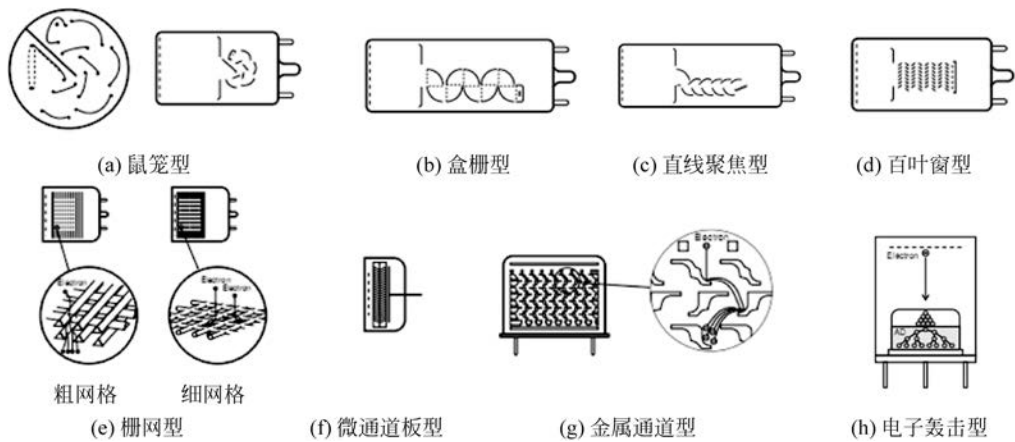


图 5-9 电子倍增极结构

(1) 鼠笼型(Circular-cage Type)。鼠笼型倍增极的优点是结构紧凑,它在所有侧窗型及部分端窗型光电倍增管中都有使用。同时,它还具有时间响应快的特点。

(2) 盒栅型(Box-and-grid Type)。这种结构的倍增极包括一系列的 $1/4$ 圆柱形的倍增极,倍增极结构相对简单,被广泛用于端窗型光电倍增管,具有较高的光电子收集效率。使用该倍增极的光电倍增管具有很高的探测效率和良好的均匀性。

(3) 直线聚焦型(Linear-focused Type)。与盒栅型倍增极类似,直线聚焦型倍增极也

被广泛应用于端窗型光电倍增管中。它的主要特点是时间响应快,时间分辨率高及脉冲线性度好。

(4) 百叶窗型(Venetian Blind Type)。百叶窗型倍增极产生的电场使电子的收集变得非常容易,它主要用于具有大直径光电阴极的端窗型光电倍增管。该结构一致性较好,有大的脉冲输出电流,多应用于时间响应要求不高的场合。

(5) 栅网型(Mesh Type)。该类型由栅网状电极堆叠而成,分为大栅网型和细栅网型两类。它们都具有很好的输出线性度和很强的抗磁场干扰特性。当配以十字交叉型阳极或多阳极使用时,可以检测入射光的位置。细栅网型主要用于制作在强磁场环境中使用的光电倍增管。

(6) 微通道板型(Microchannel Plate, MCP)。该类型倍增极结构使用了一块 1mm 厚微通道板作为整个基底,将上百万微小玻璃管(通道)彼此平行地集成为薄形盘片状而形成。这种结构在时间分辨率上较其他分散型倍增极结构有极大的提高。在强磁场环境中也有很稳定的光电流增益,当配以特殊的阳极使用时,它还具有位置敏感的能力。

(7) 金属通道型(Metal Channel Dynode)。这种倍增极结构由通过先进微细加工技术制造而成的薄电极构成,并按照计算机仿真得到的电子运动轨迹来对之进行精确堆叠。由于每个倍增极彼此都非常靠近,因而电子运动的路径很短,保证了其优异的时间特性和稳定的增益,即使处在磁场环境中也是如此。

(8) 电子轰击型(Electron Bombardment Type)。在这种结构中,光电子被强电场加速后打到半导体上,其能量传递给半导体,从而产生电流增益。在这种简单的结构中,也表现出噪声低、均匀性好及线性度高的特点。

3) 常用的倍增极材料

(1) 复杂半导体型(Complex Semiconductor)。如铯化铯(CsSb)、铯铷钾(KCsSb)等碱金属化合物,它们不仅是良好的光电阴极材料,也是常用的二次电子发射材料。对 CsSb 而言,当入射的一次电子能量为 200eV、厚度为 80~100nm 时,二次发射系数约为 7;当入射的电子密度较大时,稳定性较差。

(2) 合金型(Alloy Type)。合金型二次发射材料主要是指由重金属与轻金属制成的合金倍增极。经过特殊加工,使合金极的表面形成轻金属氧化物的半导体薄膜。在各种合金极中,表面形成的氧化物有氧化镁(MgO)、氧化铍(BeO)和氧化钡(BaO)等几种,它们在光电倍增管中被广泛采用。如 Cu-Be 合金发射极,在工作过程中疲劳小,稳定性好,不受磁场的干扰,能承受较大的电流密度;室温下热发射极小,在每平方厘米上每分钟发射约 10 个电子,比 CsSb 电极要小几个数量级。它的缺点是在低能量一次电子入射时,二次发射系数较小。

(3) 负电子亲和势型。目前主要用 Cs 激活的磷化镓(GaP: Cs)和 Cs-O 激活的硅(Si: Cs-O)等负电子亲和势型二次电子发射材料。这种材料的二次电子发射系数较大,可达 100 以上。即使一次电子的能量达到几千电子伏特,其二次发射系数仍继续上升,其原因在于负电子亲和势发射材料的逸出深度远大于一般材料,高能量的一次电子轰击时,可以在很深的范围内激发更多的电子。

5. 阳极(Anode)

光电倍增管的阳极是收集经多级倍增极倍增后的二次电子并通过引线向外电路输出光电流的电极。阳极的结构在设计时也应按前面讨论的电子运动轨迹进行优化。通常,阳极

被设计成杆状、平板状或栅网状结构。对于阳极的结构要求最重要的一点是在阳极与末级倍增极之间要有足够的电势差,以防止产生空间电荷效应,并能输出大的光电流。



5.3
微课视频

5.3 光电倍增管的主要特性参数

光电倍增管的特性参数主要包括灵敏度、电流增益、光电特性、时间特性、暗电流等。

1. 灵敏度

灵敏度是衡量光电倍增管探测光信号能力的一个重要参数,一般是指积分灵敏度,其单位为 $\mu\text{A}/\text{lm}$ 。光电倍增管的灵敏度一般包括阴极光照灵敏度、阳极光照灵敏度。

1) 阴极光照灵敏度 S_k (Cathode Luminous Sensitivity)

采用色温为 2856K 标准白炽钨丝灯光源发出的光照射到阴极上所产生的光电流除以入射光通量,即

$$S_k = \frac{I_k}{\Phi} (\mu\text{A}/\text{lm}) \quad (5-4)$$

光电倍增管阴极光照灵敏度的测量原理如图 5-10 所示。入射到阴极 k 的光照度为 E , 光电阴极的面积为 A , 则光电倍增管的光通量为 $E \cdot A$, 则阴极光照灵敏度计算式为

$$S_k = \frac{I_k}{E \cdot A} (\mu\text{A}/\text{lm}) \quad (5-5)$$

在测量中,为了使光电倍增管工作在两电极状态,每一个倍增极电极被接到同一电势,如图 5-10 所示。测量时入射的光通量通常为 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{lm}$ 。如果光通量太大,由于光电阴极的表面电阻就会产生测量误差,最佳的光通量应该根据光电阴极的尺寸和材料而定。皮安电流表通常用来测量从纳安到微安变化的光电流,必须采取适当的措施来去除漏电流和其他可能的噪声。除此之外,千万要防止在灯座和灯架上的污染并保持周围不能太潮湿,提供安全的电防护。光电倍增管应该工作在阴极电流完全饱和的情况下,这个电压一般是 $100 \sim 400 \text{V}$ 。为了保护电路,安培表通过一个 $100 \text{k}\Omega \sim 1 \text{M}\Omega$ 的电阻连到阴极上。

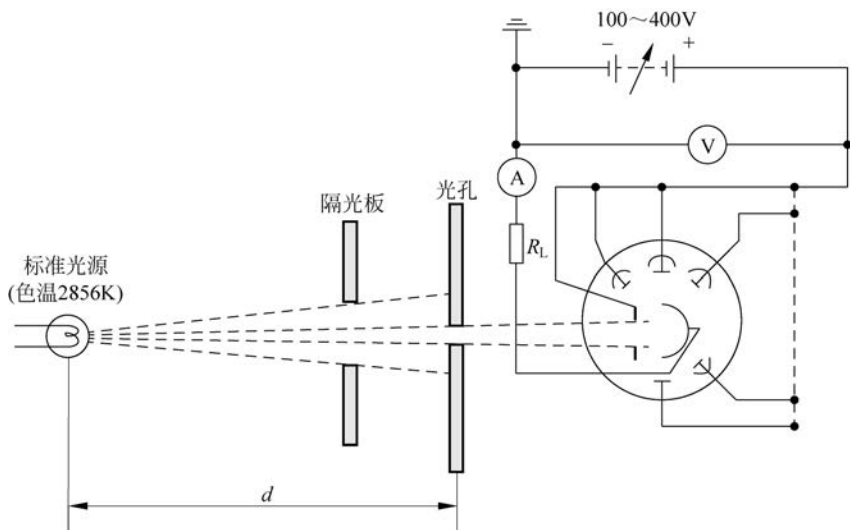


图 5-10 光电倍增管阴极光照灵敏度的测量原理

2) 阳极光照灵敏度 S_a (Anode Luminous Sensitivity)

采用色温为 2856K 标准白炽钨丝灯光源发出的光照射到阴极上时, 阳极产生的光电流除以入射到阴极上的光通量, 即

$$S_a = \frac{I_a}{\Phi} (\text{A/lm}) \quad (5-6)$$

光电倍增管阳极光照灵敏度的测量原理如图 5-11 所示。

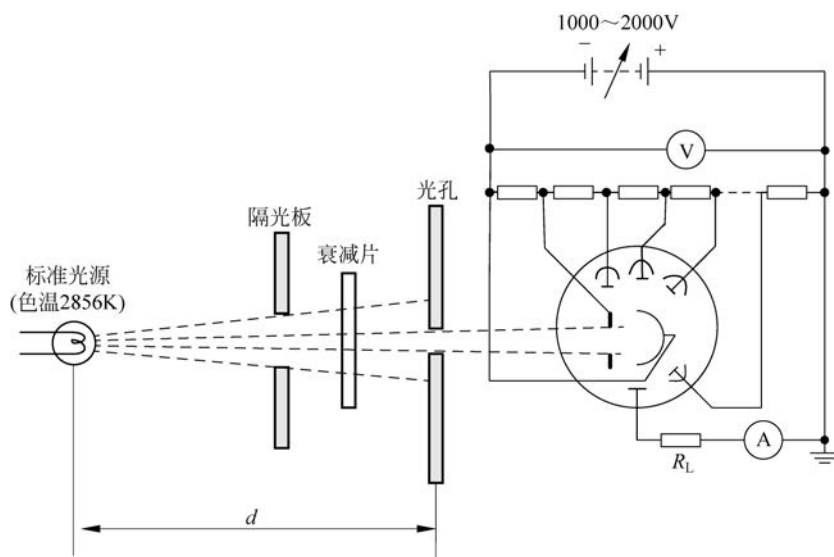


图 5-11 光电倍增管阳极光照灵敏度的测量原理

在这种测量方式下, 如图 5-11 所示, 在每一个电极上加一个适当的电压, 虽然与测阴极光照灵敏度所使用的钨灯一样, 但是通过一个中性滤光片光通量被减到 $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{ lm}$ 。安培表通过一个串联电阻接到阳极上, 这里使用分压电阻使测量具有小的容许偏差和好的温度特性。

2. 收集率和增益

1) 收集率

光电倍增管的电子倍增极设计考虑到了电子轨迹, 以使在每一个光电倍增极电子都能被有效地倍增。然而, 一些电子可能从原有路线偏离, 从而对倍增没有贡献。总的来说, 光电子落在第一个光电倍增极有效区的概率叫作收集率 (Collection Efficiency), 用 ϵ 表示。这个有效区是指光电子在后续的光电倍增极中能被倍增而不会偏离其轨道的区域。所以第一倍增极的收集率是很重要的。如果阴极到第一个倍增极电压低, 进入有效区的光电子将变少, 导致了收集率轻微的下降。

2) 增益

二次电子发射系数 δ 是光电倍增极极间电压 V 的函数, 二者关系为

$$\delta = C \cdot V^k \quad (5-7)$$

式中, C 为常数; k 由光电倍增极的结构和材料决定, 一般为 $0.7 \sim 0.8$ 。

从光电阴极中发射出光电流 I_k 打到第一个光电倍增极, 产生次级光电流 I_{d1} , 第一倍增极的二次电子发射系数 δ_1 定义为

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad (5-8)$$

这些电子在光电倍增管中被逐级放大, N 和 $N-1$ 的二次电子发射系数定义为

$$\delta_N = \frac{I_{dN}}{I_{d(N-1)}} \quad (5-9)$$

如果光电倍增管总收集率为 ϵ ($\epsilon = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \dots \cdot \epsilon_n$), 阳极电流计算公式为

$$I_a = I_k \cdot \epsilon \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_N \quad (5-10)$$

然后

$$\frac{I_a}{I_k} = \epsilon \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_N \quad (5-11)$$

定义增益(Gain) G 为阳极电流与阴极电流之比, 即

$$G = \frac{I_a}{I_k} = \epsilon \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_N \quad (5-12)$$

相应地, 当光电倍增管的收集率 $\epsilon = 1$ 、级数为 N , 各倍增极极间供电电压 V_{DD} 相等时, 增益与供电电压有关, 关系式为

$$G = (CV_{DD}^k)^N = C^N \left(\frac{V}{N+1} \right)^{kN} = \frac{C^N}{(N+1)^{kN}} V^{kN} \quad (5-13)$$

该式表明增益与电压的 kN 次方成正比。图 5-12 所示为典型的增益与供电电压之间的关系, 直线的斜率变为 kN , 电流倍增随着供电电压的增加而增加, 这意味着光电倍增管的增益易受到高供电电压变化的影响, 如漂移、纹波、温度稳定性、输入和负载。

3. 暗电流

光电倍增管在无辐射作用下的阳极输出电流称为暗电流(Dark Current)。因为光电倍增管是用来探测微弱光信号的, 所以暗电流越小越好。暗电流产生的主要原因有: 光电阴极和倍增极的热发射、欧姆漏电、玻璃壳放电和玻璃荧光、场致发射、残余气体放电、宇宙射线、环境 γ 射线和玻璃外层中的放射性同位素引起的噪声电流。

暗电流随供电电压的增加而增加, 但不是线性增加。图 5-13 所示是一个典型的暗电流和供电电压的特性曲线。

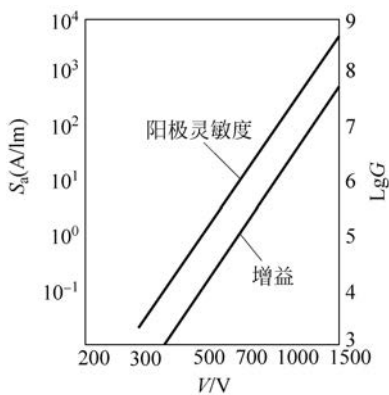


图 5-12 增益与供电电压之间的关系

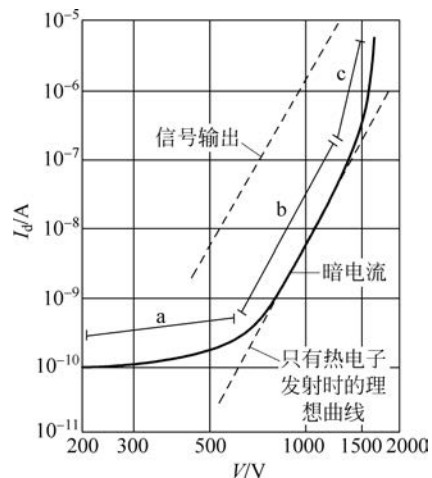


图 5-13 典型的暗电流与供电电压的特性曲线

这个特性曲线包含三个区域：低电压区域(图 5-13 中的 a)、中电压区域(图 5-13 中的 b)和高电压区域(图 5-13 中的 c)，区域 a 主要由漏电流引起，区域 b 主要受热发射影响，区域 c 则是由场发射和玻璃或电极支撑闪烁引起。总的来说，区域 b 提供了最好的信噪比，所以理想的光电倍增管应工作在 b 区域。

1) 热发射

因为光电阴极和光电倍增极由光电发射阈值很低的材料组成，它们在室温下都能发出热电子，W. Richardson 研究过这种现象并给出如下关系式：

$$i_s = AT^{5/4} e^{-(eW/kT)} \quad (5-14)$$

式中： W ——光电发射逸出功；

T ——绝对温度；

e ——电荷量；

A ——常量；

k ——玻尔兹曼常数。

由该式可知，热发射(Thermionic Emission)是光电发射逸出功和绝对温度的函数，所以热发射主要受到光电阴极的材料和光电发射阈值幅度的影响。当光电发射阈值较低，频谱响应扩展到低能量或长波长，热发射会有所增加。在常用的光电阴极中包含着碱金属，Ag-O-Cs 光电阴极有着最长的波长范围，在频谱响应中，表现出了最高的暗电流，相反，用作测紫外光的光电阴极有着最短的波长上限和最低的暗电流。

从式(5-14)可知暗电流随温度下降而下降，因此，如图 5-14 所示，冷却光电倍增管是减小暗电流的一个有效方法。

然而当暗电流减小到漏电流成为影响因素的值时，这个效应变的很有限。虽然热发射在光电阴极和光电倍增极上都会发生，但是光电阴极的热发射对暗电流的影响较大。这是因为光电阴极的面积比每一个光电倍增极都大且后续光电倍增极对输出电流贡献较小。相应地，由热发射产生的暗电流与供电电压的特性曲线几乎和增益与供电电压的关系曲线一样。

2) 欧姆漏电

光电倍增管工作在 500~3000V 的高压，但却只有几纳安或微安的电流，因此，管子的隔离材料非常重要。例如，如果隔离材料的电阻为 $10^{12}\Omega$ ，那么漏电流可能要到纳安级，漏电流和隔离材料的电关系由欧姆定律决定。另外，由热发射产生的暗电流与电压呈指数关系，因此，在供电电压较低时，漏电流是暗电流的主体，漏电流可能产生于阳极和最后一级光电倍增极之间，也可能是由玻璃架和基底或阳极插座引脚和其他引脚的不完全隔离引起。因为灰尘和潮气污染了玻璃架、基底、插座的表面，增加了漏电流，所以要保持这些部分干净并处于低湿度条件，如果污染了，可用酒精清洁。这种方法能有效地减小欧姆漏电(Ohmic Leakage)。

3) 玻璃壳放电(Glass Envelope Scintillation)和玻璃荧光(Electrode Supports Scintillation)

一些从光电阴极或光电倍增极发射出来的电子可能从它们正常的轨道中偏离，因而对

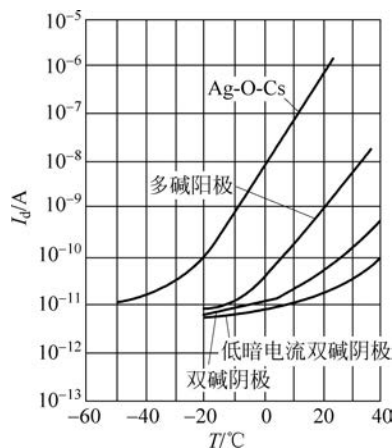


图 5-14 暗电流与温度关系曲线

输出信号没有贡献,如果这些偏离的电子撞到玻璃外层上,会导致闪烁发生并产生漏电流。

4) 场致发射(Field Emission)

当光电倍增管的工作电压过高时,倍增极会在强场作用下发射电子。随后,暗电流急骤增加,这种现象发生在图 5-13 的 c 区并很大程度上缩短了光电倍增管的寿命,因此,需要研究每个管型的最大工作电压,在这个工作电压内,光电倍增管的使用不会存在问题,但为了安全起见,光电倍增管的工作电压应低于最大工作电压 20%~30%。

5) 残余气体放电(Ionization Current of Residual Gases)

光电倍增管内部是真空中高达 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ Pa 的真空环境,即使这样,仍然存在着不可忽视的惰性气体,这些气体分子与电子相撞产生电离,正离子打到光电倍增极或者光电阴极产生了更多的二次电子发射,产生一个大的脉冲噪声。高电流工作时,这个噪声脉冲通常被认为是在主要光电流输出之后的一个输出脉冲,也叫作后脉冲,并且会在脉冲工作状态时引起测量误差。

4. 时间特性

光电倍增管是有着极快时间响应的光电探测器。在某些光脉冲测量中,往往要求阳极输出信号波形与入射光脉冲波形完全一致,这就要求光电倍增管有极快的响应时间。响应时间主要由光电子从光电阴极到达阳极的渡越时间以及各极间的渡越时间差决定。因此,快速响应的光电倍增管被设计成具有圆形内窗和特制电极以减小渡越时间。

表 5-1 列出了几种光电倍增管的时间特性。从中可以看出,直线聚焦型和金属通道型时间特性最好,而盒栅型和百叶窗型时间特性较差。

表 5-1 典型的时间特性(直径 2in 光电倍增管)

单位: ns

倍增管类型	上升时间	下降时间	脉冲宽度	电子渡越时间	渡越时间展宽
直线聚焦型	0.7~3	1~10	1.3~5	16~50	0.37~1.1
鼠笼型	3.4	10	7	31	3.6
盒栅型	<7	25	13~20	57~70	<10
百叶窗型	<7	25	25	60	<10
栅网型	2.5~2.7	4~6	5	15	<0.45
金属通道型	0.65~1.5	1~3	1.5~3	4.7~8.8	0.4

1) 上升时间和下降时间(Rise/Fall Times)

阳极输出脉冲上升时间可以看作 δ 函数的脉冲激光二极管(它发出的激光脉冲宽度远小于光电倍增管检测到的光脉冲宽度)光源照射下,阳极电流从脉冲峰值的 10% 上升到 90% 所需要的时间。下降时间定义为从峰值的 90% 下降到 10% 的时间,如图 5-15 所示。光电倍增管上升时间和下降时间的测量原理如图 5-16 所示。

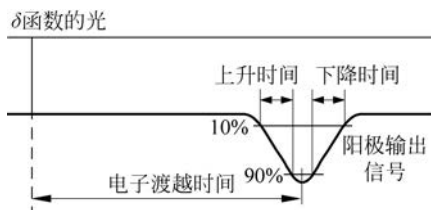


图 5-15 上升时间、下降时间的定义

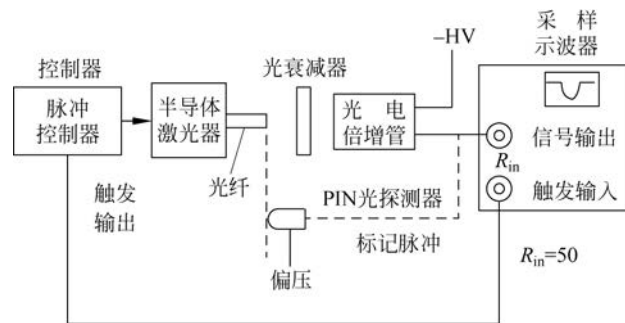


图 5-16 光电倍增管上升时间和下降时间的测量原理

2) 电子渡越时间(Electron Transit Time)

渡越时间定义为 δ 函数的脉冲激光的顶点到阳极输出电流达到峰值所经历的时间,如图 5-15 所示。

利用采样示波器多次采样光电倍增管的输出来重现一个完整波形。光电倍增管的输出信号包括从光电阴极每一个位置发射出来的电子形成的波形。在时间响应测量中,上升时间和下降时间非常关键,输出脉冲会产生波形失真引起错误的信号。图 5-17 所示是一个从光电倍增管输出的波形。总的来说,下降时间是上升时间的 2~3 倍,因此在测量重复脉冲时,需要防止输出脉冲的叠加。脉冲的半高宽(Full Width at Half Maximum,FWHM)是上升时间的 2.5 倍。

为了测量渡越时间,将一个 PIN 光电二极管放在与光电倍增管相同位置作为参考(0s)。测量 PIN 管检测到光脉冲的瞬间和光电倍增管的输出脉冲达到峰值时的时间差。

3) 渡越时间展宽(Transit Time Spread, TTS)

使用单色光子照射光电阴极,每一个光电子脉冲的渡越时间都有一个起伏,这种起伏称为渡越时间展宽。图 5-18 所示是渡越时间展宽测量的框图。

在这种测量中,从脉冲激光器出来一个触发信号,通过延迟电路再供给时间振幅转换器(Time-to-Amplitude Converter, TAC),把时间差转换成一个脉冲高度。同时,将光电倍增管的输出信号通过恒定系数鉴别器(Constant Fraction Discriminator,CFD)提供给 TAC 作为终止信号,其中,CFD 是用来减小脉冲高度变化导致的时间抖动。TAC 产生一个与开始和结束信号时间差成正比的脉冲高度信号,这个脉冲再供给多通道分析仪(Multichannel Analyzer, MCA)来进行脉冲高度分析。因为开始与结束信号的时间差与电子渡越时间有关,在 MCA 上显示一个直方图,通过多次合并存储的脉冲高度值来说明电子渡越时间展宽的统计值。

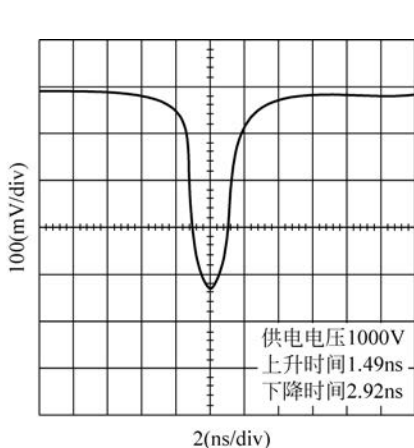


图 5-17 光电倍增管输出波形

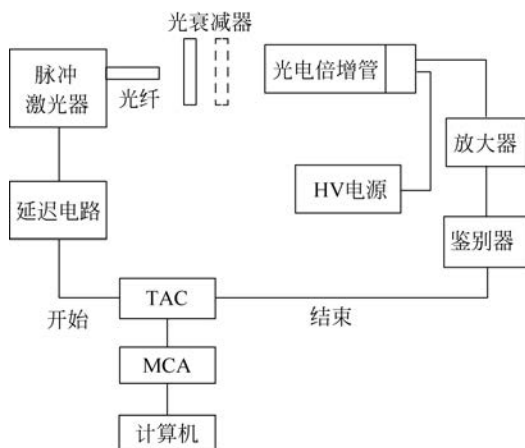


图 5-18 TTS 测量原理框图

5. 噪声

在入射光强度不变的情况下,暗电流和信号电流两者的统计起伏叫作噪声。光电倍增管的噪声主要由器件本身的散粒噪声和负载电阻的热噪声组成。在光电二极管的情况下,负载电阻的热噪声为

$$\overline{i_{nj}^2} = \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (5-15)$$

式中: k ——玻尔兹曼常数;

T ——绝对温度;

Δf ——测量电路的频带宽度;

R_L ——负载电阻值。电阻热噪声主要来自负载电阻、运算放大器的反馈电阻和运算放大器输入阻抗。

因光电子到达阳极的速率起伏产生的噪声叫作散粒噪声。光电倍增管的阴极电流为 I_k , 它的散粒噪声主要由阴极暗电流 I_d 、背景辐射电流 I_b 以及信号电流 I_s 的散粒噪声 I_{dk} 、 I_{bk} 、 I_{sk} 所引起。

阴极散粒噪声电流为

$$\overline{i_{nk}^2} = 2qI_k\Delta f = 2q\Delta f(I_{sk} + I_{bk} + I_{dk}) \quad (5-16)$$

式中: q ——电子电荷。

散粒噪声电流会被逐级放大,并在每一级都产生自身的散粒噪声。第 1 倍增极发射电流的散粒噪声是由光电流的散粒噪声和二次发射的散粒噪声组成,表示为

$$\overline{i_{nD1}^2} = (I_{nk}\delta_1)^2 + 2qI_k\delta_1\Delta f = I_{nk}^2\delta_1^2 + I_{nk}^2\delta_1 = I_{nk}^2\delta_1(1 + \delta_1) \quad (5-17)$$

第 2 级输出的散粒噪声电流是由第 1 倍增极散粒噪声和二次发射的散粒噪声组成,即

$$\overline{i_{nD2}^2} = (I_{nD1}\delta_2)^2 + 2qI_k\delta_1\delta_2\Delta f = I_{nk}^2\delta_1\delta_2(1 + \delta_2 + \delta_1\delta_2) \quad (5-18)$$

以此类推,第 n 级倍增极输出的散粒噪声电流为

$$\overline{i_{nDn}^2} = I_{nk}^2\delta_1\delta_2\delta_3\cdots\delta_n(1 + \delta_n + \delta_n\delta_{n-1} + \cdots + \delta_n\delta_{n-1}\cdots\delta_1) \quad (5-19)$$

为简化问题,设各倍增极的发射系数都等于 δ (各倍增极的电压相等时发射系数相差很小),则倍增管末倍增极输出的散粒噪声电流为

$$\overline{i_{nDn}^2} = 2qI_kG^2 \frac{\delta}{\delta-1} \Delta f \quad (5-20)$$

δ 通常为 3~6, $\frac{\delta}{\delta-1}$ 接近于 1, 并且, δ 越大, $\frac{\delta}{\delta-1}$ 越接近于 1。光电倍增管输出的散粒噪声电流简化为

$$\overline{i_{nDn}^2} = 2qI_kG^2 \Delta f \quad (5-21)$$

总噪声电流为

$$\overline{i_n^2} = \frac{4kT\Delta f}{R_L} + 2qI_kG^2 \Delta f \quad (5-22)$$

在设计光电倍增管电路时,总是力图使负载电阻的热噪声远小于散粒噪声,即

$$\frac{4kT\Delta f}{R_L} \leq 2qI_kG^2 \Delta f \quad (5-23)$$

设光电倍增管的增益 $G=10^4$, 阴极暗电流 $I_{dk}=10^{-14}$ A, 在室温 300K 情况下,只要阳极负载电阻 R_L 满足

$$R_L \geq \frac{4kT}{2qI_kG^2} = 52\text{k}\Omega \quad (5-24)$$

当然,提高光电倍增管的增益(提高电源电压) G ,降低阴极暗电流 I_{dk} 都会减少对阳极电阻

R_L 的要求,提高光电倍增管的时间响应。

6. 线性

光电倍增管的线性一般由它的阳极伏安特性表示,它是光电测量系统中的一个重要指标。由于倍增极结构的多样性,光电倍增管的线性特性会随着倍增极级数和其他因素而各不相同。光电倍增管的阳极输出电流对入射光通量的线性具有宽的动态范围,但当入射光较强时,会产生偏离理想线性的情况,其主要原因是阳极的线性特性影响。线性不仅与光电倍增管的内部结构有关,还与供电电路及信号输出电路等因素有关。当工作电压一定时,线性特性与入射波长无关,取决于电流值的大小。

(1) 讨论影响 PMT 线性的内因。在脉冲工作方式下线性主要是受到空间电荷的影响,脉冲线性主要取决于峰值电流,强脉冲光入射时,后级产生大电流,会因空间电荷密度高出现饱和现象,其影响的大小由倍增极间电场分布及强度决定。光电阴极是半导体,有一定的电阻,大小因光电阴极而异,因此也会影响 PMT 线性。此外,还有聚焦或收集效率等的变化。

(2) 讨论影响 PMT 线性的外因。光电倍增管输出信号电流在负载电阻上的压降对末级倍增极电压产生负反馈和电压的再分配都可能破坏输出信号的线性,后文会详细进行讨论。

7. 疲劳和衰老

光电倍增管的性能会受到光电阴极和倍增极疲劳的影响。光电阴极的疲劳会在大的阴极电流下出现,倍增极的疲劳会在大的阳极电流下出现,倍增管的灵敏度会在短时间内降低。这种现象是因为光电阴极材料和倍增极材料中一般都含有铯金属。当电子束较强时,电子束的碰撞会使倍增极和阴极板温度升高,铯金属蒸发,影响阴极和倍增极的电子发射能力,光电倍增管会出现光电流衰减、灵敏度骤降的现象。当去除光源一段时间后,光电倍增管的性能会部分或全部恢复。因此,必须限制入射的光通量使光电倍增管的输出电流不得超过极限值。为防止意外情况发生,应对光电倍增管进行过电流保护,阳极电流一旦超过设定值便自动关断供电电源。光电倍增管由于疲劳效应而灵敏度逐步下降,称为衰老。过强的入射光会加速光电倍增管的老化损坏。

5.4 光电倍增管的工作电路

光电倍增管的工作电路分为高压供电电路和信号输出电路,下面分别讨论。

5.4.1 高压供电电路

1. 阳极接地和阴极接地

高压直流电源向光电倍增管供电有阴极接地(Cathode Grounding)(正高压接法)和阳极接地(Anode Grounding)(负高压接法)两种方式,分别如图 5-19 和图 5-20(a)所示。图 5-20(a)中,分压电路将地与阳极相连从而给阴极提供一个负高压。优点是消除了外部电路与阳极的电势差,便于电路连接,如电流表、电流电压转换、放大电路与光电倍增管的连接。对于端窗光电倍增管,如果与光电阴极很近的探测窗口或玻璃窗口是与地相连的,玻璃材料很小的传导率在光电阴极和地之间会引起微弱电流,这样会对光电阴极造成电气损坏,



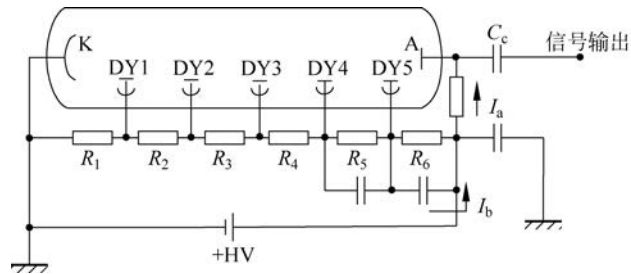
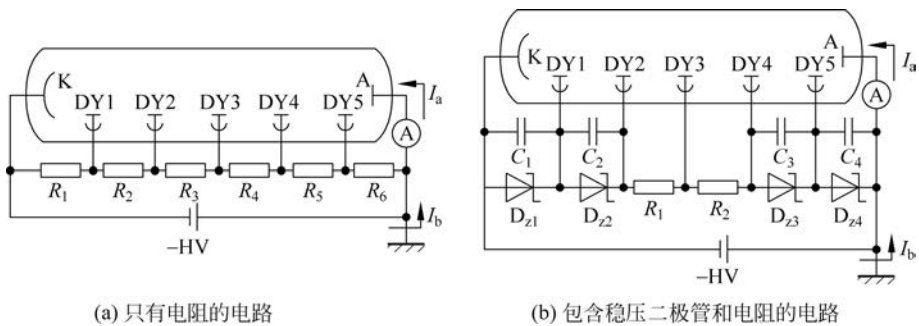


图 5-19 阴极接地分压电路



(a) 只有电阻的电路

(b) 包含稳压二极管和电阻的电路

图 5-20 分压电路

并且可能会有严重的损害。鉴于这些原因,在设计光电倍增管的外罩的时候使用电磁防护装置要很小心。另外,在接地情况下封装管与电磁防护装置之前要用海绵乳胶或相似的防震材料对光电倍增管管身进行包装,同时确保材料具有很好的绝缘性能。阳极接地设计原理所关注的问题可以通过在管表面涂上一层黑色的传导漆,而连接到阴极电位来解决。这种技术方法称为“HA 涂层”,而且传导管表面用保温外罩进行保护。图 5-19 是阴极接地方式供电,其特点是便于屏蔽,屏蔽罩可以跟阴极靠的近些,屏蔽效果好;暗电流小,噪声低;但阳极处于正高压,导致寄生电容大,匹配电缆连接复杂,特别是后面接直流放大器,整个放大器都处于高压,不利于安全操作。在这个阴极接地的原理中,一个耦合电容(C_c)必须被用于从信号中分离阳极正高压,这使得不太可能获取一个直流信号。在实际的闪烁计数中,使用这个分压电路,如果计数效率提高太多会引起基线漂移,或者耦合电容中出现泄电流引起噪声。

2. 分压电路

光电倍增管分压电路如图 5-20(a)所示,在阴极和阳极之间连接分压电阻($100 \sim 1000 \text{k}\Omega$)为每个电极提供电压。有时也会加上几个稳压二极管,如图 5-20(b)所示。这些电路被称为分压电路。

在图 5-20 中的分压电路电流 I_b 称作分压电流, I_b 的值大约等于供电电压除以分压电阻之和,即

$$I_b = \frac{V}{R_1 + R_2 + \dots + R_6} \quad (5-25)$$

用图 5-20(b)中所示的稳压二极管来保持级间电压的一致和光电倍增管工作的稳定性,让其不受光电倍增管阴极到阳极的高压的影响。在这种情况下, I_b 可以表示为

$$I_b = \frac{V - V_{D_{z1} \sim D_{zn}}}{R_1 + R_2} \quad (5-26)$$

与稳压二极管并联的电容 $C_1 \sim C_4$ 用来降低由稳压二极管产生的噪声,当经过这些稳压二极管的电流很小时这些噪声将会更明显。因此这部分需要引起注意,因为噪声会影响光电倍增管输出的信噪比。

3. 分压电流和线性输出

在阳极接地和阴极接地中,当在直流工作模式或者脉冲工作模式时,光电倍增管上光照增加会引起阳极输出电流 I_a 的增加。如图 5-21 所示,在一个特定的电流区域(区域 B)以及光电倍增管的输出进入饱和状态(区域 C)光照和阳极输出电流的关系开始远离原来的理想线性关系。

1) 直流模式线性输出方法

光电倍增管直流信号输出情况下,通常采用图 5-22 所示电路。流过一个分压电阻的实际电流,如电阻 R_6 电流等于分压电流 I_b 和流过 A-DY5- R_6 -A 的循环阳极电流 I_a 之差($I_{R6} = I_b - I_a$),同样,对于其他的分压电阻,流过分压电阻的实际电流等于 I_b 和反向流过分压电阻的倍增极电流 I_{DY} 之差。阳极电流和倍增极电流一起作用减少了各分压电阻上的电流,导致各电极间电压重新分配。阳极和后几级倍增极极间电压下降,阴极和前几级倍增极极间电压上升。

如果阳极输出电流很小,分压电阻上电流的变化可以忽略不计。当入射光信号增加时,阳极电流和倍增极电流也会增加。每个倍增极分配的电压如图 5-23 所示。因为整个阴极到阳极的电压为恒定高压,后级损失的电压重新分配给前级,因此前级间电压增加。

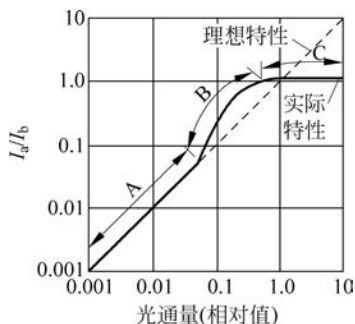


图 5-21 光电倍增管的输出线性关系

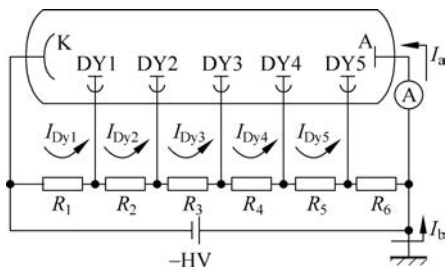


图 5-22 光电倍增管基本工作电路

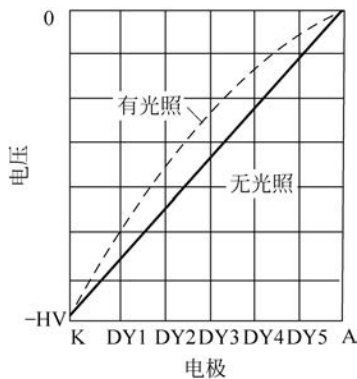


图 5-23 光电流对极间供电电压的影响

在最后一个电极(图 5-22 中的 DY5)和阳极之间,电压减小最为明显。如图 5-21 区域 B 所示,前级电压分配的增加导致阳极电流的整体增加。如果光照强度进一步增加,阳极电流将会变得很大。当阳极电流接近于分压电阻上的电流,阳极和最末级倍增极之间的电压趋向零,最后阳极输出电流饱和,阳极二次电子收集率逐渐降低。如图 5-21 区域 C 所示的饱和现象。

为使光电倍增管工作稳定而要保证阳极电流最大时,倍增级的级间电压基本不变,通常要求流过电阻链的电流 I_b 最少要比阳极最大电流大 20 倍以上,即

$$I_b \geq (20 \sim 50) I_{amax} \quad (5-27)$$

在精密光信号检测中,为保证输出线性度高于 $\pm 1\%$,一般要求分压器上电流是阳极最大电流的 100 倍以上。

为增加最大线性输出,有两种方法:一是在最后一级和阳极间使用齐纳二极管,如图 5-20(b)所示,如有必要,在最后一级或者最后两级也使用齐纳二极管;另一种方法是降低分压电阻来提高分压电流。在第一种方法中,如果分压电流较小,稳压二极管将会产生噪声,可能对输出结果造成很大影响。因此,必须将分压电流提高到一定水平和并联具有良好频率响应的陶瓷电容与齐纳二极管来吸收可能产生的噪声。在保证响应速度的前提下尽量减小后续电路带宽。在第二种方法中,如果分压电阻与光电倍增管靠得很近,分压电阻的热辐射会提高光电倍增管的温度,这将导致暗电流的增加和输出信号的波动。为了适应线性度要求很高的应用场合,通常在最后几级中提供单独的辅助电源,如图 5-24 所示。

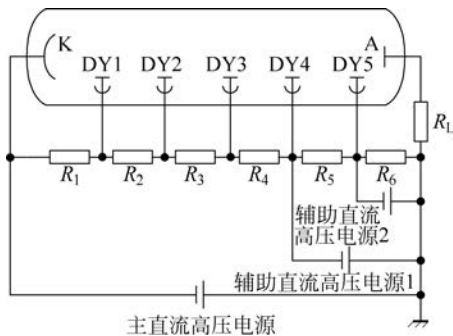


图 5-24 辅助电路

2) 脉冲线性输出方法

当光电倍增管在脉冲工作模式使用时,通常用图 5-20 所示分压电路,与工作在直流模式一样,输出的最大线性度也会受到分压电流的影响。为了解决这个问题,在最后几级可以连接退耦电容。在脉冲信号持续过程中因电容放电而抑制最后一个倍增级和阳极之间电压的减小,以显著改进脉冲输出线性。如果脉冲宽度足够窄,以至占空比非常小,这个方法可以使输出电流达到饱和水平。因此,可以得到一个超过分压电流几千倍高的峰值输出电流。

退耦电容的连接方法有两种:串联连接方式,如图 5-25(a)所示;并联连接方式,如图 5-25(b)所示。串联方式使用更为普遍,因为并联连接方式需要使用能承受高电压的电容。

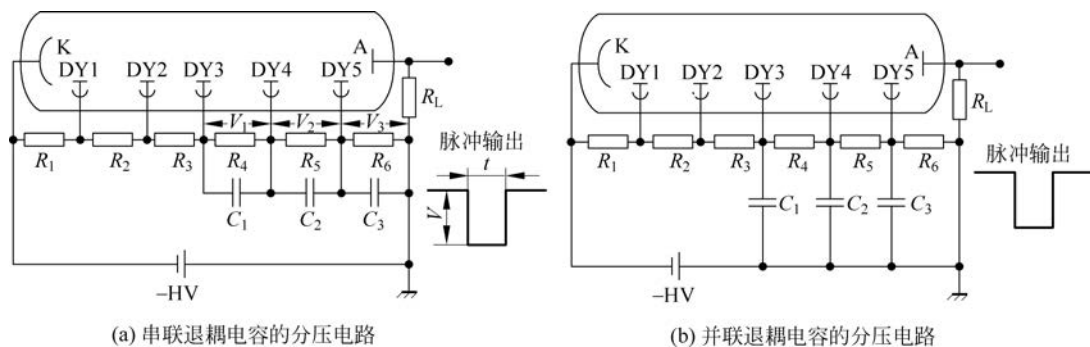


图 5-25 退耦电容连接方法

下面以图 5-25(a)所示的电路为例计算电容值。

若定义输出脉冲电压为 V ,脉冲宽度为 t ,负载电阻为 R_L ,则每个脉冲对应的电量 Q 。可表达为

$$Q_0 = t \frac{V}{R_L} \quad (5-28)$$

如果定义电容 C_3 的储存电量是 Q_3 , 为了使输出线性度优于 $\pm 3\%$, 通常近似有

$$Q_3 \geq 100Q_0 \quad (5-29)$$

根据 $Q = CV$ 得

$$C_3 \geq 100 \frac{Q_0}{V} \quad (5-30)$$

一般来说, 级间电压为 100V 时, 光电倍增管每个倍增极的二次电子发射率 δ 为 3~5。当级间电压为 70~80V 时, 二次发射系数 $\delta = 2$, C_2 和 C_1 中存储的电量 Q_2 和 Q_1 为

$$Q_2 = \frac{Q_3}{2}, \quad Q_1 = \frac{Q_2}{2} = \frac{Q_3}{4} \quad (5-31)$$

因此, 计算电容 C_2 和 C_1 的值可使用与计算 C_3 相同的方法, 即

$$C_2 \geq 50 \frac{Q_0}{V}, \quad C_1 \geq 25 \frac{Q_0}{V} \quad (5-32)$$

在这种情况下, DY3 之前的倍增极也要放置退耦电容以得到一个大的输出电流, 也使用同样的计算方法。

例题 如图 5-25(a) 所示, 光电倍增管脉冲输出电压 $V_0 = 50\text{mV}$, 脉冲宽度 $t = 1\mu\text{s}$, 负载电阻 $R_L = 50\Omega$, 级间电压均为 100V, 倍增极二次发射系数为 4, 计算退耦电容 C_1 、 C_2 和 C_3 。

解 每个脉冲输出的电量为

$$Q_0 \geq \frac{50\text{mV}}{50\Omega} \times 1\mu\text{s} = 1 \times 10^{-9} \text{C}$$

退耦电容 C_3 、 C_2 、 C_1 的值计算方法如下:

$$C_3 \geq 100 \times \frac{1 \times 10^{-9} \text{C}}{100\text{V}} = 1000\text{pF}$$

$$C_2 \geq 25 \times \frac{1 \times 10^{-9} \text{C}}{100\text{V}} = 250\text{pF}$$

$$C_1 \geq \frac{25}{4} \times \frac{1 \times 10^{-9} \text{C}}{100\text{V}} = 62.5\text{pF}$$

以上计算出的电容值是系统最低要求的电容值, 因此分压电路设计建议采用安全范围的电容值, 约大于计算值的 10 倍。如果输出电流进一步增大, 在前面的倍增极上必须连接退耦电容时, 同时也要增大 $C_1 \sim C_3$ 的电容值。

4. 高压供电电源

光电倍增管工作的稳定性取决于供电电源的稳定性, 包括漂移、波纹、温度相关性、输入管理和负载调节。供电电压源必须提供超过光电倍增管稳定工作所要求能量的 10 倍。

串联稳压器型高压电压源已经被广泛地用于光电倍增管。最近, 一种开关稳压型的电源已经进入市场并被广泛地使用。大部分开关稳压型电源具有体积小、重量轻的特点, 能提供高电压和高电流。但是, 一些型号电源, 开关噪声叠加在交流输入和高压输出中或者有噪声辐射, 因此, 在选择这列开关稳压电源的时候要特别小心, 尤其是在低光照强度的探测和测量中, 包括快速的信号处理和光子技术应用中。

高压电源必须能够提供最大输出电流是流过光电倍增管电流的 1.5 倍的电流。

在合适的高压电源时应注意以下几点。

(1) 线性调节： $\leq \pm 0.1\%$ ，这是由输入改变引起的输出电压变化百分比。

(2) 负载调节： $\leq \pm 0.2\%$ ，这是有负载时的最大输出和无负载时的输出之间的不同，表示了输出电压的百分比。

(3) 波动噪声： $\leq 0.05\%$ ，震荡是由高压产生电路的振荡频率所引起的输出振荡(峰值)。

(4) 温度特性： $\leq \pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ ，这是在最大输出的时候由于工作温度的变化所带来的输出改变($\%/^{\circ}\text{C}$)。

5.4.2 信号输出电路

1. 输出信号

为了测量光电倍增管的输出信号，根据工作情况有很多方法可供选择，如图 5-26～图 5-28 所示。分压电路有两种工作方式：阳极接地和阴极接地。阳极接地方法允许直流和脉冲同时工作，如图 5-26 和图 5-27 所示。阴极接地方法使用一个旁路电容来分离加在阳极上的高电压，如图 5-28 所示，因此只有脉冲工作方式是可行的。但是这个方法消除了由这些直流元件产生的背景光，使其更适合于脉冲工作环境。

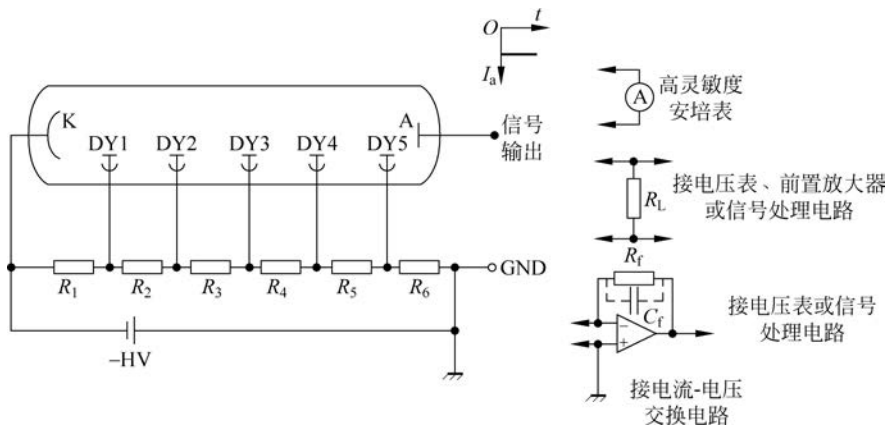


图 5-26 直流工作环境下的阳极接地输出电路

应当注意的是，当光电倍增管的输出接到一个放大电路的时候，放大电路必须在打开高压电源之前连接。当高压电源加到分压电路的时候，尽管在无光照的情况下，可能的暗电流也会在阳极产生电量。如果在这种情况下分压电路连接到放大电路，电荷将会立刻进入放大电路，可能会导致放大电路的损坏。尤其在使用高速电路时要格外小心，因为它们更容易被损坏。

2. 光电倍增管输出电流到电压转换

光电倍增管的输出信号是电流(电量)，然而外部的信号处理电路一般都是基于处理电压信号来设计的。因此，除了使用高灵敏度的仪表来测量输出信号外，需要将输出电流信号转换为电压信号。下面介绍怎样使用电流电压转换电路以及应该注意的预防措施。

1) 使用负载电阻实现电流/电压转换电路

一个将光电倍增管的输出电流转换为电压的方法就是使用一个负载电阻。因为光电倍

增管被看作一个输出低电流的连续电流源,在理论上使用一个足够大的电阻能获得 $I_a \times R_L$ 的输出电压。但是在实际中,负载电阻阻值的选择是有限制的。

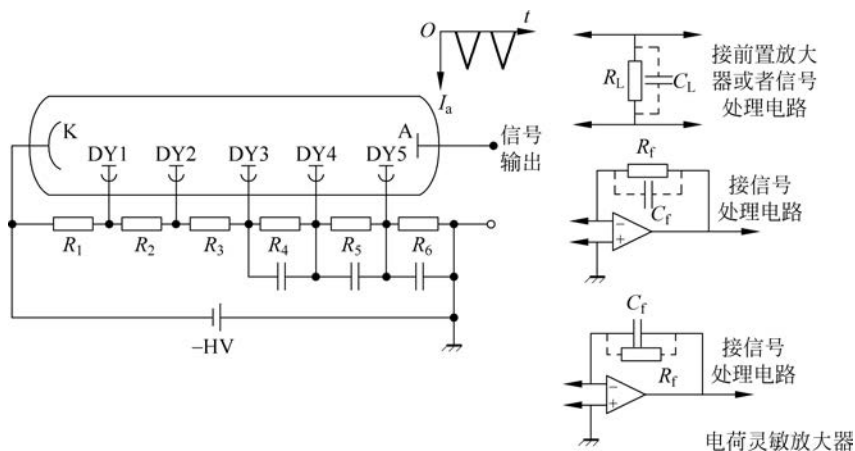


图 5-27 脉冲工作环境下的阳极接地输出电路

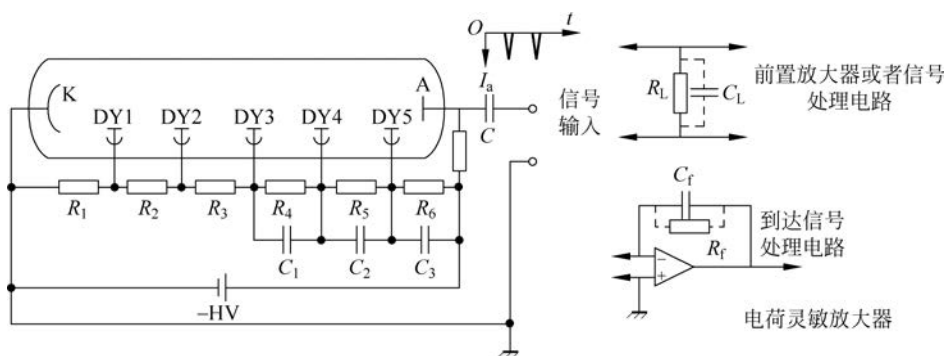


图 5-28 脉冲工作环境下的阴极接地输出电路

如图 5-29 所示,假设负载电阻为 R_L ,光电倍增管阳极到所有的电极之间的总电容为 C_S ,包括寄生电容(如布线电容等),因此最高截止频率 f_c 可以由下式计算:

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_S R_L} \quad (5-33)$$

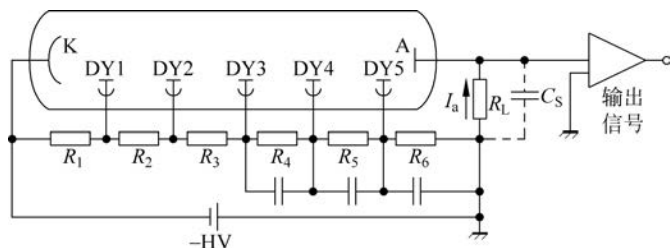


图 5-29 光电倍增管和输出电路

由式(5-33)可知,尽管光电倍增管和放大器具有快速响应, f_c 是由输出电路来决定的。如果负载电阻大于必要值时,阳极电压降 $I_p \times R_L$ 会增加,导致最后一级到阳极的电压降低。这将增加空间电荷的影响并降低输出线性。因此多数情况下,使用负载电阻能够提供

约 1V 的电压输出。

当选择最优负载电阻时,也要考虑连接到光电倍增管的放大器内部的输入电阻。图 5-30 显示了当光电倍增管的输出连接了一个放大器后的等效电路。其中,如果负载电阻是 R_L , 输入电阻是 R_{in} , 最后的并联输出电阻 R_o 。由下式计算:

$$R_o = \frac{R_{in}R_L}{R_{in} + R_L} \quad (5-34)$$

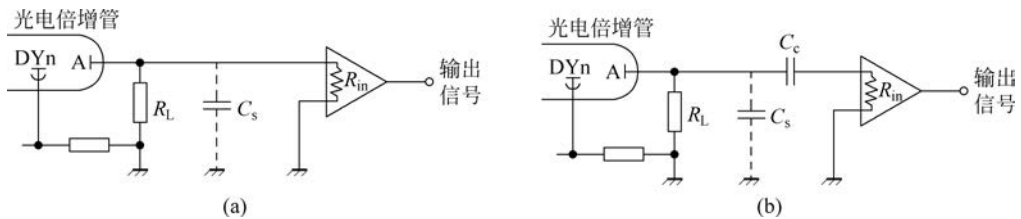


图 5-30 放大器内部输入电阻

电阻 R_o 是光电倍增管的实际负载电阻,阻值小于 R_L 。在 $R_{in} = \infty$ 时输出电压 V_o 。和受 R_{in} 影响的输出电压 V'_o 之间的关系为

$$V'_o = V_o \times \frac{R_{in}}{R_{in} + R_L} \quad (5-35)$$

当 $R_{in} = R_L$ 时, $V'_o = V_o/2$ 。说明了负载电阻值的上限是放大器的输入电阻 R_{in} 。特别是在光电倍增管和放大器之间加上旁路电容 C_c 的时候,如图 5-30(b) 所示,一个不必要的大负载电阻会对输出电平造成影响。

然而上面描述的负载电阻和放大器的内部电阻是纯电阻,在实际中,要加上级间电容和级间传导。因此,这些电路元素必须考虑元件阻抗,尤其是在高频电路工作模式下。

下面介绍选择负载电阻时的一些指导原则:

(1) 当频率和放大特性很重要的时候,尽量选择小的负载电阻(如 50Ω)。最小化杂散电容,如与负载电阻并联的线缆电容。

(2) 当线性放大输出很重要的时候,选择的负载电阻的输出电压应为最后一级到阳极电压的百分之几。

(3) 使用一个等于或者小于与光电倍增管相连的放大器内部电阻的负载电阻。

2) 使用运算放大器的电流/电压转换电路

在使用运算放大器构成的电流/电压转换电路时,可用模拟或数字电压表对从光电倍增管输出的电流进行精确的测量,而且不需要很昂贵和高灵敏度的仪器。一个基本的使用运算放大器的电流电压转换电路如图 5-31 所示。

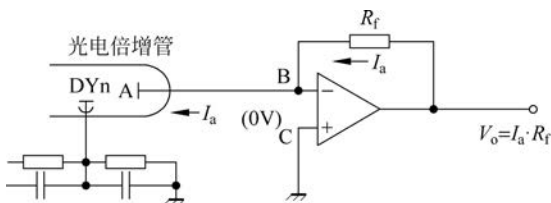


图 5-31 使用运算放大器的电流/电压转换电路

在这个电路中,输出电压 V_o 。计算如下

$$V_o = I_a \cdot R_f \quad (5-36)$$

因为运算放大器的输入阻抗很大,光电倍增管的输出电流在 B 点(如图 5-31 所示)被阻止进入运算放大器的反向输入端(-)。因此,大部分电流进入反馈

电阻 R_f , 并在 R_f 上形成了大小为 $I_a \cdot R_f$ 的电压。另外, 运算放大器的增益(开环增益)达到 10^5 , 它总是维持反向输入端(B点)的电位等于非反向输入端(C点)的电位(接地电位)(称为虚短或虚地)。因此, 运算放大器的输出电压 V_o 与 R_f 上产生的电压相等。理论上说, 用一个前置放大器实现电流/电压转换具有和它的开环增益一样的精度。

当使用前置运算放大器时, 决定最小测量电流的是前置放大器的漂移电流 I_{os} 、 R_f 的质量以及使用的绝缘材料和走线方法。

要精确地测量一个极小的电流(10^{-12} A), 必须要考虑如下几个因素:

- (1) 信号输出线采用低噪声高绝缘性的同轴电缆。
- (2) 使用绝缘性能好的连接器, 如铁氟龙连接器。
- (3) 连接光电倍增管的阳极到前置放大器的输入引脚时, 不要使用印制电路板, 而是用铁氟龙的双绞线代替。
- (4) 对于实际的输出 $V_o = -(I_a + I_{os}) \cdot R_f + V_{os}$, 如果 R_f 很大, I_{os} 会引起问题。因此, 选择一个具有小于 0.1 pA 的 I_{os} 与最小的输入转换噪声和温度漂移的场效应管输入的前置放大器。
- (5) 给前置放大器提供合适的输出偏压调节和补偿电路。
- (6) 反馈电阻 R_f 使用具有最小温度特性的金属表面电阻。使用干净的镊子处理电路, 确保没有脏物或者外来材料污染电路。同时, 当电阻值需达到 $10^9 \Omega$ 或者更大时, 使用具有低漏电流的玻璃密封电阻。
- (7) 由于由型号和噪声问题决定的不精确和温度特性, 负载电阻不宜使用碳膜电阻。当几个反馈电阻用来转换电流范围的时候, 在反馈电阻和前置放大器输出之间使用一个具有最小漏电流的陶瓷转换开关或者使用高质量的继电器, 同时连接一个具有良好温度特性的低漏电流的电容。例如, 一个苯乙烯电容与反馈电阻并联, 这样可以根据应用限制频率范围。

(8) 使用玻璃封装 PC 板或者其他绝缘性能好的 PC 板。

另外, 因为前置放大器的最大输出电压一般比供电电压低 1~2V, 常使用多个反馈电阻的转换来扩展电流测量范围。在这个方法中, 每个范围中将非反向输入端通过一个阻值等于反馈电阻阻值的电阻接地, 使用上面的预防方法能平衡输入偏置电流, 因此可以减小反向输入端的补偿电流 I_{os} 。

3) 使用运算放大器的电荷灵敏放大器

图 5-32(a)所示为使用运算放大器的基本电荷敏感放大电路。光电倍增管的输出电荷 Q_o 存储在 C_f 里, 输出电压 V_o 可以表示为

$$V_o = Q_a / C_f \quad (5-37)$$

这里, 如果光电倍增管的输出电流为 I_a , V_o 变为

$$V_o = -\frac{1}{C_f} \int_0^t I_a \cdot dt \quad (5-38)$$

当输出电荷连续, V_o 最后上升到接近前置放大器的供电电压的水平, 如图 5-32(b)和(c)所示。

在图 5-32(a)中, 如果电路在 C_f 上并联了一个场效应管开关以便存储在 C_f 里面的电荷在需要时能被释放, 不论光电倍增管的输出信号是直流还是脉冲, 这个电路起到积分仪的作用,

能够在测量时间内存储输出电荷。在闪烁计数中,光电倍增管输出脉冲必须被转换成相应的电压脉冲。因此,如图 5-33 所示, R_f 和 C_f 并联以便于电路有一个放电时间常数 $\tau = C_f \cdot R_f$ 。

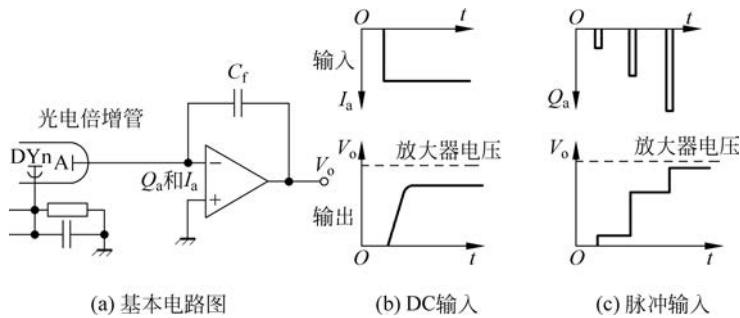


图 5-32 电荷敏感电路一级工作模式

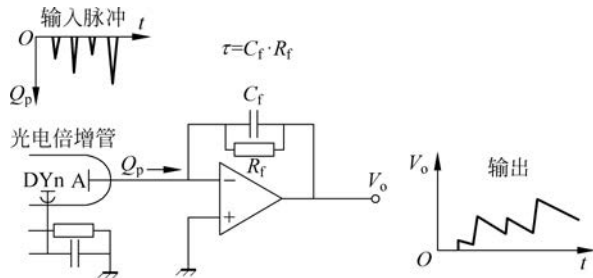


图 5-33 脉冲输入型的电荷敏感放大器

如果 τ 很小,输出电压 V_o 更多的由输入电流的脉冲高度决定。相反,如果 τ 很大, V_o 将会更多地由输入脉冲电荷甚至 $-Q_p/C_f$ 的值决定。在闪烁计数中,由于电路时间常数 $\tau = RC$ 和闪烁的荧光衰减常数 τ_s 的关系,输出脉冲电压 $V(t)$ 由式(5-39)~式(5-41)给出。

$$V(t) = \frac{Q \cdot \tau}{\tau - \tau_s} (e^{-t/\tau} - e^{-t/\tau_s}) \quad (5-39)$$

当 $\tau \gg \tau_s$, $V(t)$ 变为

$$V(t) = \frac{Q}{C} (e^{-t/\tau} - e^{-t/\tau_s}) \quad (5-40)$$

然而,当 $\tau \ll \tau_s$, $V(t)$ 变为

$$V(t) \approx \frac{Q}{C} \cdot \frac{\tau}{\tau_s} (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau}) \quad (5-41)$$

当 $\tau > \tau_s$ 时,输出波形上升时间由 τ_s 决定,下降时间由 τ 决定,最大的脉冲高度由 Q/C 给出。相反,当 $\tau < \tau_s$ 时,输出波形上升时间由 τ 决定,下降时间由 τ_s 决定,最大脉冲高度则由 $Q/C \cdot \tau/\tau_s$ 给出。在大多数情况下使用 $\tau \gg \tau_s$, 因为这样能得到高的能量分辨率。正是因为输出脉冲振幅较大,因此受到其他因素,如噪声、闪烁的温度特性、负载的变化等的影响就小。在这种情况下,应该注意的是脉冲宽度受 τ 的影响更大,如果重复次数多,就容易发生基线漂移和电荷堆积。如果测量要求高的计数率,得到一个和闪烁衰减时间一样快的输出波形可以用减少 τ 来实现。但是,输出脉冲的高度会变低而且容易被噪声影响,且降低

了能量分辨率。在每种情况下,输出电压 $V(t)$ 正比于光电倍增管阳极输出电荷。一般来说,负载电阻降低能得到更高的脉冲高度,只要环境允许,大部分情况下,负载电阻值的变化能改变时间常数。当使用一个 NaI(Tl) 的闪烁体时,时间常数一般是几个微秒到几十个微秒。

闪烁计数中,在电荷敏感放大器中产生的噪声降低了能量分辨率。这些噪声大都来自于放大电路的元件,但是在图 5-34 所示的线缆电容 C_s 应该格外注意,因为光电倍增管的输出电荷分别存储在 C_f 和 C_s 上。 C_s 使 C_f 相对于没有 C_s 的时候的电荷要少,因此必须要大的 $A \cdot C_f / C_s$ 值来改善信噪比。但是在精确的操作中,由于 $A \cdot C_f$ 无法大于由各种限制条件决定的特定值,因此 C_s 的值通常尽可能小地来改善信噪比。

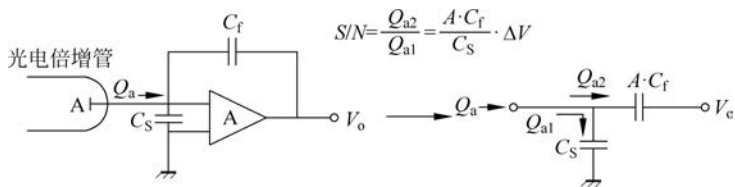


图 5-34 输入分配电容的影响

在闪烁计数的测量中,一个减少线缆电容的方法就是在光电倍增管的附近放置前置放大器,远离主放大器。

3. 快速响应光电倍增管的输出电路

对于快速上升和下降的光脉冲信号的检测,使用一个具有 50Ω 阻抗的同轴电缆来连接光电倍增管和后续电路。

为了精确地传输和接收信号输出波形,输出端必须要用一个等效于同轴电缆的纯电阻,如图 5-35 所示。这使光电倍增管阻抗保持定值,不受电缆长度影响,能减少输出波形的“振铃”现象。当使用一个 MCP-PMT 来检测高速信号时,如果线缆长度大于必要值,在同轴电缆中会出现信号波形的失真。

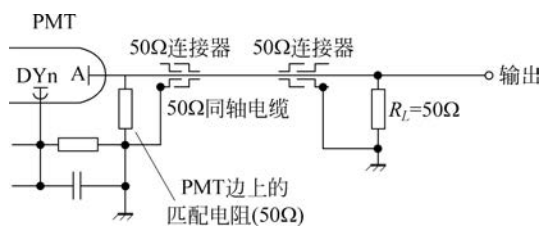


图 5-35 输出阻抗匹配

如果输出端没有适当的阻抗匹配,光电倍增管阻抗会随频率变化,而且阻抗值会受同轴电缆长度影响,导致输出信号的振铃现象。这样的阻抗不匹配不仅会出现在终端电阻和同轴电缆之间,也会出现在同轴电缆终端的连接器的上。因此,在连接同轴电缆到光电倍增管和连接器的时候,要注意选择一个合适的连接器避免阻抗不匹配。

当同轴电缆输出端发生阻抗不匹配时,所有的输出信号能量不会在输出端分散,但是部分能量会返回光电倍增管。光电倍增管的阳极被看作一个打开的终端,如果不能给光电倍增管的一边提供一个匹配的电阻,信号将会从阳极反射并重新回到输出端。反射信号被看作脉冲信号出现在主要的脉冲后,通过同轴电缆有一个衰退时间。这个信号重复着轨迹直到整个能量分散,最后,输出端发生振铃现象。为了阻止这个现象,在输出端和光电倍增管的一边提供匹配的阻抗,这在一定程度上是有效的,尽管得到的电压只有输出端阻抗匹配时

的一半。当使用不是快速响应的光电倍增管和短的同轴电缆连接时,在光电倍增管的一边可以无须阻抗匹配电阻。可以通过不断摸索来确定光电倍增管是否需要这样一个电阻。在光电倍增管中,有具有 50Ω 的输出阻抗的专门型号。这些型号的光电倍增管不需要匹配电阻。



5.5
微课视频

5.5 光电倍增管的应用

光电倍增管的应用领域非常广泛,主要如下。

1. 光谱学

(1) 利用光吸收原理。①紫外/可见/近红外分光光度计:光通过物质时使物质的电子状态发生变化,而失去部分能量,叫作吸收。利用吸收进行定量分析。为确定样品物质的量,采用连续的光谱对物质进行扫描,并利用光电倍增管检测光通过被测物质前后的强度,即可得到被测物质程度,计算出物质的量。②原子吸收分光光度计:广泛地应用于微量金属元素的分析。对应于分析的各种元素,需要专用的元素灯,照射燃烧并雾化分离成原子状态的被测物质上,用光电倍增管检测光被吸收的强度,并与预先得到的标准样品比较。

(2) 利用发光原理。①发光分光光度计:样品接受外部照射光的能量会产生发光,利用单色器将这种光的特征光谱线显示出来,用光电倍增管探测出特征光谱线是否存在及其强度。这种方法可以迅速地定性或定量地检查出样品中的元素。②荧光分光光度计:荧光分光光度计依据生物化学,特别是分子生物学原理。物质受到光照射,发射长波的发光,这种光称为荧光。用光电倍增管检测荧光的强度及光谱特性,可以定性或定量地分析样品成分。③拉曼分光光度计:用单色光照射物质后被散乱,这种散乱光中,只有物质特有量的不同波长光混合在里面。这种散乱光(拉曼光)进行分光测定,对物质进行定性定量的分析。由于拉曼发光极其微弱,因此检测工作需要复杂的光路系统,并且采用单光子计数法。

(3) 其他应用:如液相或气相色谱,如 X 光衍射仪、X 光荧光分析和电子显微镜等。

2. 质量光谱学与固体表面分析

固体表面分析:固体表面的成分和结构,可以用极细的电子、离子、光或 X 射线的束流,入射到物质表面,对表面发出的电子、离子、X 射线等进行测定来分析。这种技术在半导体工业领域被用于半导体的检查中,如缺陷、表面分析、吸附等。电子、离子、X 射线一般采用电子倍增器或 MCP 来测定。

3. 环境监测

(1) 尘埃粒子计数器:尘埃粒子计数器检测大气或室内环境中悬浮的粉尘或粒子的密度。它利用了尘埃粒子对光的散乱或 β 射线的吸收原理。

(2) 浊度计:当液体中有悬浮粒子时,入射光会被粒子吸收、折射。对人的眼睛来看是模糊的,而浊度计正是利用了光的透过折射和散射原理,并用数据来表示的装置。

(3) 其他应用:如 NO_x 、 SO_x 检测。

4. 生物技术

(1) 细胞分类:细胞分类仪是利用荧光物质对细胞标定后,用激光照射,细胞发射的荧光、散乱光用光电倍增管进行观察,对特定的细胞进行标识的装置。

(2) 荧光计:细胞分类的最终目的是分离细胞,为此,有一种用于对细胞、化学物质进

行解析的装置,它称为荧光计。它对细胞、染色体发出的荧光、散乱光的荧光光谱、量子效率、偏光、寿命等进行测定。

5. 医疗应用

(1) γ 相机: 将放射性同位素标定试剂注入病人体内,通过 γ 相机可以得到断层图像,来判别病灶。从闪烁扫描器开始,经逐步改良, γ 相机的性能得到快速的发展。光电倍增管通过光导和大面积 NaI(Tl)组合成探测器。

(2) 正电子 CT: 放射性同位素(^{11}C 、 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{18}F 等)标识的试剂投入病人体内,发射出的正电子同体内结合时,放出湮灭 γ 线,用光电倍增管进行计数,用计算机做成体内正电子同位素分布的断层画面,这种装置称为正电子 CT。

(3) 液体闪烁计数: 液体闪烁计数应用于年代分析和生物化学等领域。将含有放射性同位素物质溶于有机闪烁体内,并置于两个光电倍增管之间,两个光电倍增管同时检测有机闪烁体的发光。

(4) 临床检测: 通过对血液、尿液中微量的胰岛素、激素、残留药物及病毒等对于抗原、抗体的作用特性,进行临床身体检查、诊断治疗效果等。光电倍增管对被同位素、酶、荧光、化学发光、生物发光物质等标识的抗原体的量进行化学测定。

(5) 其他应用: 如 X 光时间计。在 X 光检查中,这个装置自动地控制胶片的 X 光曝光量。X 光到达胶片前,含有磷的屏幕将 X 光转换成可见光,用光电倍增管接收这个光信号,并在信号积分值达到预定标准时给出信号,及时切断 X 光源,以保证胶片得到准确的曝光量。

6. 射线测定

(1) 区域检测仪: 可以连续地检测环境辐射水平。它采用光电倍增管与闪烁体组合的方式,完成对低水平的 α 射线和 γ 射线的检测。

(2) 射线测量仪: 射线测量仪采用光电倍增管与闪烁体组合的方式完成对低水平的 γ 射线和 β 射线的检测。

7. 资源调查

石油测井: 石油测井中用以确定石油沉积位置和储量等。内藏放射源、光电倍增管和闪烁体的探头进入井中,分析放射源被散射的和地质结构中的自然射线,判断油井周围的地层类型和密度。

8. 工业计测

(1) 厚度计: 工业生产中的诸如纸张、塑料、钢材等的厚度检测,可以通过包括放射源、光电倍增管和闪烁体的设备来实现。对于低密度物质,如橡胶、塑料、纸张等,采用 β 射线源; 诸如钢板等的高密度物质,则使用 γ 射线。在电镀、蒸发控制等处,镀膜的厚度可使用 X 射线荧光光度计。

(2) 半导体检测系统: 广泛地应用于半导体芯片的缺陷检查、掩膜错位等。芯片的缺陷检查装置中用光电倍增管检测芯片被激光照射后尘埃、污染、缺陷等产生的散乱光。

9. 摄影印刷

彩色扫描: 彩色图片或照片进行印刷时,需要将其颜色进行分色扫描。分色是用光电倍增管和滤光片,把彩色分解成三原色(红、绿、蓝)和黑色,作为图像数据读出。

10. 高能物理-加速器实验

(1) 辐射计数器: 在两层正交排列的细长塑料晶体的端部, 配置光电倍增管, 测量带电粒子通过的位置和时间。

(2) TOF 计数器: 在电荷粒子通道中, 配置两组光电倍增管与闪烁体的组合件, 测定粒子通过闪烁体的时间差来测定粒子的速度。

(3) 契伦柯夫计数器: 这是用于粒子撞击反应时产生的二次粒子识别的装置。二次粒子通过诸如气体这种介质时, 具有一定能量的电荷粒子会发出契伦柯夫光, 测定这种光的发射角度, 可以识别电荷粒子。

(4) 热量计: 可以准确地测定粒子撞击反应产生的二次粒子能量。

11. 中微子、正电子衰变实验, 宇宙线检测

(1) 中微子实验: 这种实验用于研究太阳中微子、宇宙线粒子物理学。用于发生契伦柯夫光的大量介质。在其周围配置很多大直径光电倍增管, 当中微子等的宇宙射线同介质发生相互作用, 就会产生契伦柯夫光。光电倍增管探测到契伦柯夫光, 可以解析粒子的飞来方向、能量等。

(2) 空气浴计数器: 宇宙线与地球大气撞击时, 同大气原子发生作用, 生成二次粒子, 并进一步生成三次粒子。这样地增加下去, 称作空气浴。这种空气浴产生的 γ 线、契伦柯夫光, 由在地面上排列成格子状的许多光电倍增管来探测。

12. 宇宙

(1) 天体 X 线探测: 来自宇宙的 X 线中含有很多揭开宇宙之谜的信息。ISAS 集团发射了探测超新星发出的天体 X 线的“阿斯卡”卫星, 其中使用的探测器就是位置灵敏光电倍增管和气体正比计数管的组合体。

(2) 恒星及星际尘埃散乱光的测定: 来自宇宙的紫外线有许多与天体表面温度、星际物质有关的信息。但是, 地球大气层阻止了紫外线到达地球表面, 所以, 在地面上不能加以测量。因此, 用发射火箭的方法, 在火箭上搭载装置, 探测 300nm 以下的紫外线。

13. 激光

(1) 激光雷达: 激光雷达用于高精度测距、大气观测等。

(2) 荧光寿命测定: 把激光作为激励光源, 测定样品荧光强度的时间变化, 用来研究样品的分子结构。

14. 等离子体

等离子体探测: 托克马克核聚变实验中的等离子电子密度、电子温度测量系统中, 使用光电倍增管用来计测等离子中的杂质。

本节介绍了光电倍增管的几个主要应用。

5.5.1 分光光度计

分光光度计(Spectrophotometry)是通过测定被测物质在特定波长处或一定波长范围内光的传播和反射特性, 对该物质进行定性和定量分析的方法。光度测量方法主要分为两类。第一类是利用特定波长的光的吸收、反射和偏振。第二类是将外部能量作用于样品并测量作用后的发射光谱。

目前使用的分光光度测量仪器有: 可见光到紫外光的分光光度计(吸收、反射); 红外

分光光度计(吸收、反射);远紫外分光光度计(吸收、反射);发射光谱仪;荧光分光光度计;原子吸收分光光度计;旋光光谱仪;拉曼光谱仪;密度计、色度计和颜色分析仪等等。

下面以紫外、可见光、红外分光光度计为例说明测量原理。

当光穿过物质,光能量会引起物质中电子状态的改变(电子跃迁)或引起特定分子震动,造成局部能量损失,这被称为吸收,可以通过测量吸收程度来进行定量分析。

分光光度计的测量原理和简化框图如图 5-36 所示。

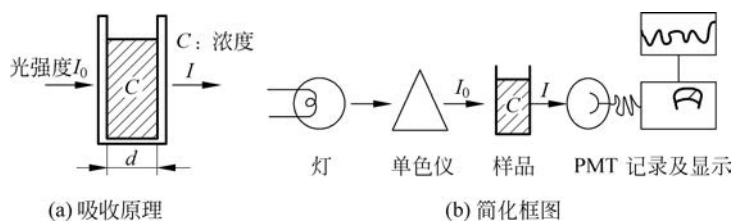


图 5-36 分光光度计测量原理和简化框图

目前,分光光度计中使用的光学系统有多种。图 5-37 所示是分光光度计的一种光学系统,其光源覆盖了紫外、可见光和红外范围。

5.5.2 医疗器械

光电倍增管在医学中应用非常广泛,如正电子发射断层扫描(Positron Emission Tomography, PET)、伽马相机、X 射线图像诊断设备、体外测试。下面以 PET 为例分析。

作为应用核医学诊断,使用光电倍增管的正电子发射断层扫描得到了广泛应用。图 5-38 所示为 PET 扫描仪概念图。

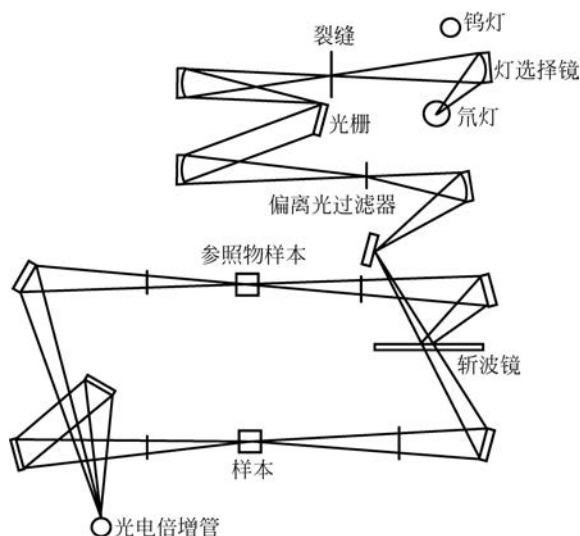


图 5-37 分光光度计的紫外、可见光及红外光学系统

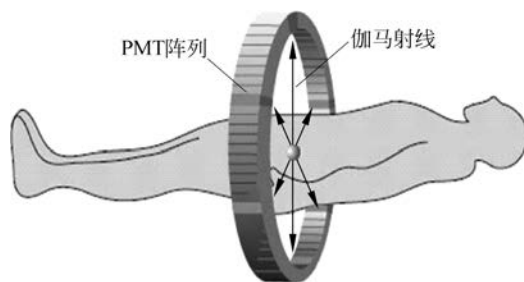


图 5-38 PET 扫描仪概念图

当一个放射性示踪剂释放的正电子注入体内并与电子相撞后湮灭,产生方向相反而能量(511keV)相同的两个伽马射线。这些伽马射线同时被光电倍增管阵列检测。

PET 提供活体在活跃的状态下的断层图像,通过在人体内注射正电子发射放射性同位素标记的药物并测量其浓度来进行病变和肿瘤的早期诊断。PET 使用的典型正电子发射放射性同位素有 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{18}F 。

当正电子在体内发射,它们与周边组织的电子结合,在相反方向释放一对 γ 射线。多个环状探测器环绕在人体周围进行耦合侦测。与 X 射线计算机断层扫描(X-ray CT)方法相同,通过排列每个角度获得横断数据,PET 扫描仪可创建一个断层重建图像。

PET 的主要特点是可以进行生理或生化信息如代谢、血流量和神经传导的定量测量。PET 主要是用于研究脑功能和其他器官的机制。目前,PET 被应用于医疗诊断中,可以有效诊断癌症。

PET 使用的探测器由一个耦合到闪烁器的紧凑型光电倍增管组成。为了有效地检测体内释放的高能量(511keV)伽马射线,经常使用对其具有高停止功率的闪烁体,如 BGO($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$)和 LSO(Lutetium Oxyorthosilicate)晶体。

另一种测量技术正在研究中,它是利用正电子湮没产生的伽马射线的飞行时间(Time-of-Flight, TOF)。这种测量技术是采用高速光电倍增管和具有短的发射衰变的闪烁体。

5.5.3 生物技术

在生命科学的应用中,光电倍增管主要用于检测荧光和散射光。设备主要用于细胞分拣、荧光计和核酸测序等生命科学中。下面以基因(DNA)芯片扫描仪(如图 5-39 所示)为例进行分析。

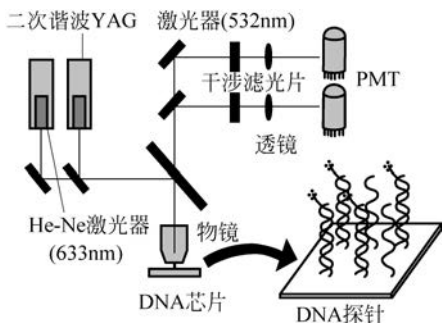


图 5-39 DNA 芯片扫描仪

生化工具“DNA 芯片”被用于分析大量的遗传信息。该技术是指将大量(通常每平方厘米点阵密度高于 400)探针分子固定于支持物上后与标记的样品分子进行杂交,通过检测每个探针分子的杂交信号强度进而获取样品分子的数量和序列信息。通俗地说,就是通过微加工技术,将数乃至百万计的特定序列的 DNA 片段(基因探针),有规律地排列固定于 2cm^2 的硅片、玻片等支持物上,构成的一个二维 DNA 探针阵列,与计算机的

电子芯片十分相似,所以被称为基因芯片。基因芯片主要用于基因检测工作。一些基因芯片是利用半导体光刻方法制作,而其他的是利用高精度的智能机械配发在玻璃片上。核酸探针(排列已知)黏结在玻璃片上,与荧光染料标记的样本片段杂交。用激光束扫描 DNA 芯片,通过测量杂交核酸发出的荧光强度来获取样品 DNA 的遗传信息。杂交过程是指将有相同碱基的单链互补链接形成双链。

5.5.4 环境测量

在环境测量设备中光电倍增管也常被用来作为探测器,例如,用来检测空气或液体中的含尘量的尘埃计数器、用于核电厂中的辐射监测器。下面介绍激光雷达(Laser radar, LIDAR)的应用。



图 5-39 动态效果

激光雷达是工作在红外和可见光波段的雷达。它由激光发射机、光学接收机、旋转台和信息处理系统等组成,如图 5-40 所示。激光器将电脉冲变成光脉冲发射出去,光接收机再把从目标(大气分子、气溶胶、云等)反射回来的光脉冲还原成电脉冲,并转换成数字信号,由计算机处理,以测量散射体的距离、浓度、速度和形状。激光发射机和接收机安装在同一个地方,激光束扫描目标区以获得一个三维空间分布。

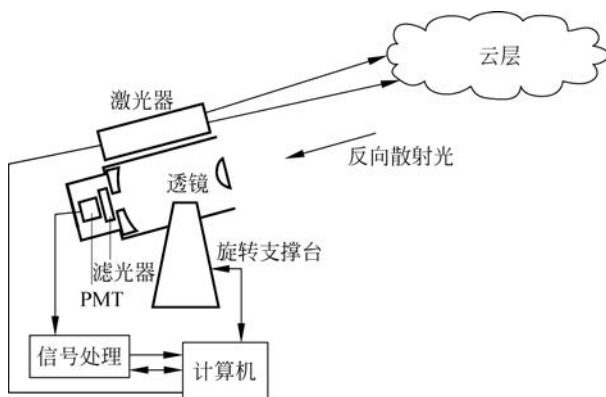


图 5-40 大气探测激光雷达简图



图 5-40 动态效果

5.5.5 固体表面分析

固态表面分析是通过测量电子束或 X 射线照射样品时电子与原子组成的样品相互作用产生的二次电子、光电子、反射电子、发射电子、Auger 电子或 X 射线来检查样品表面状态。这些应用中使用的探测器是离子探测器。

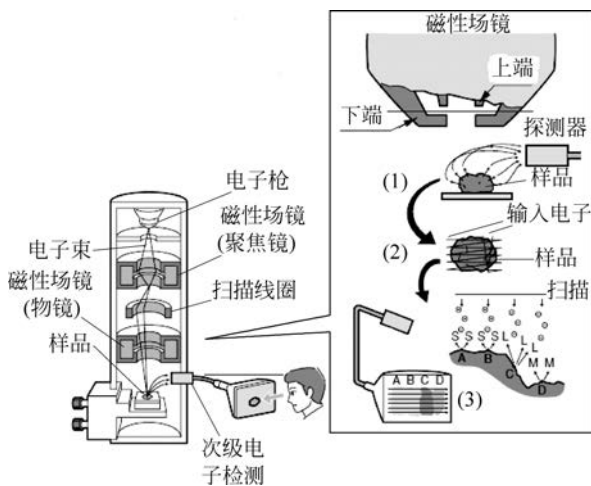


图 5-41 扫描电子显微镜的结构和原理

固体表面分析仪大致分为两种：一种使用电子束照射样品；另一种使用 X 射线。目前，固体表面分析仪主要有扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(AES)、Auger 电子能谱仪(AES)、电子光谱化学分析(ESCA)。

在这四种类型的表面分析仪中，扫描电子显微镜(SEM)使用最为广泛，它的结构和原理如图 5-41 所示。

从电子枪发射的电子束在 0.5V~30kV 的电压下加速。加速后的电子束被电磁透镜的聚焦透镜和目镜压缩，最后形成直径为 3~100nm 的很窄的波束并辐照在样本表面。光束照

射的样品表面产生次级电子，并被次级电子探测器探测。通过移动电磁镜头可以使电子束在样品表面预定区域的 XY 方向扫描。放大的次级电子图像可以与次级电子探测器的信号同步显示在阴极射线管(Cathode Ray Tube, CRT)上。图 5-42 说明了次级电子探测器的结构和操作。

一个典型的次级电子探测器包括一个集电极、闪烁体、光管、光电倍增管和前置放大器。集电极和闪烁体需要提供一定的电压以提高次级电子收集效率。样品产生的大多数次级电子入射到闪烁体被转换为光，转换的光经过光管并被光电倍增管检测。

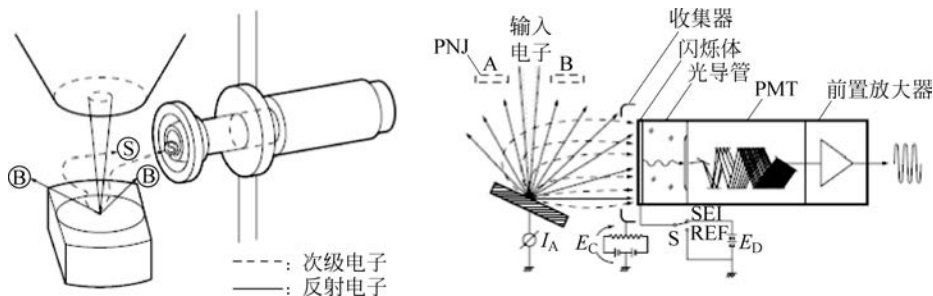


图 5-42 次级电子探测器的结构和操作



第 5 章
参考答案

思考题与习题

5.1 何谓“光电发射阈值”？它与“逸出功”有什么区别？引入“光电发射阈值”对分析外光电效应有什么意义？

5.2 光电发射和二次电子发射有哪些不同？简述光电倍增管的工作原理。

5.3 真空光电倍增管的倍增极有哪几种结构？各有什么特点？

5.4 为什么常把真空光电倍增管的光电阴极制作成球面？这样设计有什么优越性？

5.5 光电倍增管产生暗电流的原因有哪些？如何降低暗电流？

5.6 光电倍增管的主要噪声是什么？在什么情况下热噪声可以被忽略？

5.7 怎样理解光电倍增管的阴极灵敏度与阳极灵敏度？二者的区别是什么？二者有什么关系？

5.8 何谓光电倍增管的增益特性？光电倍增管各倍增极的发射系数 δ 与哪些因素有关？最主要的因素是什么？

5.9 光电倍增管的短波限与长波限由什么因素决定？

5.10 某光电倍增管的阳极灵敏度为 10A/lm ，为什么还要限制它的阳极输出电流在 $50\sim 100\mu\text{A}$ ？

5.11 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 $100\mu\text{A}$ 内，求允许的最大入射光通量。

5.12 光电倍增管的供电电路分为负高压供电与正高压供电，试说明这两种供电电路的特点，举例说明它们分别适用于哪种情况。

5.13 某型号光电倍增管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，最大的输出电压。(3) 若已知该光电倍增管为 12 级的 Cs_3Sb 倍增极，其倍增系数 $\delta = 0.2(V_{\text{DD}})^{0.7}$ ，试计算它的供电电压。(4) 当要求输出信号的稳定度为 1% 时，求高压电源电压的稳定度。

5.14 设入射到 PMT 光敏面上的最大光通量为 $\Phi_V = 8 \times 10^{-6}\text{lm}$ ，当采用某型号倍增管作为光电探测器探测入射时，已知某型号为 11 级的光电倍增管，阴极为 Ag-O-Cs 材料，倍增极为 AgMg 合金材料，阴极灵敏度为 $10\mu\text{A/lm}$ 。若要求入射通量在 $8 \times 10^{-6}\text{lm}$ 时的输出电压幅度不低于 0.15V ，试设计该 PMT 变换电路。若供电电压的稳定度只能做到 0.01%，试问该 PMT 变换电路输出信号的稳定度最高能达到多少？