

高等学校教学用书

光 电 器 件

GUANGDIAN QIJIAN

沈 塘 和 編

人 民 教 育 出 版 社

高等学校教学用



光 电 器 件

GUANGDIAN QIJIAN

沈 塘 和 编

人 民 教 育 出 版 社

光 电 器 件

沈 塘 和 編

人民教育出版社出版

高中学校教学用各册编辑
北京宣武门内大街恩寺胡同

(北京市书刊出版业营业许可出字第2号)

人 民 教 育 印 刷 厂 印 装

新 华 书 店 科 技 发 行 所 发 行

各 地 新 华 书 店 經 售

统一书号 32010·1043 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 4 $\frac{1}{16}$

字数 161,000 印数 9001—4,000 定价 (5) 0.42

1961年9月第1版 1961年9月北京第1次印刷

目 录

第一章 光电阴极	1
§ 1.1 氧铯光电阴极	4
§ 1.2 铯铯光电阴极	8
§ 1.3 铯铯光电阴极	11
§ 1.4 多碱光电阴极	11
第二章 光电管	15
§ 2.1 光电管的类型和结构	15
§ 2.2 光电管的制造工艺	20
1) 材料的选择和备置	21
2) 高真空的获得和光电管的去气过程	22
3) 用真空蒸镀法制作氧铯阴极工艺	24
4) 在金属片上的氧铯阴极制造工艺	27
5) 用化学涂银法在玻壳上做金属底层和氧铯阴极制造工艺	31
6) 铯铯阴极的制造工艺	34
7) 半透明多碱阴极的制造工艺	36
§ 2.3 真空光电管的特性和参量	37
§ 2.4 充气光电管的特点	44
第三章 光电倍增管	54
§ 3.1 二次电子发射体	60
§ 3.2 光电倍增管的工作原理	71
§ 3.3 光电倍增管的类型和结构	76
§ 3.4 光电倍增管的特性和参量	89
第四章 光敏电阻和光伏电池	112
§ 4.1 光敏电阻的结构工艺及其主要类型	113
§ 4.2 光敏电阻的特性和参量	115
§ 4.3 光伏电池的工作原理、特性和结构工艺	124

第一章 光电阴极

现代的光电器件种类很多，但是所有这些光电器件都是建立在一系列技术物理基础上，即光电效应、二次电子发射和电子光学。

当光线(包括不可见光线)作用到物体表面时，根据所产生光电现象的不同，光电效应可以分为三类：在光线作用下能使电子从物体表面逸出的称为外光电效应或者光电发射；能使物体电阻值改变的称为内光电效应或者光电导效应；而能够产生一定方向电动势的称为阻挡层光电效应或者光伏效应。

在光电器件中，真空光电管、充气光电管、光电倍增管和为数很多的特种光电器件都是应用外光电效应。这种在光线作用下产生光电发射的物体表面通常称做光电阴极。

在讨论具体的各种光电阴极以前，我们先简略地复习一下光电发射所遵从的基本定律：

1) 当入射光线的频谱成分不变时(同一波长的单色光或者相同频谱的光线)，光电阴极的饱和光电发射电流 I 与被阴极吸收的入射光线光通量 ϕ 成正比： $I = \gamma \phi$ 。(1.1)

γ 是表征光电发射灵敏度的系数(对于一定频谱的光线而言)。

此定律通称斯托列托夫定律。

2) 光电子的最大动能与光的强度无关，随入射光线频率的提高而线性增加

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = h\nu - e\phi_0 \quad (1.2)$$

v 表示光电子速度， ν 表示入射光线频率， $e\phi_0$ 表示光电阴极的逸出功。

此定律通称为爱因斯坦定律。

根据光的量子理论可以很容易地解释上述两个定律。实际上，物体在光

射线作用时,物体中的电子吸取了光线的能量,就有足够的动能克服金属边界位壁的作用而逃出界外,同时根据爱因斯坦的假设:每个光电子的逃出都是由于吸取了一个光子能量的结果;而且一个光子的全部能量 $h\nu$ 都由辐射能转变成光电子的能量。因此,光线愈强,也就是作用于阴极表面的光子数愈大,当然会有较多的电子有可能从阴极逃出。

同时,入射光线的频率愈高,也就是说,每个光量子的能量愈大,金属中处于最高能级的电子在取得这个能量并克服位壁镜像力作用逃出界面后,自然具有较大的动能。

从以上的理论出发还可以得出:

3) 在入射光线频谱范围内,存在着临界波长。当光波波长等于这临界波长时,光电子刚刚能从阴极逃出。这个波长通常称为“红限”。很明显,在红限时,光电子的初速应该为零,因此:

$$h\nu_0 = e\varphi,$$

即临界频率

$$\nu_0 = \frac{e\varphi}{h},$$

临界波长

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{ch}{e\varphi}. \quad (1.3)$$

这里 c 表示光速。

严格地说,以上讨论只在温度为绝对零度时,才是正确的。因为随着温度的增加,阴极内电子的能量亦将提高,而有可能在原来的红限以下即已逃出。但是在实际上,由于温度提高时,这种具有很大能量的电子数目很少。在室温场合实测光电发射时,因受仪器灵敏度的限制,爱因斯坦定律和红限的结论,对大多数金属仍是正确的。

这里还应该指出光电发射的一个重要特点,这就是光电发射的瞬时性。实验证明:光电发射的延迟时间 τ 不超过 3×10^{-9} 秒的数量级。因此,实际上可以认为光电发射是无惯性的。光电发射瞬时性的原因,是它不牵涉到电子在原子内迁移到亚稳能级的物理过程。

为了表征光电阴极的性质,通常采用下面几种概念:频谱灵敏度、频谱特性、积分灵敏度和量子输出。在正式讨论光电阴极以前,我们有必要简单地说明一下这几种不同的概念。

頻譜灵敏度是某确定波长的单位辐射功率投射到阴极表面时所产生的光电流, 它的单位是安倍/瓦特。

如果已经知道阴极的頻譜灵敏度, 当用一定頻譜分布的光源照射阴极时, 就得出入射光线頻譜範圍内波长(或者頻率)与光电流之間的关系曲线, 这根曲线称为阴极的頻譜特性。

由于实验量測頻譜灵敏度比較困难, 它需要能分解出不同頻率光线的单色光源, 而且要有量測微弱光电流的高灵敏度檢流計。除此以外, 还有更重要的因素, 就是实际上光电管和特种光电器件大都用在具有連續頻譜光线的场合, 如白熾灯光(有声电影中)和自然光(电视中), 而不是用的单色光。同时, 光线的强度, 通常也不是用辐射的能量表示, 而是用肉眼視觉能力来衡量。因此为了实用的目的, 常常采用积分灵敏度或称总的灵敏度, 它表示阴极在一定的光源照射下, 每单位光通量所产生的饱和光电流。它的单位为微安/流明。应该強調說明的是这里所指的一定的光源非常重要, 因为对于同样光电阴极, 即使照射的光通量一定, 但如果光源辐射頻譜改变, 光电流数值亦将改变。在苏联是用 100 瓦鎢絲的充气白熾灯做为光度测量的标准光源(相当于色温 $T_s = 2848^\circ\text{K}$)。这里也可以看出, 采用积分灵敏度以后, 量測起来也簡便得多。

为了表示頻譜灵敏度的绝对值, 通常还采用量子輸出的概念, 它表示在某一特定頻譜区, 阴极发射的光电子数目与阴极吸收的光量子数目的比值。

下面我们就正式討論光电阴极。

光电阴极可以大致分为三类:

1) 純淨的金属表面: 以上的討論都是对它而言。

2) 在金属表面吸附一薄层其他元素原子: 特别是当吸附有气体时, 即使气体数量很少, 也足以使金属的光电性質大为改变。經仔細研究得知, 金属光电性質的改变是由于逸出功变化所引起。当吸附有正电性的原子时(例如碱金属原子)就降低了逸出功而使光电发射增加, 而当吸附有負电性的原子时(例如氧、卤素)就增加了逸出功而使光电发射减少。此外, 由于光线长时间的照射或者加热等等原因, 表面吸附的原子, 也常常蒸发和扩散, 亦即吸附在表面的原子数目, 不可能保持严格不变, 这就引起光电灵敏度經常

发生变化,即产生衰老现象。

以上两种光电阴极,由于在可见光区域的灵敏度很低,一般已不采用,只有在紫外线区域,这时它们的灵敏度才较高,因此还有应用。

3) 复杂阴极:它和第二类光电阴极不同,能够降低金属逸出功的原子层不是直接附着在金属底层上,而是隔有一中间层(不透明光电阴极)。在某些情况下,由于中间层的面电导较大,电子可以在中间层上移动,这时金属底层就不再需要(半透明光电阴极)。

复杂光电阴极在可见光,甚至在近紫外和近红外频谱区,都可以有较高的灵敏度。因此在光电管中运用非常广泛。

复杂光电阴极的种类很多,但其中最典型的、同时也是最重要的,要算氧铯阴极和铯铯阴极。此外,铯铯阴极和多碱阴极也因各具特色,在近年来,运用愈益广泛。下面我们就对这些复杂阴极的结构、频谱特性和发射机理,逐一加以论述。而制造阴极的详细工艺过程,以及阴极的其他特性,则在光电管一章中谈到。

§ 1.1 氧铯光电阴极

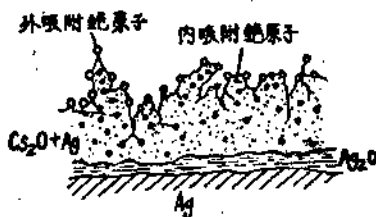


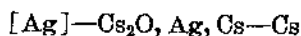
图 1.1 在银底层上的氧铯阴极结构示意图。

首先介绍一下,在银底层上形成的氧铯光电阴极的结构(图 1.1)。先将银层氧化,使氧化银层厚度为 100 到 200 分子层(在一平方厘米阴极表面上,含氧 2 到 4 微克)。而后,在铯蒸汽中将氧

化银还原,这样,就在粗糙的阴极表面上吸附一层铯的原子,其厚度约为一个单原子层。这层铯原子可以保证阴极的逸出功较小,从而有高的光电灵敏度。

中间层具有半导体性能，它除包含氧化铯和被铯还原的小银粒以外，通常还有内吸附的铯原子，在阴极深处还有未被铯还原的氧化银（在某些阴极制造过程，也可以做到使氧化银层完全没有）。在某些情况下，为了进一步提高阴极灵敏度，在已经成形的阴极表面上，再蒸上一层少量的重金属（如银或者镍），这层金属原子在阴极再次加温处理时，就扩散到阴极内部。由于银原子深入中间层，就提高了阴极的导电率，因而消除了阴极表面产生局部电荷的可能，增大了阴极工作表面，从而光电发射增加。

上述氧铯阴极的结构（不考虑在成形的阴极表面上再次蒸银），根据吉·布尔的建议，可以用下面的符号表示：



这里，在方括号中的化学符号表示底层金属，在第一划以后的表示在半导体中间层所包含的主要化学成分，在第二划以后的表示吸附在阴极表面的金属原子。

在制造半透明的氧铯阴极时，由于银层在整个厚度内都被氧化，这时，阴极就是在光电管玻璃壁上直接附有一层半导体，而半导体层表面又吸附着铯的原子。

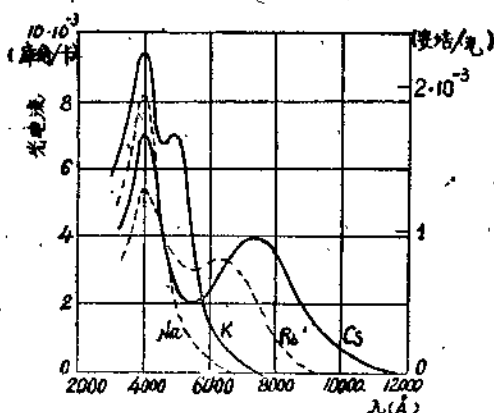


图 1.2 几种碱金属的复杂阴极光谱特性。

氧铯阴极的逸出功比所有其他光电阴极都小。而且它的数值亦即阴极的灵敏度与制造阴极的具体工艺过程关系很大。根据实验量测,氧铯阴极的最大红限为 $17000\text{\AA}$, 这样,就确定它的最小逸出功约为 0.72 电子伏特。

氧铯阴极灵敏度的频谱特性表示在图 1.2。它在近红外线区 ($7500\text{\AA}$ 到 $8000\text{\AA}$) 有一最大值,而在紫外线区则有几个最大值(在图 1.2 中仅表示出它的一个最大值)。

由于氧铯阴极在可见光和红外线频谱区有高的灵敏度。因此,广泛地用在光电管和特种光电器件(如变象管和红外线摄像管如 JH-1 、 JH-13)中,尤其是用在红外线区域,它更有着十分独特的优点。

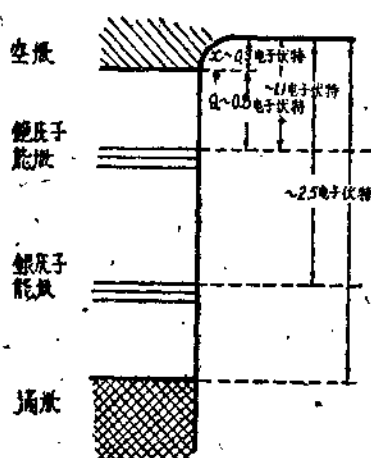


图 1.3 氧铯阴极能级图。

对于氧铯阴极灵敏度的频谱特性的解释,现在还没有完全肯定的结论,但是根据很多实验数据中影响频谱特性的主要因素,可以大致定出氧铯阴极的能级图(图 1.3)。

用能级图可以定性地解释频谱特性。

氧铯阴极的中间层是由氧化铯和吸附的金属原子组成,因此在能级图上,除了表示出氧化铯的满带和空带以外,还表示了杂质能级。根据激发光子能量的不同,光电子的发射可以由氧化铯的满带产生,也可以由铯原子或者银原子的杂质能级产生。

根据克鲁格的实验结果:当氧铯阴极的银底层用其他金属(铜、镍、钨)代替时,频谱特性的第一个短波最大值的位置变化很大,而这时长波最大值的位置则几乎不变。另外,他又用其他碱金属(铷、铯、钠)代替铯而保持银底层不变。这时,长波最大值位置

在移动,而短波最大值位置則保持不变。最后,他还在上述各种已做好的阴极上送进少量的氧气,使吸附在阴极表面上的碱金属原子氧化。这时长波最大值很快消失,而短波最大值略有降低。

从以上实验自然可以得出:在长波最大值区域的光电发射,主要决定于碱金属能级,而第一个短波最大值的光电发射,则决定于底层金属能级。事实上,也正是根据这些,我們才得出氧铯阴极的能级图。

虽然由上述实验数据所得出的能级图,能够用来一般地解释频谱特性的主要特点和氧铯阴极的光电发射机构。但是根据馬洛卓夫和布特斯拉夫的实验:他們保持制造氧铯阴极的工艺过程不变,但是使中間层具有不同的厚度,发现频谱特性长波最大值的位置,随着中間层厚度的减小而向短波方向偏移。而且,对于半透明阴极,光线从阴极前面和后面(即从光电管窗孔一面和从涂复阴极的玻璃一面)照射时,频谱特性也不相同。这些都說明频谱特性还受阴极本身光学性能(吸收系数和反射系数)的影响。

另外对前述克鲁格实验中最后部分,我們可以用金属表面吸附其他元素原子的概念来解释:由于阴极表面吸附的铯原子的氧化,使得阴极的逸出功急剧增加,因而导致光电灵敏度的降低。

綜合以上所述,可以把氧铯阴极的光电发射机构和频谱特性总结如下:

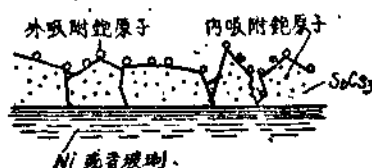
氧铯阴极光电灵敏度的频谱特性曲线,可以用相应的能级图来解释。其长波最大值是由于电子从碱金属的杂质能级所产生。近紫外光区的最大值则是电子从底层金属的能级所产生。阴极的光学性能,又使它吸收光线的频谱分布改变,因此,当阴极厚度改变时,长波最大值的位置在寬闊的范围内变化。而吸附在阴极表面的铯原子,又确定了阴极的逸出功(紅限)。但是由这层铯原子本身光电离所产生的光电流,对整个阴极的光电发射不起主要作

用。

最后,我們在这里說明一下,复杂阴极比較純金属阴极,或者吸附有碱金属原子的金属阴极灵敏度要高的原因,亦即解釋通称的“容积过程”所起的作用。在金属中,由于傳导电子的濃度大,光电子剛向金属表面移动,就很快受到阻遏。因此,有較大可能逸出金属的已电离光电子,它們在金属中的平均深度仅不过几十埃。而在半导体中,因为傳导电子的濃度小,它們与光电子的碰撞作用減弱,这样,光电子就有可能从比較深处逸出,因而灵敏度較高。

§ 1.2 銻銫光电阴极

当碱金属(特别是銫)与某些导电性能較差的金属(例如銻、銻、銻、鉛)之一相作用时,也可以得到光敏性的阴极,而銻銫阴极就是其中最重要的一种。



銻銫阴极的结构大致是这样的(图 1.4)。先在玻壳或者金属(例如鍍皮)表面沉积一层不透明

图 1.4 銻銫阴极结构示意图。

金属銻,其厚度約为 $1500\text{\AA}$,然后

在銫蒸汽中加热銻层,就形成具有半导体性質、表面松軟的化合物 SbCs_3 (除 SbCs_3 外,可能还包含有性質相近的 Sb_2Cs_5 和 Sb_2Cs_7)。在半导体层表面吸附着降低阴极逸出功的銫原子。在半导体层内部,也和氧銫阴极一样,包含有内吸附銫原子。銻层經過銫蒸汽处理以后,阴极的导电率急剧下降。同时光学性能也发生变化,阴极变成半透明,对着光綫(光源和眼睛在阴极两侧)观察时为紅色而反着光綫(光源和眼睛在阴极同侧)时为綠色。

根据吉·布尔的建議,銻銫阴极的结构可以用下述的符号表示(金属底层和玻壳分別用 M 和 G 表示):

$$\left[\frac{M}{G}\right] - \text{Sb}_n\text{Cs}_m, \text{Cs}-\text{Cs}$$

这里 n 可以取为 1, 3, 而 m 取为 3, 5, 7。化合物 Sb_3Cs_5 只在较高的温度下 ($+90^\circ\text{C}$) 才稳定。

除了上面所讲的銻銻阴极的制作方法以外, 也可以用第二种方法: 即在底层上先涂以碱金属层, 而后再在上面蒸上一层金属銻。为了得到厚的中间层, 还可以采用第三种方法, 实际上它是第一第二两种方法的结合, 这时銻和銻交互蒸散, 这样可以准确地控制剂量, 从而保证得到高灵敏度的光电阴极。

銻銻阴极典型的频谱特性, 用实线表示在图 1.5 中。

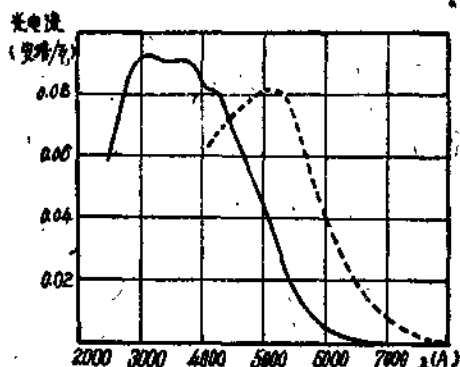


图 1.5 銻銻阴极频谱特性(实线为未氧气敏化的; 虚线为氧气敏化后的)。

从图上可以看出: 銻銻阴极在可见光的短波部分和近紫外区(波长从 $3000\text{\AA}$ 到 $4200\text{\AA}$) 有最大的灵敏度。如以量子输出形式表示, 它达到 $1/3$ 到 $1/4$ 电子/量子。阴极的红限在 $7000\text{\AA}$ 附近。在紫外区频谱曲线的下降, 并非由于阴极灵敏度的降低, 而是由于光电管玻壳透过率下降所引起。

如果在室温情况下, 给做好的銻銻阴极送入少量氧气(或者硫、硒), 则它的灵敏度可以提高几倍, 这时, 整个频谱曲线向长波

方面移动(如图 1.5 中虚线所示),而且红限可以达到 $9000\text{\AA}$ 。

根据在玻壁上涂复不同厚度(做成楔形)铯铯阴极进行光学测量的结果,发现随着阴极厚度的增加,阴极对光的吸收能力按指数关系上升,同时光电流也按指数关系增加。从这个实验可以看出,铯铯阴极和氧铯阴极一样,具有深层发射的能力,亦即具有容积性质。因为这不可能用阴极表面吸附铯原子的原因来解释。表面吸附的铯原子只能影响红限的位置。

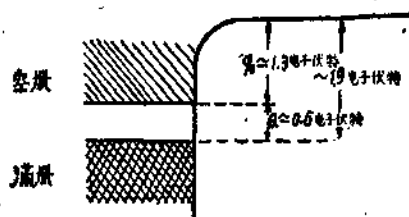


图 1.6 铯铯阴极能级图。

铯铯阴极的能级图可以用和氧铯阴极类似的方法得出(图 1.6)。这时,它由半导体 SbCs_2 的能级图表示,频谱特性从 $4500\text{\AA}$ 到 $5000\text{\AA}$ 的范围开始一直伸展到紫外线的广阔区域内,都有很高的灵敏度。这可以解释为半导体在较宽的满带产生光电发射所引起,而在 $5000\text{\AA}$ 到 $6500\text{\AA}$ 区域光电流不断增加这一事实,可能与满带刚刚开始光电发射有关。应该说明一点,这里画出的铯铯阴极能级图,还不能认为是最后的结论。因为根据实验证明,当减少内吸附的铯原子(这可以由分析铯铯层导电率随温度变化的关系来推断)时,可见光区域光敏性急剧下降,也就是说,内吸附铯原子的杂质能级对光电发射影响也很大。

铯铯阴极的灵敏度之所以很高,与深层产生电离的光电子在向表面移动时的自由行程较长有很大关系,这点与氧铯阴极的情况一样。但是除此以外,铯铯阴极还有对紫光和紫外线很强的吸收能力,就使得它比氧铯阴极有更高的量子输出。

铯铯阴极(特别是被氧敏化了的)在可见光区灵敏度很高,因此在光电管和光电倍增管中应用极为广泛。另外,它在摄像管和

某些研究紫外线的光电管中也有应用。

§1.3 铯铷光电阴极

如果把铯铷阴极中的铯代以性质相近的金属铷就得到铯铷阴极。它的结构和制造工艺均与铯铷阴极略同，频谱特性也十分相似。

这种铯铷阴极涂在玻壳上做成半透明的。这半透明层实际上是电阻很大的半导体，它的灵敏度比铯铷阴极略小，其频谱特性表示在图 1.7 中。当将做好的阴极给氧(或者硫蒸汽)敏化后，可使频谱曲线向长波方向移动，同时灵敏度也提高几倍。

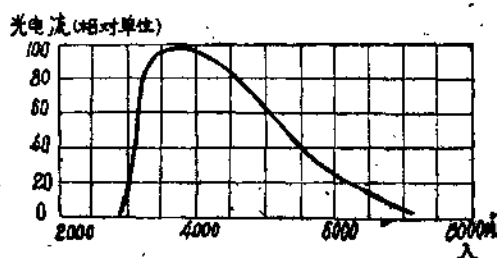


图 1.7 铯铷阴极的频谱特性。

如果在玻壳上蒸上铯以后，首先进行氧化，然后蒸银和在银蒸汽中还原，即得到铯氧银铷阴极。这种阴极灵敏度较高，而且它有最大的特点是灵敏度的频谱特性与人的肉眼视觉频谱特性极为相近(即由图象颜色不同所产生的明暗差别与肉眼感觉相同)，因此它在摄像管中得到应用。

§1.4 多碱光电阴极

不久以前，出现了含有铯和几种碱金属的光电阴极。由于它对色温 $T_s = 2870^\circ\text{K}$ 的白炽灯辐射有很高的灵敏度，因而引起人们极大的注意。最近已经做出 Sb-K-Na 和 Sb-K-Na-Cs 光

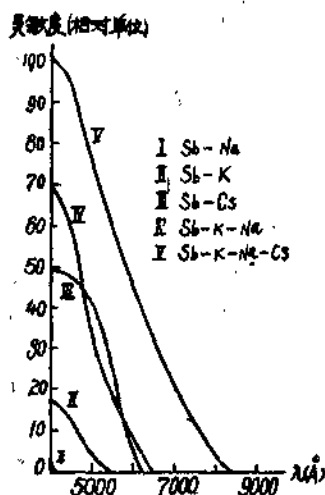


图 1.8. 多碱光电阴极的频谱特性。达到 180 微安/流明。我们把各种由铟与碱金属组成的光电阴极的灵敏度与红限表示在图 1.8 中。

根据对 Sb—K—Na 和 Sb—K—Na—Cs 多碱阴极的化学分析表明, Na 与 K 最合适的比例为 2 比 1, 铯的数量很少, 约为一个单原子层。如果对多碱阴极表面进行氧化, 会得出与铟铯阴极相反的结果, 即灵敏度反而下降。

由于多碱阴极的灵敏度很高(约比铟铯阴极和铯铯阴极高出 2 到 4 倍), 同时它的频谱特性也与肉眼视觉频谱特性相近, 因此在最近期间在很多新型的摄像管中都在逐渐采用。

在谈过各种光电阴极以后, 现在我们把它的频谱特性最大值波长、红限、积分灵敏度和量子输出等列表(表 1-1)加以比较。这里应该做几点说明:

① 表中光电阴极频谱特性波长最大值和积分灵敏度的变化范围较大, 是因为取自不同原始数据和制造阴极的具体工艺过程不同所引起。

电阴极。如果用符号 Me 表示碱金属, 则多碱阴极的主要化学成分可以用 $SbMe_3$ 来表示。现在我们已经知道, 铟钾阴极(SbK_3)灵敏度为 5 微安/流明, 但是同时含有钾钠两种成分的多碱阴极 [$Sb(NaK)_3$] 灵敏度却达到 50 微安/流明, 而含有三种碱金属的多碱阴极 [$Sb(KNaCs)_3$] 其灵敏度就超过所有的其他阴极。对于涂在玻壳上的半透明多碱阴极 ($Sb-K-Na-Cs$) 其积分灵敏度可以

表 1-1. 几种复杂光电阴极的结构和参量

序号	阴极名称	阴极结构	积分灵敏度 (微安/流明)	量子输出 (电子/量子)	红限 (Å)	长波最大 值 (Å)
1	氧铯	[Ag]—O, Cs			8000	3500
2	氧铯	[Ag]—Cs ₂ O—Cs			9000— 11000	6200
3	氧铯	[Ag]—Cs ₂ O, Cs—Cs			11000— 12000	7000— 8000
4	氧铯	[Ag]—Cs ₂ O, Cs, Ag—Cs	15—30	0.8— 1.0	12000— 13000	7500— 8500
5	氧铯 (再次蒸铯)	[Ag]—Cs ₂ O, Ag, Cs—Cs	30—60		16000	6000— 8500
6	铯铯	[Ag]—Sb·Li ₃ —Li	35—40	30	6200	
7	铯铯	$\left[\frac{\text{Ni}}{\text{G}}\right]$ —SbNa ₃ —Na	1		4200	
8	铯铯	$\left[\frac{\text{Ni}}{\text{G}}\right]$ —SbK ₃ —K	5		5100	
9	铯铯	$\left[\frac{\text{Ni}}{\text{G}}\right]$ —SbCs ₃ —Cs	30—70		7900	
10	铯铯	[Ag]—SbCs ₃ —Cs	95.4	30	7060	
11	铯铯 (氧敏化)	[Ag]—SbCs ₃ , Cs ₂ O, Cs—Cs	80—130		9000	
12	铯铯	[Ag]—BiCs ₃ , Cs—Cs	20—25	10	9000	4500
13	铯铯 (氧敏化)	$\left[\frac{\text{Ni}}{\text{G}}\right]$ —BiCs ₃ , Cs ₂ O, Cs—Cs	30—40		9000	4600
14	铯铯	[Ag]—Cs ₂ S, Ag, Cs—Cs			7000	4300
15	铯铯	[Ag]—Cs ₂ Se, Ag, Cs—Cs			7060	4330
16	铯氧银铯 (氧敏化)	Bi—O—Ag—Cs	40—100		7800	
17	铜铯铯	Cu—S—Cs	2—4			
18	铯铯铯(多碱)	Sb—K—Na	50		6700	
19	铯铯铯 (多碱)	Sb—K—Na—Cs	180		8700	