

有关光电倍增管中的几个問題*

陆 經 王 大 成

摘 要

本文簡要敘述了射綫的探测技术对光电倍增管的各种要求,以及管子的基本参数与应用的关系,綜合了近年来文献中与此有关的光阴极、二次极和結構方面的工作情况。在阴极方面介紹了銻-鉍、銻-鉀-鈉-鉍光阴极和新的反射式銻-鉍光阴极。在二次极方面介紹了銻-鉍二次极和銀-鎂、鋁-鎂合金二次极等。在結構方面介紹了光阴极到第一个二次极区域的电子光学輸入部分的結構和二次发射倍增系統的結構。本文还初步討論了光阴极、二次极及管型結構方面的若干改进意見。

随着閃爍方法在物理实验技术中被广泛地采用,大大促进了光电倍增管的迅速发展,世界上許多国家都开展了这方面的研究工作,并且做出了各种各样的管子以滿足各种不同的需要。如航空测矿时需要大面积的光电倍增管,目前已能做到阴极的有效直径为 50 厘米以上^[1]。另一方面,由于某些需要又要求有小尺寸的光电倍增管,1956 年已有总外径为 19 毫米的十級光电倍增管出現^[1]。为了把閃爍方法用于研究原子核能譜測量,特別研究和制造了譜仪型光电倍增管,要求振幅分辨性能好。光电倍增管的振幅分辨率的值主要决定于它在閃爍体輻射的波长范围内的“单色灵敏度”或“量子輸出”——这决定于光阴极的材料和制造工艺。簡言之,即要求光阴极的灵敏度要高,其单位以微安/流明或毫微安/微瓦表之,并規定光源的色温度为 2848°K。其次,要求这个灵敏度在光阴极工作表面内均匀性好,这决定于蒸銻时蒸发器的放置位置、它的結構以及制造工艺(假如光阴极是銻-鉍型的話)。第三,光阴极上不同位置发射的光电子是否同样的可以到达倍增系統的第一个二次发射极,这决定于光阴极与二次发射极之間的电子光学配合。第四,电子流从一个二次极跑到下一个二次极上去时二次电子的搜集值,这决定于倍增系統的結構。第五,管子的工作稳定性,这主要决定于阴极和二次极的材料、制造工艺和結構的牢固性。对于 Cs¹³⁷ 丙种射綫照射 NaI(Tl) 所生熒光的振幅分辨率已做到 6.8%^[2]。在某些应用中需要光电倍增管的时间分辨性能好,这主要决定于管子的結構。在設計具有良好的时间分辨特性的光电倍增管时,把全管分成二部分来看待比較方便,第一,为从光阴极到第一个二次极区域的部分;第二为具有搜集器的倍加器部分。使时间分辨性能变坏的主要原因有二:1)从光阴极和二次极上不同的点出发到下一个极上去的电子的不同路径长度;2)发射出来的电子在渡越時間上的初速效应。因此,为了改善时间分辨性能就必须用电子光学办法来減輕由于路径不同而产生的渡越時間分散和保証光电倍增管内电子速度足够高以降低初速效应的影响。据文献上記載,光电倍增管的时间分辨率已做到几个微微秒^[3]。还有,在低能粒子的閃爍計数器中,由于光电子形成的訊号脉冲小,容易被暗脉冲干扰,所

* 1961 年 4 月 3 日收到。

以要求光电倍增管的信号噪声比值要大,这主要决定于阴极和二次极材料、管子结构、制造工艺和运用温度等。此外,还希望光电倍增管的增益高,输出电流大,这主要决定于二次极的材料、制造工艺及倍增系统的结构。从上所述可以看出,为了制造满足各种需要的光电倍增管,除了必须掌握一系列的工艺技术如玻璃加工、清洁处理、装架、真空蒸发、排气激活等外,还必须进行下列三方面的研究工作。世界各先进国家在这三方面已作了许多研究工作,我们只选择其中与射线探测较密切的部分作简略的介绍。

一、光阴极的研究

在闪烁计数器用的光电倍增管中,最常用的是具有 S-11 谱响应的半透明铯-铷光阴极,其典型积分灵敏度是 60 微安/流明(色温为 2870°K),最大绝对灵敏度在 4400 Å 为 48 毫微安/微瓦,这值相当于量子效率 14%。铯-铷阴极难得能有高于 90 微安/流明的积分灵敏度^[4]。

在 1955 年 7 月 Sommer 发表了一种多碱阴极^[5],这种新的光电阴极是从铯-铷光阴极出现以来最重要的发展。尽管它的制作复杂,需要轮流地用钾、钠、铯的蒸汽与已蒸上铯层的镍皮作用以激活阴极,但由于它性能上的优越,现在已被用到光电倍增管的生产中去了。图 1 表示一种典型的多碱阴极的光谱响应^[4],其积分灵敏度一般可为 150 微安/流明(最大可到 200 微安/流明)。图上是使用绝对标度表示,使之可与 S-11 光谱响应相比较。虽然其绝对响应在红区范围比任何已知的光阴极要高,但多碱阴极更有着为闪烁计数器所感兴趣的可见的高的蓝光灵敏度,例如在 4400 Å 处有典型的绝对灵敏度为 65 毫微安/微瓦,量子效率为 19%。由多碱光阴极的测量得知: 1) 高灵敏度首先由于红区造成。

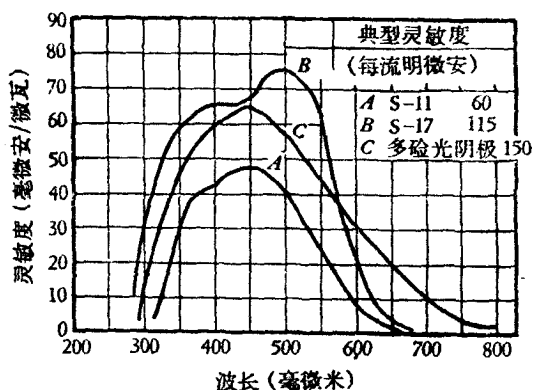


图 1 谱响应与 S-11 (铯铷光阴极) 的谱响应曲线的绝对值比较

图 1 还给出一种新型铯-铷光阴极 S-17 的光谱响应曲线。这种阴极与常用在闪烁计数器中的半透明式阴极不同,它是把铯-铷光阴极做在反射铝底层上,见图 2。光必须通过窗户落在玻壳背面的光阴极上,光透过薄的光阴极后被铝层反射回来,再次经过光阴极,这样“加倍露光”的结果,使量子效率大为改善。但因它不宜与晶体配合,所以这种光阴极只是在光可以直接照射的应用中才是重要的。

光电倍增管的暗电流的发生决定于很多因素,而最主要的原因之一是光电阴极的热

2) 化学分析表明钠与钾之最佳比率约为 2:1。 3) 红区灵敏度之提高并非对红光吸收率加大所造成。事实上,在红区内铯-钾-铷光阴极的吸收较铯-铷光阴极还小。 4) 铯-铷等单碱阴极通过氧化能提高其积分灵敏度,而多碱阴极则不行。

用能透过紫外线的玻璃制造的具有多碱光阴极的光电倍增管,能够应用于那些要求在光谱区域 2150 Å—8500 Å 的宽范围内灵敏同时积分灵敏度又高的场合。而用石英端面玻璃的半透明式铯-铷阴极还可使灵敏区引伸到 1800 Å。

发射。由于热电子象光电子一样被放大,因此有假脉冲输出。在大多数闪烁计数器的应用中,热发射的影响还不大,因为暗电流的脉冲输出比闪烁的脉冲小得多。然而在探测低能的乙种射线、丙种射线与伦琴射线时就成问题了,因为射线所造成的闪烁脉冲较小,甚至不易与暗脉冲分开,这就需要冷却光电倍增管以减少热脉冲数目。因此,非但单位时间内的脉冲数目是重要的,而且这数目随温度的变化也是重要的。多碱光阴极在室温下的热电流约为 10^{-16} 安培/厘米²,比铯-铷光阴极低十倍。图 3 表示二种光阴极的单位面积热发射与温度的关系曲线。

在低温下,半导体阴极的电阻变得很高,它使光阴极的“外观灵敏度”严重降低。在液态空气的温度下,具有 S-11 响应的铯-铷光阴极生成的阻力使之不可能有效地应用,而多碱光阴

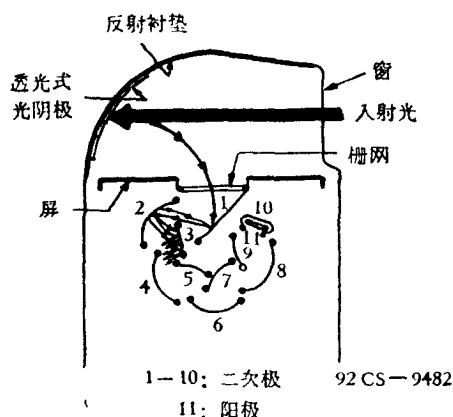


图 2 RCA-7029 型反射衬垫透光式阴极,二次极的安排示意图

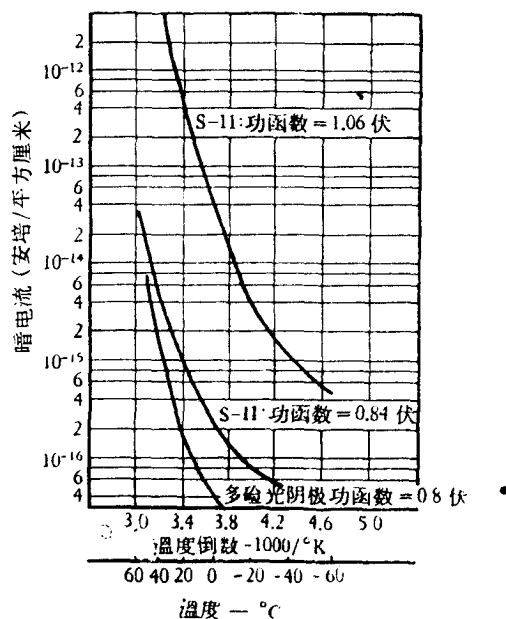


图 3 单位面积的热发射与温度倒数间关系。功函数是按理查逊定律自曲线上看出

极却在液态空气温度下还能应用。所以,这种多碱阴极可以有效地应用在低能粒子的闪烁计数器中。在温度的作用下,二种光阴极每单位面积的电阻表示在图 4 中。

制造工艺对光阴极的灵敏度、均匀度影响很大,要获得高的灵敏度和均匀度,必须特别注意管子各零件的真空卫生、半透明阴极的蒸镀厚度和速度的控制(厚度除影响灵敏度外,还影响谱特性及暗发射)、铯-铷或铯-钾-钠-铯结合的条件、氧化程度等等。

光阴极的灵敏度会随存放时间而有所降低或升高。还有“疲乏”效应,它和电流负荷有关,经过一段时间的强负荷工作以后,灵敏度有的降低,个别的有所升高。

除了上述三种光阴极外,还有铋-氧-银-铯阴极、银-氧-铯阴极及其它的铯-碱金属阴极(从锂到

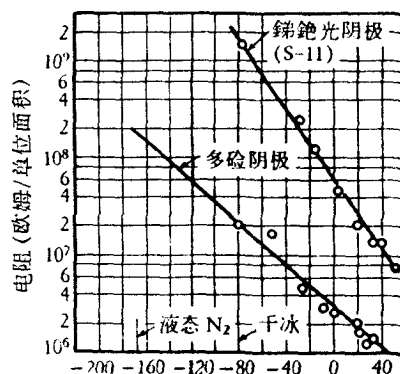


图 4 铯铷和多碱阴极单位面积电阻与温度间之函数关系。冷至液氮温度时多碱阴极的低得多的阻抗不会因静电效应损失灵敏度

铯随着原子量的增长,量子效率与红界俱增)等。这里不再一一详述。

光阴极的研究方向是根据应用上所提出的要求:1)灵敏度高;2)均匀度好;3)谱特性与磷光体的闪烁谱相符合;4)暗发射小;5)低温性能好;6)直接用射线照射能发射光电子而且有足够的灵敏度等,进一步研究光阴极材料及制造工艺。

二、二次极的研究

在研究铯-铍光阴极特性的同时,研究了它的二次发射特性。由于其制造方法简单以及热发射较小,它被大量地采用在光电倍增管中作为二次极材料。目前,最常用的材料还有铝-镁、铜-镁、银-镁、铜-铍等合金材料,但是以铯-铍的二次发射系数为最大,这种材料对适当的温度提高并不灵敏,但有疲乏效应。按 Marschall、Coltman 和 Hunter 对 RCA-1P21 型管所给数据,工作两小时后,对初电流 10 微安的负荷约降低 50%,100 微安的约降低 70%,1 毫安的约降低 88%。

把光电倍增管放在黑暗中“休息”,它可以恢复原来的放大率。当电子轰击的时候,铯-铍层被明显地破坏,休息一定时间后它又恢复起来。由此可以了解光电倍增管最后的几级因为有大电流负载,特别易于疲乏。这也指出了我们一定不能拘于文献中所给有关最大许可负载值,因为这些数值强烈地依赖于光电倍增管的结构、制造和历史情况。由此也可以了解到各个作者所得数据有很大不同的原因。对于各种情况都应该对容许负载作精确的探讨,一般说来,电流小于 0.1 微安时不会有疲乏现象。和铯-铍光阴极一样,制造工艺对铯-铍二次极的二次发射系数 δ 及稳定性影响很大。

人们早已知道,镁的化合物特别是氧化镁具有很大的二次发射系数。不少研究工作者分别以银、铜、金、铝为基底,研究了各种镁合金,最佳结果是用银镁合金。一般说来,镁的含量不超过 6%。Rappaport 利用含镁 1.7% 的银-镁合金在激活后能得到很高的 δ 值。这个结果可以这样来理解:氧气可以在加热的银中很好地扩散,而非常少量的镁对氧在银中的扩散速度没有多大影响。镁本身在银中扩散时速度很小 MgO 和 H_2O 分子的扩散速度由于其较大的直径而可以忽略不计。当合金在氧气中加热时,氧将很快地扩散到内部去,比镁快得多,在内部将与每个遇到的镁原子化合,这样生成的 MgO 分子是“凝固”在生成位置上的,并且在合金的表面并不形成厚的 MgO 层。这种研究指出:即使所有镁原子被氧化,仍得不到可用的 δ 值。另一方面,当合金在无氧而含少量的水蒸汽的气体中加热时,可以得到另一种情况:因为水分子并不钻到合金内部去,它们只与扩散到表面层的镁形成 MgO 表层(大约 1250 Å 厚),这一层具有较高的 δ 。应该提到,虽然内部存在有大量非氧化的镁,但是在加热到 755°C,15 秒钟后就大部分蒸发掉了。当用此法制得的材料在高温时作为二次极,由于镁的蒸发,可能使引线间的绝缘遭到破坏。这种不希望有的现象可以通过把这种材料于氧气中加热以避免之(5 分钟,700°C,在氧气压力为 760 毫米汞柱时)。氧气钻过氧化镁表层将合金内部存在的多余镁原子化合了,所以当过热时,电极间镁层的形成就不再可能了。

近期被应用的一种铝镁合金,它含有 1—3% 的镁,其它铁、铜、锰、锌、铅的总量不超过 0.5%,在冲制成二次发射极后,其表面应以纯净的钢玉砂擦光,再用汽油、四氯化碳、蒸馏水等洗净,绝不能用化学方法处理。然后装到光电倍增管中去,在光电倍增管制造的去

气过程中,連續反复地在压力为 0.25 ± 0.05 毫米汞柱的氧气中加热到 400°C , 每次为 15 分钟, 共进行三次, 結果可得到 300 电子伏时, $\delta = 4$.

用铯做光电阴极时, 铯也可大大提高二次发射系数. 例如銀-鎂合金氧化后再經過絕处理, 得到的二次发射系数在 75 电子伏时, $\delta = 5$.

合金二次极的工作稳定性較好, 所以常用在譜仪型的光电倍增管中.

在多碱阴极发现后, 也就发现了它的二次发射特性. 目前, 銻-鉀-鈉-鉍层已用在光电倍增管中作为二次发射体.

倍加器中用的二次极材料还有很多, 如銅-鍍合金, 鋁-鍍合金等, 其性能和激活工艺等可参考文献[7].

对于二次极的材料及其制造工艺, 还需要作进一步的研究, 以期达到下列目的: 1) 在較低的一次电子能量下的二次发射系数大; 2) 疲乏效应小, 稳定性好; 3) 暗发射小; 4) 容許負載电流大等等.

三、結構的研究

从光阴极到第一个二次极区域的电子光学輸入部分的結構对管子的振幅分辨率和时间分辨率有很大的影响, 这部分的設計現在已經有了一系列的改进. 例如有些設計采用外平内曲的阴极面, 并在輸入端应用了附加的电子透鏡; 調节其电位以得到光电子搜集之均匀性, 并同时得到严格的飞越時間等时性. 有些設計为了得到好的搜集率, 选择了容易与光阴极配合的匣子型二次极系統. 还有些非端面阴极的管子用第一級鍍衬垫上的銻-鉍层作为光阴极, 这样, 这部分的結構就成为倍加器系統的一部分了. 总之, 二次发射倍加器系統現在已有許多种形式, 大体上可分为以下几类^[9]:

1. 具有聚焦电极的倍加器: 常用的管子如 $\Phi 3Y-19$ 、 $\Phi 3Y-24$ 、H 4646、931A 等都属于这一类, 电极形状有瓦片形的、匣子形的等, 排列形式有直綫排列的、环形排列的等, 对于工业生产, 加工比較容易. $\Phi 3Y-33$ 在瓦片形电极前带有加速栅, 这样, 可以减小初速效应和空間电荷效应, 提高時間分辨和輸出电流. 图 5 是一种做成同軸綫型的管型結構^[6], 它是由八組分开的光阴极放置成圓柱形結構, 每組有一个五級或六級倍增系統

的二次极把电子聚焦到一个中心同軸的收集輸出极上, 并直接匹配到一根同軸綫上, 每一組的同一級二次极由連接环連在一起, 这样, 就可給出从光阴极到收集极的有用的八个平行电流道. 这种管型的优点是可以得到高电流窄脉冲輸出, 不需要任何放大器就可用同軸綫直接接到示波器上. 近来, 美国 RCA 實驗室設計了一种中心电极的倍加器(見图 6)^[3], 它的每一个二次极之間的电压是 200 伏,

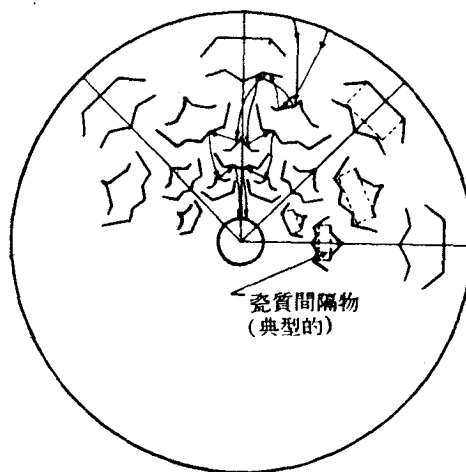


图 5 二次极形状及电子軌跡图, 搜集結構做成 50 欧同軸綫型, 阳极屏蔽在外端以同軸电容器与同軸電綫的外导体相耦合

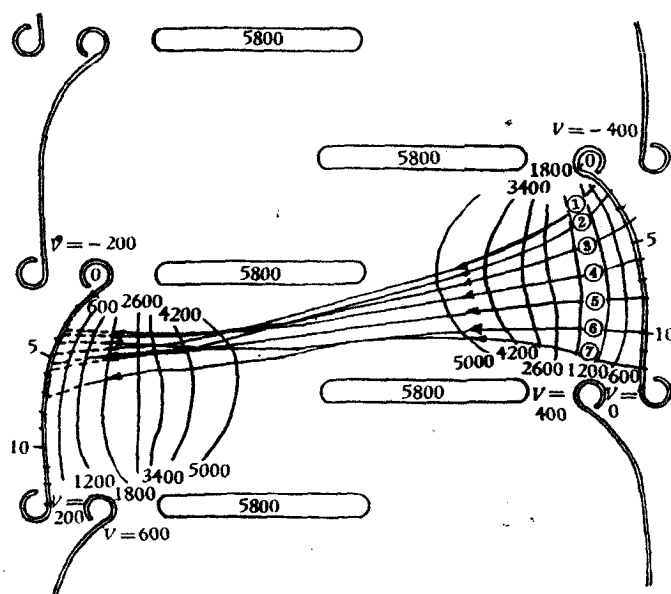


图6 中心电极倍加器结构

但是在中央电极系统上加很高的电位,用来加速电子离开二次极。这些电子在大部分渡越路程上保持高速度,并当接近下一个二次极时迅速减速。这个结构使时间分散减小,而二次发射系数仍较好。它和特殊的输出结构在一起可以得到几个微微秒的时间分辨率。

2. 具有栅网的倍加器:如 $\Phi\Delta Y-B\Delta H-1$, $\Phi\Delta Y-B\Delta H-2$ 等,有两大特点:第一,倍加器的工作容积内没有任何用绝缘材料做的零件,故工作稳定性好;第二,有位于高正电位下的网提高二次发射极表面处的电位梯度,因此二次发射的有效值大,时间分散小,时间分辨率高^[8]。

3. 穿透作用的倍加器:结构简单,曾被相当广泛地推广,如 $\Phi\Delta Y-12$ 、EMI 的大量产品等。其二次极具有密网或百叶窗的形状,这种形式的倍加器时间分散较大,时间分辨率差。最近有一种新型的透射式快速电子倍加管已被研究出来了(见图7)^[9],利用短的火光闪光作为试验的脉冲,研究者对七级的电子倍加器测量指出:脉冲经过七个级的总时间之和为 $(3 \pm 1) \times 10^{-9}$ 秒,其输出脉冲的上升时间为 1×10^{-9} 秒。根据他们所指出来的

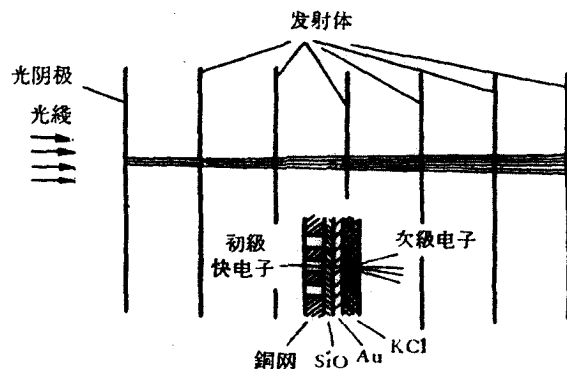


图7 七级透射式电子倍加管示意图

一系列技术上的原因,后面一个数字只是电子飞过整个倍增系统的時間的实际分散的上限,按計算,这个数值为 10^{-11} 秒的量級。分辨时间为 10^{-11} 秒的电子倍增器已制造成功。

这种新型透射式电子倍增器的每个发射体的厚度为 $\sim 5 \times 10^{-6}$ 厘米,它是由三个薄片和保証机械牢固的銅网所組成,网子的每厘米长内有40到80孔,其透射度为50%,在网上先涂以約 $100 \text{ \AA}$ 的氧化硅(SiO)的鋪垫物,然后涂上厚 $300 \text{ \AA}$ 到 $600 \text{ \AA}$ 的氯化鉀层作为二次发射体。初步的实驗指出,在氯化鉀层中,次級电子的扩散长度是 $2300 \pm 600 \text{ \AA}$ 。这就意味着:在上述厚度的氯化鉀层里,次級电子能够从該层的任意深处射出。而在鋪垫物与发射体之間,有一层厚为 $20 \text{ \AA}$ 的金属,其作用在于使初电子在其中受到了散射,結果,这些电子进入氯化鉀层的角度增大了,也就是說在这层里他們走的路程增长了,因此提高了二次发射系数。

从整个結構角度看,要求:1)提高各处电子搜集率的均匀性和引导系数。2)电子从一級到下一級的軌迹應該是越走越集中。3)电子渡越时差的減小。4)在便于光阴极和二次极制造的条件下,使結構精巧、紧密。5)輸出結構适合于高频傳輸的特点等要求。

以上是管子結構本質性改进的問題。另外,結構設計上还有些要考虑的問題:1)如果利用鉀处理电极,那么引綫間漏电路程要尽量加长。2)提高电压可以提高輸出电流和時間分辨能力,而提高电压要求电极有适当形状。3)尽量避免絕緣体靠近电子运动路径,这样可以使管子的工作稳定性好。

与应用密切有关的,还应注意做好下述工作:1)制做适合于最佳放大倍数和最佳分辨率等特別目的的插入式分压器。2)制做固定在管上的电、磁、光屏蔽筒。3)与晶体固定在一起。4)便于冷却应用的結構。

最后,作者对关心本文并給予指导和帮助的同同志表示深切的謝意。

参 考 文 献

- [1] Gerhard R. Linden, Recent developments in multiplier phototubes, *IRE Trans. on Nuclear Science*, **NS-3**, No. 4, 1956, 33—35.
- [2] C. J. Borkowski & R. L. Clark: Gamma-ray energy resolution with NaI-Tl scintillation spectrometer. *Rev. Sci. Instr.* **24**, No. 11, 1953, 1046—1050.
- [3] G. A. Morton; R. M. Matheson & M. H. Greenblatt: Design of photomultipliers for the sub-millisecond region, *IRE Trans. on Nuclear Science*, **NS-5**, No. 3, 1958, 98—104.
- [4] R. W. Engstrom; R. G. Stondenheimer; H. L. Palmer & D. A. Bly: Recent work on photoemission and dark emission problems. *IRE Trans. on Nuclear Science*, **NS-5**, No. 3, 1958, 120—121.
- [5] A. H. Sommer: New photosensitive cathode of high sensitivity. *Rev. Sci. Instr.* **26**, No. 7, 1955, 725—6.
- [6] N. W. Glass. & P. Rudnick: A high current coaxial photomultiplier. *IRE Trans. on Nuclear Science*, **NS-5**, No. 3, 1958, 124—127.
- [7] В. С. Кульварская: Вторично-Электронная эмиссия сплавов, *Радиотехника и электроника* No. 4, 1956, 512.
- [8] Н. О. Чечик, С. М. Файнштейн и Т. М. Лифшиц: Электронные умножители. Гостекиздат. Москва (1957), стр. 125—145.
- [9] 透射式快速电子倍增管, 原子能, 第2卷, 第1期, 1957, 167—168 頁。(威爾丁豪斯公司實驗室技术文献的綜合报导)

SOME PROBLEMS OF PHOTO-MULTIPLIER TUBES

LU KING, WANG TA-CHENG

ABSTRACT

This paper describes the fundamental problems of different types of photo-multiplier tubes for scintillation techniques, the relation between parameters of the multiplier-photo-tubes and their application. The status of photo-cathodes, secondary emissive surfaces and the structures of photo-multipliers in recent years are combined. It introduces Sb-Cs, Sb-K-Na-Cs photo-cathodes and the reflective substrate semitransparent photo-cathode, also the secondary emission of Sb-Cs, Ag-Mg and Al-Mg dynodes. The structure between the photocathode and the first dynode, the system of dynodes are also introduced. The latter part of this paper describes improvements for photo-cathode, dynode and the multiplier structure.