

[2] R. P. Feynman, Lecture on physics, Vol. III, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, (1965), 21-14—21-19.
 [3] D. N. Langenberg et al., *Phys. Rev.*, **150** (1966), 186.

[4] C. C. Grimes, S. Shapiro, *Phys. Rev.*, **169**(1968), 397.
 [5] T. F. Finnegan et al., *Phys. Rev. B*, **4** (1971), 1487.

光电倍增管的选择和使用 (II)

李 禄 华

(北京综合仪器厂)

四、选择光电倍增管要考虑的几个方面

选择光电倍增管的主要依据是使用要求。在能满足使用要求的条件下还要考虑价格。在有些使用要求相互矛盾时要善于抓住主要因素或者采取折衷的办法解决,有时还需借助于测量技术去解决。选择管子一般要考虑如下一些方面:

1. 管子直径的选择

一般说来,管子直径的大小决定了阴极面积的大小。如果使用场合对管子的外形尺寸不加限制,那么最好采用中等尺寸的管子(如直径 51 毫米),这种尺寸的管子有人称为标准型管,它的大小适中,性能优良,有最佳的阴极均匀性和幅度分辨率。如果空间受限制,则需根据空间受限制的情况选用适当小尺寸的管子,小尺寸管的阴极均匀性和幅度分辨率较差。如果是宽束的输入信号,则需选用大尺寸的管子,但大面积阴极管子的暗电流和噪声比较大。

2. 光电阴极的选择

光电阴极的选择是很重要的。几个重要的应用参数如灵敏阈、信噪比和幅度分辨率等都与阴极有很大的关系。如果光电阴极对信号的探测效率不高而它的噪声又大,那么这种光电倍增管就不可能有高的信噪比。选择光电阴极是使给定的输入信号能够给出最大的光电子产

额,这里包括光电阴极的光谱响应特性要与待测光信号的光谱特性相匹配,同时要求有高的量子效率。

3. 放大倍数

放大倍数的选择首先要估计输入信号的强度和确定输出电流的大小。输出电流的大小由记录电路的灵敏度决定,这是容易确定的。但估计输入光信号的强度往往并不容易,一个简单的办法是采用已知放大倍数的管子进行实测。从而估算出所需的放大倍数。不过放大倍数的选择要求并不严格,因为通过调节阳极电压可以在很大范围内改变管子的放大倍数。放大倍数 G 与阳极电压的关系可估算如下:

$$G \approx f(g\delta)^n,$$

式中 f 为第一倍增极的收集效率,约为 90%, g 为级间收集效率,约等于 1, n 为倍增极数目, δ 为倍增极的二次发射系数。 δ 与电压关系可由经验公式估算。

对 Sb-Cs 倍增极,经验公式为

$$\delta = 0.2(V_D)^{0.7}.$$

对含铯的 AgMg 合金倍增极,其经验公式为

$$\delta = 0.025V_D,$$

式中 V_D 为倍增极级间电压。

应该指出,管子的放大倍数以选得偏高为好。因为如果放大倍数偏低,就要求阳极电压增高,而电压过高,会伴随产生许多不希望有的现象,如场致发射、残余气体电离甚至绝缘击

穿,这会使暗电流和噪声大为增加,呈现不稳定性,从而使管子的性能大大降低.如果放大倍数偏高,则可降低阳极电压,电压降低使漏电流成分相对增大,这对要获取的信息影响很小.电压降低也可使线性电流减小,但这可采用“散焦”分压器来降低放大倍数而又不降低阳极电压和减小线性电流的大小.散焦电极一般选择第5个倍增极 D_5 ,散焦分压器线路如图4所示.

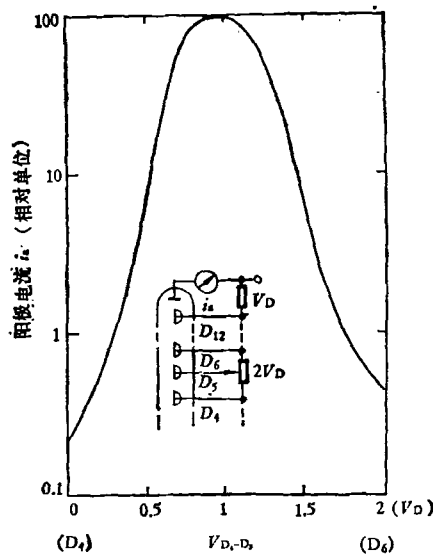


图4 散焦分压器中 D_5 电位变化对阳极输出电流的影响

4. 暗电流、噪声

为了评价和比较光电倍增管的暗电流大小,引入“暗电流等效输入”这一参数,它定义为暗电流除以放大倍数所得的商.对一个具体的管子而言,在一定的阳极电压变化范围内其暗电流等效输入的值基本上是不变的.对不同的管子而言,暗电流等效输入的大小就反映出暗电流的水平.在暗电流和噪声较重要的场合,选择双碱阴极管是合适的,因为双碱阴极的热发射低.但双碱阴极对红光不灵敏,如果同时要求对红光灵敏,则需采用多碱阴极或磷化镓阴极的管子,而采用其它办法来降低暗电流.

降低暗电流的方法:对漏电流采取保持管基和管座清洁、干燥以及加保护环的方法,使漏

电流不流过阳极回路;对热发射电流采用致冷的办法有显著效果.对多碱、铋铯等阴极,当温度下降到 -40°C 时热发射电流实际上已近于消除,继续降低温度已没有明显效果,而 Ag-O-Cs 阴极则需冷却到零下一百多度.几种阴极的暗电流随温度变化的典型曲线如图5所示.

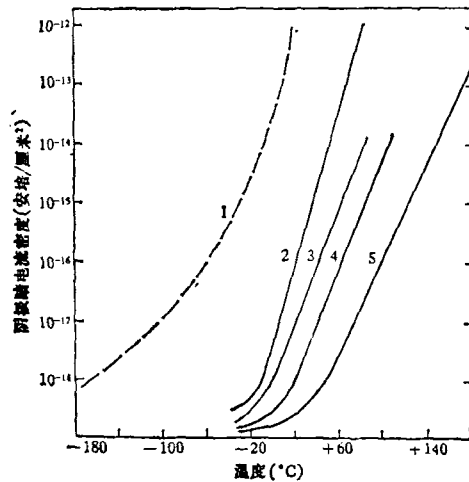


图5 几种阴极的暗电流随温度变化的典型曲线

- 1 为 Ag-O-Cs 2 为 Sb-K-Na-Cs ;
3 为 Sb-Cs ; 4 为 Sb-K-Cs ;
5 为 Sb-K-Na

热发射电子的数量与阴极有效面积有关,面积小热发射电子少.有一种专门设计的小阴极面积管就是为了降低暗电流的,如北京综合仪器厂的GDB-53, GDB-57和EMI公司的9789B等管型,其管壳直径为51毫米,而阴极有效直径仅10毫米.这种管子适用于入射光束直径小,或者可以把入射光束聚集在小的阴极面上的场合.对于阴极面积比较大的管子,我们可以采用磁散焦技术来减小阴极的有效面积,即在阴极上加上一“磁散焦镜”,使部分阴极面上发射的电子受磁场的作用而不被收集到第一倍增极的有效面上,使这部分电子不被倍增.采用磁散焦技术比较简便,效果也好.采用致冷技术则比较复杂,但效果更好.该采用哪一种办法,或两种办法同时采用,可根据使用要求决定.

减小散粒噪声的一种办法是在不影响测量系统对信号的反应速度的情况下,减小测量系

统的通频带。在脉冲计数的应用上,选用石英窗的管子和采用符合技术都是降低噪声的有效途径。

5. 最大阴极电流、最大阳极电流

限制最大阴极电流的因素主要是半透明阴极的阴极电阻率效应,阴极电阻率决定了所能输出的最大阴极峰值电流,阴极电阻率与阴极

材料有关,也与温度有关。双碱阴极的电阻率最大,多碱阴极的电阻率小,所以对较强的蓝光和绿光的探测通常也采用多碱阴极管而不用双碱阴极管。不透明阴极的电阻率很小,所以侧窗管可以输出大的阴极峰值电流。阴极电阻率随温度下降而增大,进一步限制最大阴极峰值电流。几种常用阴极的最大允许电流密度的数据列于表 3。

表 3

阴 极 类 型	Sb-Cs	Sb-K-Cs	Sb-K-Na	Sb-K-Na-Cs	Ag-O-Cs	Sb-K-Na-Cs (侧窗)
最大电流密度(毫微安/厘米 ²)	15	2.5	2.5	250	5	5×10 ³

最大阳极平均电流主要受阳极功耗限制,过大的电流使倍增极发热,使表面的铯重新沉积从而影响二次发射系数。由于百叶窗结构的倍增极面积大,所以其最大阳极平均电流也较大些,一般管子的阳极平均电流约 100 微安。随着管子尺寸的减小,应相应减小阳极平均电流值。

最大阳极脉冲电流主要受空间电荷限制。它与倍增极结构有很大关系,并按照盒栅式,百叶窗式、圆周聚焦式、直线聚焦式的次序增大。

6. 使用的环境条件

(1) 磁场

光电倍增管在外界磁场的作用下,使光电子的轨道发生变化,导致收集效率和放大倍数的降低,因而影响幅度分辨率和稳定性等参数。影响的程度与磁场强度和方向有关,也与光电倍增管本身有关。对端窗、阴极直径大和聚焦型的管子影响大,对侧窗、阴极直径小和非聚焦型管影响较小。一般说来,为了减小磁场的影响,光电倍增管应该加上磁屏蔽。可采用坡莫合金作屏蔽筒。若屏蔽筒的上端比端窗高出半个管壳直径,那么屏蔽效果是比较好的。

(2) 电场

光电倍增管采用负高压供电时,阴极处于负电位。当任何处于地电位的导体与玻壳接触时,在阴极与导体之间有高的电位差。这样在

玻壳上可能产生放电而增大管子的暗电流。为了消除这一影响,管壳上可套上坡莫合金的屏蔽筒并连接到阴极电位上,既屏蔽了电场,又屏蔽了磁场。

(3) 环境光

当光电倍增管加上高压时,曝光会造成光电倍增管永久性的损坏。在没有加上高压的情况下,暴露在环境光下虽然没有危险的,但曝光使阴极俘获光子能量,这些能量将以电子发射的形式而消耗掉,当俘获的能量尚未完全消耗掉时,加上高压则出现过大的暗电流。光电倍增管曝光后一般要在黑暗中经过 24—48 小时,阴极俘获的光子能量才能完全消耗掉,暗电流才能下降到它的平衡值。因此将管子装入探头时要注意避光,装入后要蔽光一段时间,待暗电流下降到它的平衡值时才加上高压使用。

实验表明,曝光引起的暗电流的增大,与曝光接收的辐射通量,波长和照射时间有关。辐射通量越大、波长愈短和照射时间越长则暗电流的增加越大。

(4) 温度

温度对光电倍增管的作用是环境条件中最普遍的一种作用。大部分光电倍增管的最高使用温度为 60℃,因为几乎所有的管子都含有铯,若管子温度超过 60℃将发生铯的重新沉积,而给管子的性能带来严重的影响。此外温度高会造成暗电流和噪声大增,大大降低管子的性

能. 低温的限制主要是阴极电阻率. 绝大部分管子的最低使用温度都可以在 -40°C 以下, 而双碱阴极管最低使用温度为 -20°C . 此外尚需考虑管座的影响, 聚四氟乙烯管座低于 -40°C 时, 管座变形会引起玻璃挤裂.

光电倍增管阳极灵敏度的温度系数约为 $-(0.1-1)\%/^{\circ}\text{C}$, 使用时若环境温度变化范围大而又要求管子工作稳定时, 可采取恒温的办法, 温度高于常温还是低于常温, 可根据对暗电流的要求而定.

(5) 湿度

湿度的高低对光电倍增管管外和管座的漏电影响很大, 甚至可能使管子无法正常工作. 所以在气候潮湿的季节和地方以及在致冷条件下工作时, 必须采取措施使探头保持干燥和气密性良好, 以防止水汽在管基、管座和窗玻璃上的凝结.

(6) 放射性

如果管子工作在靠近强放射源的地方, 由于产生契伦科夫光子和荧光将显著增加管子的本底脉冲. 因此必须对周围的放射源采取适当的屏蔽. 同时还必须将光电倍增管置于屏蔽室内.

(7) 振动

光电倍增管有时需要经受强烈的振动, 为保持管子在振动过程中和振动以后能正常地工作, 此时应选用加固型管. 加固型管一般是小型管, 直径约 30 毫米, 它在机械结构上作了专门设计. 使它能承受在军事上或空间应用上出现的恶劣的环境条件的影响, 而电性能又能满足使用要求.

五、某些方面应用对光电倍增管的要求

1. 光子计数

光子计数是一种测量极弱光的探测技术. 它是测量光信号在光电倍增管中产生的输出脉冲. 如果已知输入光子波长上的量子效率, 则可根据所探测到的脉冲数来推算出入射于光电阴极的光子数, 从而测定入射于阴极的绝对辐

射通量. 光子计数广泛地用于激光喇曼谱仪和星体跟踪等极弱光信号的探测上. 此外, 利用光子计数技术还可以测定快速光脉冲的波形.

选择用于光子计数的管子应考虑下面几个参数:

(1) 具有明显的单电子谱, 单电子分辨率应小于 200%, 低幅度脉冲数要少. 因此第一倍增极的二次发射系数要高, $K-D_1$ 之间应能加上较高的电压(如 500—600 伏).

(2) 响应速度快, 这样可允许工作在较高计数率, 量程宽.

根据上述两项要求, 光子计数用的光电倍增管一般都采用直线聚焦的倍增结构.

(3) 光电阴极的均匀性要好, 具有高而稳定的量子效率, 稳定的收集效率. 通常选择均匀性好的部分作光电阴极.

(4) 暗计数率要低. 一般采用小面积阴极管, 如多碱阴极管, EMI9862B/100, 9862B/350 的阴极有效直径分别为 2.5 毫米和 9 毫米. 其暗计数率分别为 40 计数/秒和 400 计数/秒. 又如双碱阴极管, EMI9893B/100, 9893B/350 的阴极有效直径分别为 2.5 毫米和 9 毫米, 其暗计数率分别为 5 计数/秒和 10 计数/秒.

2. 闪烁计数

闪烁计数用于核辐射探测, 测量放射性的能量、强度和两个粒子之间的时间关联. 在闪烁计数中, NaI(Tl) 晶体是最常用的闪烁体, 它的发光效率高, 发射光谱在蓝光区. 因此光电倍增管的蓝光灵敏度成为闪烁计数用管的一个重要参数. 由于双碱阴极与 Sb-Cs 阴极相比具有更高的量子效率和更低的热发射, 因此在闪烁计数中, 特别是在低能辐射的探测上 Sb-Cs 管逐渐被双碱阴极管所取代.

(1) 能谱测量. 测量一个粒子或电磁辐射的能量时, 闪烁计数最重要的参数是能量分辨率, 即能分开两个能量非常接近的两个辐射的能力.

一般是用 $^{137}\text{Cs}-\text{NaI(Tl)}$ 晶体组合件来测量光电倍增管的脉冲幅度分辨率. 目前最好的分

分辨率略小于7%。对低能辐射,则用 ^{59}Fe (5.9千电子伏X射线)与铍窗薄 NaI(Tl) 晶体组合来测量光电倍增管的脉冲幅度分辨率,作为对低能事件的分辨率的品质因数。目前较好的分辨率约在50%附近。

(2) 定时测量。在飞行时间谱仪中则要考虑光电倍增管时间分辨率这一参数,目前好的管子的时间分辨率约为200—300微微秒。它是用一个等效于 ^{60}Co -塑料闪烁体光强的 δ 函数光源测得的,时间分辨率表征对事件发生时刻的测量精确度。

(3) 强度测量。对高能量辐射的强度测量,一般利用闪烁计数器的坪特性来选择光电倍增管的最佳供电状态,而“坪斜”这一参数是重要的。对低能辐射的强度测量,则利用光电倍增管的暗计数特性来选择管子的最佳工作状态。在暗计数特性中,具有一个坪区是重要的。

(4) 对契伦科夫辐射的探测。由于契伦科夫辐射的光谱在紫外区,波长愈短辐射愈强,因此应采用石英窗的管子,此外契伦科夫辐射所发射的光子数很少,所以选用双碱阴极管是合适的。

3. 快速管

快速光电倍增管有多种用途,不同的用途要考虑不同的参数。

(1) 快速脉冲波形观测以及高计数率测量,应考虑上升时间和脉冲半宽度等参数。目前快速管的上升时间和脉冲半宽度分别约为2毫微秒和3毫微秒左右。

(2) 定时测量,如在飞行时间谱仪和激光测距仪中要考虑时间分辨率这一参数。

(3) 高频调制信号的测量要考虑光电倍增管通频带这一参数,目前快速管的通频带约为100兆赫兹。

4. 高温管

工作环境温度在100℃附近的可采用双碱阴极管,在150℃附近的可采用高温双碱阴极和合金倍增极的管子。

对高温管的要求是:阳极灵敏度随温度的升高而降低不大,即温度的稳定性要好;在高温下暗电流和噪声的增长不能过大;高温下的坪特性要好,要有一定的坪区,以利于选择光电倍增管的供电状态。

5. 优选管

在光电倍增管制造过程中有许多因素往往是难以准确地控制的。因此,即使是制造同一型号的管子,各管的参数也会相差很大。例如暗电流有的极小,有的又很大。又如稳定性,有的稳定度很好,有的又很差。还有一些参数也类似这种情况。就是说光电倍增管的参数分散性大。为了合理利用光电倍增管,同时又满足某些使用者对某一参数的特别高要求,有些制造厂家对同一型号管子按某些参数进行优选分类,然后将分类符号加在型号的尾部。如56 AVP/03, GDB-44F, EMI9658R。这些型号尾部加的“03”,“F”和“R”等就是有关厂家规定的优选分类号。

现将某些厂家的优选分类符号的含义介绍如下:

Philip 公司规定的优选分类符号的含义如下:“01”类为高放大倍数管,“02”类为X射线谱仪用管,“03”类为低噪声管,“04”类为稳定性好的管子,“08”类为对计数率变化具有高的稳定度管,“SP”类为能量分辨率好的管。

北京综合仪器厂规定的优选分类符号的含义如下:L类为灵敏度高的管,F类为幅度分辨率好,D类为噪声低,N类为稳定性好,A类为暗电流小。

EMI 公司规定的优选分类符号的含义如下:L类为能量分辨率好,R类为阴极灵敏度等性能优良,对某些型号的管子,它还包含能量分辨率好。

六、对光电倍增管供电电源的要求

光电倍增管的放大倍数与工作电压关系很大,电源的稳定度一般要比放大倍数的稳定度

高7—10倍。如果放大倍数的稳定度要求1%，电源的稳定度则要求0.1%。至于电源电压的调节范围，由于快速管和高温双碱阴极管的工作电压比较高，所以电源电压的调节范围一般要求在1500—2500伏。其它管子的工作电压比较低，电源电压调节范围一般要求在500—1500伏。对电源输出电流的要求，对快速管一般要求电源的输出电流比较大，例如1—2毫安。对能谱和光度等方面应用的管子，电源输出电流可以比较小，便携式仪表中应用的管子输出电流可以更小些。

电源的极性通常有两种：一种是负高压，另一种是正高压，各有其优缺点，应根据具体应用场合来选择。采用负高压时阳极接近于地电位，这样对直流光信号的测量或快速光信号的观测极为方便。小电流放大器或高频同轴电缆可直接与阳极相连，高频传输特性好。但这时阴极处于高电位，管壳附近处于地电位的导体可能引起管子的暗电流和噪声的增大，增加管子工作的不稳定性。因此最好在管壳上裹上一层金属，并将它连接到阴极电位上。采用正高压供电可以使管子有较低和稳定的暗电流，但由于阳极处于高电位，管子输出与记录电路之间需连接一耐高压的隔直电容，输出电路的分布参数增大，影响高频传输特性。由于负高压供电比较简单，通常多采用负高压。个别情况下，当要求某一倍增极输出信号时也可采用倍增极接地，这时采用的高压电源是浮置的。

七、分压器

分压器的功能有二：一是供给光电倍增管各个电极一个合适的电位分布，使收集效率高，对快速管来说还要求渡越时间分散小；二是信号通过管子期间供给各电极足够的信号电流，特别是在输出大电流时要保证光电倍增管仍处于线性工作状态。

光电倍增管分压器的设计很重要，不适当的分压器可能使线性、分辨率和稳定性等参数变坏。分压器决定了光电倍增管的供电状态，而

管子的供电状态又取决于管子的用途，因此设计分压器必须首先了解管子的工作要求，不同的要求应有不同的分压器。没有一种分压器是万能的、通用的。如果要求分压器在一定的阳极电压下放大倍数最高，那么线性电流就受影响。

分压器一般是由一个电源和若干个分压电阻所构成（有的分压器还有齐纳二极管），因为分压电阻的阻值容易调节以满足光电倍增管最佳工作状态所需的各电极的电位分布。分压器通常可细分为三部分：前级、中间级和后级。无论是测量直流光信号还是脉冲光信号，中间级一般都采用均匀的电阻分布。对直流光信号的测量，后级也采用均匀分布。对脉冲信号测量，后级一般是非均匀分布的，使最后几个倍增极之间有较高的电场来避免空间电荷效应，提高线性电流。

分压器的前级对光电倍增管的参数影响最大。前级的设计应使第一倍增极对光电子的收集效率要高，这对低能辐射和弱光探测尤为重要，因为这时光电子数的统计起伏成为重要的因素。同时应使阴极与第一倍增极之间具有足够高的场强，这样第一倍增极具有较高的二次发射系数，有利于提高单电子幅度分辨率，信噪比和脉冲幅度分辨率等参数。对快速管来说，也有利于减小光电子的渡越时间分散。对直线聚焦结构的管子和其它带聚焦极的管子，尽管在结构设计时对输入系统进行了仔细的设计，但制造过程中由于电极零件的制作和装架往往不可避免产生偏离设计的情况。这种偏离需要借助于在使用时对每支管子具体调选各电极的电位分布来校正。通常制造厂家对带聚焦极的管子出厂时都给出了前级的分压比的数据，以供使用。

百叶窗结构的管子倍增极的有效面积大，电极的电位分布不显著影响管子的工作，因而对分压电阻的要求不那么苛刻，对制造厂家给出的几种类型的分压器，可根据使用要求直接选用。对聚焦型的管子，分压电阻要求比较苛刻，阻值要求精确，且温度系数要小。

测量直流光信号时，为了保证管子处于线

性工作状态,通过分压器的电流一般应不小于阳极最大输出电流的20倍.当线性度要求达1%时,分压器电流应比阳极电流大100倍以上.测量脉冲信号时,当脉冲电流较大但平均电流并不大时,可在分压器的后几个电阻上并联储能电容,以维持信号通过管子期间电极电位能基本恒定.分压器电流不宜过大,以免超过电源的负荷能力.此外,电流过大会使分压器发热厉害,可能引起探头温度升高,从而增大暗电流和降低稳定性.通常情况下可考虑采用100千欧—300千欧的分压电阻.对快速管,由于脉冲电流较大,阻值宜取小些.电阻的额定功率应比实际消耗的功率至少大一倍.

储能电容的容量可作如下简单的估算:设最后一级的电压在信号通过管子期间应该稳定在1%以内,则与最后一个电阻 R_n 并联的储能电容为

$$C_n = \frac{100}{V_n} \int i_a dt,$$

式中 V_n 为最后一级的电压(伏), i_a 为阳极脉冲电流(安),储能电容 C_n 单位为法拉.对于最后第2个,第3个……的储能电容的容量可分别比它的后一级小 δ 倍(δ 为该级的二次发射系数).当倍增极电流小于分压器电流的1/10时,可不需要再跨接储能电容.储能电容容量的上述估算对低计数率情况是合适的.在高计数率时情况要复杂些.

八、输出电路

光电倍增管的输出电路以及后面跟随的测量电路的类型,都依赖于使用者所需要的信息种类和输入信号的特性.光电倍增管的阳极可以认为是一个理想的恒流源.通常阳极接上一个负载电阻 R_a 并与阳极对地的分布电容 C_a 并联.管子输出的电流信号在 $R_a C_a$ 电路上形成电压信号,负载电阻 R_a 值应根据所需获取的信息和输入信号的特性来选择.

测量直流光信号时,阳极连接一直流仪表,这时 R_a 值不应过大,否则,在最大的信号电流

下,负载两端的压降会降低末级与阳极之间的电压,使它低于饱和电压值,从而影响电子的收集,一般应取 $I_{a,max} R_a < 10$ 伏.

测量调制光信号时,在调制光频率低于光电倍增管通频带的情况下,应使阳极输出端的频带宽度大于调制光频率 f_M ,即

$$f_M < \frac{1}{2\pi R_a C_a}.$$

闪烁计数器测量能谱时,幅度分辨率与 $R_a C_a$ 时间常数的关系如图6所示, $R_a C_a$ 越大,幅度分辨率愈好,但 $R_a C_a$ 大,增加了脉冲重叠几率,因此一般选取 $R_a C_a = (5-10)\tau$, τ 为闪烁体发光衰减时间,对于NaI(Tl)晶体, $\tau = 0.25$ 微秒.

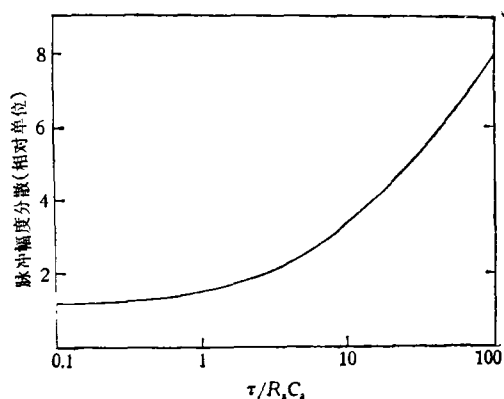


图6 脉冲幅度相对分散与 $\tau/R_a C_a$ 的关系

在射线强度测量中可适当考虑放射源的强度来选择 $R_a C_a$ 时间常数.

在脉冲计数和能谱测量中,阳极电压脉冲应经过一射极跟随器(对电子管电路,为阴极跟随器)再传输到放大器或记录装置上.阳极与射极跟随器输入端之间的引线要短,否则分布电容增大使输出脉冲幅度减小.

光电倍增管用于观测快速脉冲波形时 R_a 值应取小,一般取高频同轴电缆的特性阻抗值.快速脉冲信号的测量要求接线尽量短,使高频信号通道的分布参数为最小,高频传输特性好.

还可以从最后一、两个倍增极上输出正的信号,这种信号常常用作选幅脉冲,其幅度比阳极输出幅度小.

最后列出几本参考文献供读者参阅。文献[1]对快速光电倍增管的结构和性能方面作了较系统的论述;文献[2]对闪烁计数用光电倍增管的性能有较详细的叙述;文献[3]侧重于光电倍增管的使用问题;文献[4]对光电倍增管的结构、材料、工艺、性能和应用等方面有较全面的叙述,同时还介绍了国内外一些主要厂家的产品的主要性能。如果要更详细地了解这些产品的数据,可参阅它们最新出版的产品样本。

问题讨论

关于硫系非晶态半导体 $\text{GeTeS}_2\text{Sb}_2$ 的电导机理问题

陈宗才 杨涵美 陆家福

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

硫系非晶态半导体 $\text{Ge}_{15}\text{Te}_{85}\text{S}_2\text{Sb}_2$ 材料的玻璃转变温度 T_g 为 $123-127^\circ\text{C}^{[1,4]}$ 。第一个晶化峰温度 T_{C1} 为 $196-201^\circ\text{C}^{[1,2]}$, 此时材料内有 Te 晶体析出。第二个晶化峰温度 T_{C2} 为 216°C , 此时材料内有 GeTe 晶体析出^[1]。当温度超过 T_g 点后, 材料内键链将进行调整, 键角将发生偏转, 从而结构将松动, 故 T_g 点后材料的结构有较大的变化。该材料的薄膜样品之 T_g , T_{C1} 和 T_{C2} 温度都比块状样品要低一些。

陈光华等人^[5]认为扩展态电导机理的温度范围分别是 162°C (块体) 与 182°C (薄膜) 到 227°C 之间。此温度范围已超过了 T_g , 也超过了 T_{C2} 。材料内有大量的 Te, GeTe 晶体析出, 发生了由非晶态到晶态间的转变, 已不是完整的非晶态结构。引用非晶态结构的扩展态电导机理是不妥当的。从 Owen^[6], Jones^[3], Arnoldussen^[7] 等人发表的资料来看, 该材料的电性研究, 其温度范围都是在 T_g 点以下。

我们从 T_g 点以下第一个 $\ln\sigma$ 与 $1/T$ 成直线的温区获得该材料之电导激活能为 0.4eV 。由此得到导带与价带两扩展态间的电能隙为 $0.88\text{eV}^{[8]}$ 。这与 Arnoldussen^[7] 等人从材料的光

参 考 文 献

- [1] M. D. Hull, Fast Response Photomultipliers, Application Book by N.V. Philips Gloeilampfabrieken, Elcoma Division, June 1971.
- [2] В. В. Матвеев, А. Д. Соколов, Фотоумножители в Сцинтилляционных Счетчиках, ГОСАТОМИЗДАТ, 1962.
- [3] J. M. Schonkeren, Photomultipliers, Application Book by N.V. Philips Gloeilampfabrieken, Elcoma Division, April 1970.
- [4] А. Г. 别尔可夫斯基等著, 徐正卜、陈成杰译, 真空光电器件, 原子能出版社, (1980)。

吸收数据中获得该扩展态的光能隙为 0.95eV 的结果相近。表明激活能为 0.44eV 的温区, 是扩展态电子输运机理, 而不是文献[5]中的“禁带定域态”的电导机理(按 Mott 模型概念, 在 T_g 点以下, 温度由高到低, $\ln\sigma$ 与 $1/T$ 的关系中第三个直线段是低温下费米能级附近的最近邻跃迁输运机理, 其电导激活能是很小的)。

文献[5]中的实验数据并不是严格的 $\sigma \propto T^{-1/4}$ 关系。变程跃迁的电导机理不能仅由 $\sigma \propto T^{-1/4}$ 的关系来判定。这种电导只有在极低温下(低于 $10-15\text{K}$)才可能发生。温度较高, 能否发生变程跃迁, 值得讨论。

参 考 文 献

- [1] 杨涵美等, 硅酸盐学报, 8-3(1980), 270.
- [2] J. A. Savage, J. Non-Cryst. Solids, 11(1972), 121.
- [3] S. R. Jones et al., J. Non-Cryst. Solids, 28(1978), 1.
- [4] S. C. Moss et al., J. Non-Cryst. Solids, 8-10(1972), 45.
- [5] 陈光华等, 物理, 9-6(1980), 502.
- [6] A. E. Owen et al., J. Non-Cryst. Solids, 32(1979), 29.
- [7] T. C. Arnoldussen et al., J. Non-Cryst. Solids, 8-10(1972), 933.
- [8] 陈宗才等, 物理, 10-5(1981), 291.