

〈微光技术〉

多碱光电阴极膜厚对阴极灵敏度的影响研究

李晓峰^{1,2}, 李莉², 杨文波², 邱永生²

(1.微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065; 2.北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 叙述了多碱光电阴极光谱反射的特点, 测量了超二代微光像增强器多碱光电阴极的光谱反射曲线, 分析了光谱响应曲线产生干涉加强峰和干涉减弱峰的原因, 比较了不同膜层厚度多碱阴极光谱反射曲线的区别。根据能量守恒定律, 利用实测的多碱光电阴极光谱反射率和光谱透过率, 计算出多碱光电阴极的光谱吸收曲线, 通过研究不同厚度多碱阴极的光谱吸收, 发现多碱光电阴极膜层厚度加厚并不会提高其对所有波段光吸收率的特点。厚度增加只会增加短波和长波的光吸收率, 但中波的光吸收率不会增加反而下降, 这是由于受到光谱反射的影响。阴极膜层的厚度既影响光谱反射和光谱透过, 又会影响光谱吸收, 因此也影响多碱阴极的光谱响应, 所以多碱光电阴极的膜层厚度是影响多碱光电阴极灵敏度的一个关键参数。实践证明, 转移式技术制作的多碱光电阴极膜层厚度也存在一个最佳值, 超过这一最佳厚度, 阴极的灵敏度不增反降, 这是因为红外光谱响应增加不多, 但中波光谱响应下降很多。所以对转移式多碱光电阴极而言, 实践证明当膜层厚度达到最佳厚度时, 膜层呈现淡红色, 在制作过程中要控制好阴极膜层的厚度, 这样才可能获得较高的阴极灵敏度。

关键词: 多碱阴极; 光电发射; Na₂K₂Sb 膜层; 光谱特性; 膜层厚度; 阴极灵敏度

中图分类号: O462.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2012)07-0422-05

Study on Sensitivity of Different Thickness of Multi-Alkali Photocathode

LI Xiao-feng^{1,2}, LI Li², YAN Wen-bo², QIU Yong-sheng²

(1.Key Laboratory of Night Vision on Defense Science and Technology, Xi'an 710065, China;

2.North Night Vision Science and Technology Group Corp., Kunming 650114, China)

Abstract: This paper described the spectral reflectance characteristic of multi-alkali photocathode, measured the spectral reflectance curve of multi-alkali photocathode on the second generation image intensifier, analyzed the reason of both interference peak and valley on spectral response curves, and compared the difference of spectral reflectance curve between different photocathode film thicknesses. According to the law of conservation of energy, the spectral absorption curve of multi-alkali photocathode is calculated by the spectral reflectance and transmittance measured on multi-alkali photocathode. Through the research of different thickness cathode absorption spectrum, the characteristic that the film thickness of multi-alkali photocathode does not improve light absorption of all wave bands was found. Thickness increases will only increase the short wavelength and long wavelength optical absorption rate, but the middle wavelength band light absorption rate does not increase but declined. This is due to the influence of spectral reflectance. Cathodes film thickness affects both the spectral reflectance and the spectral transmission, and then affects the absorption spectrum, thus also affect spectral response of multi-alkali photocathode. So the film thickness of multi-alkali photocathode is the key parameter for sensitivity. Experiments proved that the thickness of multi-alkali photocathode produced by transfer technology has an optimum value, exceeding the optimum thickness, the cathode sensitivity falling instead of rising. The reason is that the IR spectral response increases not much, but the short wavelength spectral response decreased a lot. So for multi-alkali

收稿日期: 2012-05-22.

作者简介: 李晓峰 (1963-), 男, 高级工程师, 主要从事微光夜视技术研究。

基金项目: 微光夜视技术国防科技重点实验室基金, 编号: J2011016。

photocathode produced by the transfer technology, practice has proved that the cathode film will take the color of pale red when the optimal film thickness is got. In the production process of multi-alkali photocathode to obtain higher cathode sensitivity, it is a key to control the cathode film thickness.

Key words: Multi alkali photocathode, Photoemission, Na₂K₂Sb film, Spectral characteristic, Film thickness, Cathode sensitivity

0 引言

Na₂K₂Sb(Cs)多碱光电阴极(简称多碱阴极)主要由Na₂K₂Sb多晶半导体薄膜组成,尽管其阴极灵敏度低于GaAs光电阴极,但由于其要求的真空中度低、制造工艺简单,而且可以在各种形状的玻璃表面上制作,因此在光电管、光电倍增管、微光像增强器等真空光电子器件中有广泛应用。在微光夜视领域,所有二代和超二代像增强器仍然使用多碱阴极。批量生产的超二代像增强器阴极灵敏度在国外已经达到了800 μA/lm以上的水平,最高已经达到960 μA/lm,并且还有进一步提高的趋势,而国内批量生产的超二代像增强器阴极灵敏度仅达到700 μA/lm的水平,与国外的水平还有较大差距。多碱阴极灵敏度提高的主要原因是阴极制作工艺的进一步改进,其中膜层的厚度也在原来的基础上有所增加。例如对二代像增强器,光电阴极膜层的厚度是使阴极膜层的颜色为玫瑰红色,而超二代像增强器光电阴极膜层的厚度是在二代像增强器的基础上进一步加厚阴极膜层使膜层的颜色达到淡红色。多碱阴极的主要指标是白光阴极灵敏度,在制造过程中也主要监控白光光电流的变化。然而对微光像增强器的使用而言,除要求白光阴极灵敏度足够高以外,还要求阴极的光谱响应与景物的光谱具有较高的光谱匹配系数。因为多碱阴极的光谱响应范围在300 nm~950 nm之间,而夜间景物的反射光谱在600 nm以上,峰值波长在800 nm~1200 nm之间。因此要获得较高的光谱匹配系数,就要求多碱阴极在600 nm之上的长波响应高,而多碱阴极的光谱响应与多碱阴极的膜层厚度有关。对非转移式阴极技术制造的多碱阴极,膜层厚度与阴极灵敏度的关系问题,南京理工大学常本康教授、钱芸生教授等采用光学反射率监控和光谱响应监控的方法进行过充分的研究,对提高非转移式多碱阴极的灵敏度起到了积极的理论指导作用,取得了良好的效果^[1-3]。但由于目前像增强器主要采用转移式阴极的技术制作,而转移式阴极与非转移式阴极的制作技术不一样,所获得的膜层厚度也不一样,因此转移式多碱阴极膜层厚度对阴极灵敏度的影响问题还有必要进一步研究。

1 多碱阴极光谱反射特性分析

在超二代像增强器中,多碱阴极在玻璃窗上制作,结构如图1所示。Na₂K₂Sb阴极膜层制作在玻璃窗内表面上,玻璃窗的厚度约为5.5 mm,玻璃表面的一端是大气,而制作阴极膜层的另一端却是真空。垂直入射的入射光穿透玻璃并到达Na₂K₂Sb阴极膜层,Na₂K₂Sb阴极膜层吸收光之后产生跃迁电子,跃迁电子扩散到真空界面并逸出到真空中产生光电流^[4]。

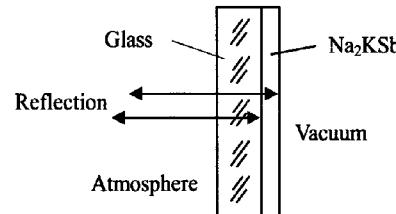


图1 多碱光电阴极结构示意图

Fig.1 Diagram of multi-alkali photocathode structure

在光电发射过程中,并非所有的入射光均能产生光电发射,只有被阴极膜层所吸收的那部分光才能产生光电发射。这是因为当光线入射到玻璃表面时,首先就有一部分光线被反射回空气中,这部分被反射回的光线不会再产生光电流。穿透玻璃窗的入射光到达光电阴极表面时,一部分在阴极膜层界面被反射回空气中,这部分反射光也不会产生光电发射,只有进入Na₂K₂Sb阴极膜层的那部分光才能产生光电发射。而进入Na₂K₂Sb阴极膜层的入射光一部分被吸收,另一部分在阴极膜层与真空的界面被反射回,而第三部分却进入到真空中。只有进入阴极膜层并被吸收的那一部分光才产生光电发射。

在入射光从空气经过玻璃、阴极膜层最终进入真空中过程中,每经过一个界面,都会发生反射,反射率可根据费涅耳公式(1)进行计算:

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1)$$

式中: R表示界面的反射率, n₁和n₂分别表示界面两端介质的折射率。由式(1)看出,界面两边介质的折射

率相差越大，反射率越高。因为玻璃的折射率为1.48，阴极膜层的折射率为3.2(520 nm波长入射光)，那么根据式(1)，可以计算出玻璃与空气界面的反射率为仅3.6%，玻璃与Na₂K₂Sb膜层界面的反射率为13.6%，而Na₂K₂Sb膜层与真空界面的反射率却高达27%。

需要说明的是当入射光在阴极膜层与真空的界面反射时，反射光返回到阴极膜层与玻璃的界面或玻璃与空气的界面时，还会有一部分反射光又被反射回阴极膜层。同理，入射光在阴极膜层与玻璃的界面反射时，也存在类似的反射。因此在整个反射过程中，除会发生一次反射之外，还会发生二次及多次反射，但主要是一次反射所包含的能量最高。图1仅表示出了膜层两端两个界面上的一次反射，二次以上的反射未表示出来。对一束入射光而言，反射光和透射光均不会产生光电发射，能产生光电发射的仅为阴极膜层吸收的那一部分光线，因此希望阴极膜层对600 nm以上的长波反射尽可能小。

对超二代像增强器多碱阴极的光谱反射，采用Lambda950分光光度计进行测量，测量范围为350 nm~1200 nm。图2是0288#样品实测的光谱反射曲线，该样品的阴极膜层为采用典型的转移阴极技术制作。

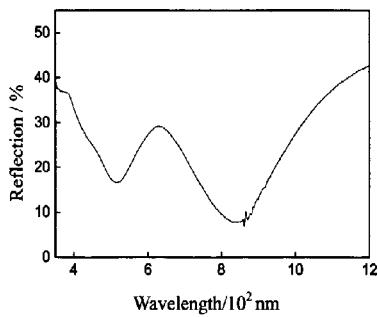


图2 光谱反射率曲线

Fig.2 Spectral reflection of multi alkali photocathode

从图2的光谱反射曲线看出，整个阴极膜层光谱反射率曲线与普通的光学膜层的光谱反射率曲线相比，其不同级别的干涉峰强度不一样，且曲线较不规则。原因是阴极膜层是一种具有强吸收系数的半导体薄膜，对不同的波长存在不同的折射率和消光系数。在光谱反射曲线上存在的干涉峰，是其所对应波长的入射光在玻璃与阴极膜层界面反射和在阴极膜层与真空界面上反射的两束反射光发生干涉的结果。如果这两束反射光的相位差相差 $\lambda/2$ 的奇数倍，那么将出现干涉减弱峰，如果相差 $\lambda/2$ 的偶数倍，将出现干涉加强峰。考虑到入射光从玻璃入射到玻璃与阴极膜层

的界面上反射时存在半波损失，因此这两束反射光发生干涉减弱时的相位差实际上是相差 $\lambda/2$ 的偶数倍，或 λ 的整数倍。同理，反射干涉加强峰时，两束反射光的相位差实际上是相差 $\lambda/2$ 的奇数倍。如果入射光为白光，那么当膜层厚度刚好使某一波长在玻璃与Na₂K₂Sb膜层界面和Na₂K₂Sb膜层与真空界面反射的两束反射光发生干涉加强时，阴极膜层的光谱反射曲线上就会出现干涉加强峰。

图2中看出，多碱阴极膜层对入射光的反射率较高，在350 nm~900 nm波长范围内，平均反射率为21%，而在900 nm~1200 nm波长范围内，平均反射率高达23%。在整个光谱反射曲线上可以看到两个明显且相邻的干涉减弱峰，一个短波峰，位于518 nm，反射率为16.5%，另一个长波峰，位于834 nm，反射率为7.8%。在两个干涉减弱峰之间，有一个干涉加强峰，位于620 nm，反射率为30%。

2 多碱阴极膜层厚度对阴极灵敏度的影响研究

多碱阴极Na₂K₂Sb膜层的折射率较高，因此费涅耳反射也很高。多碱阴极的阴极灵敏度定义为光电流与入射光通量之比，因此如果阴极对入射光的反射较多，那么阴极对入射光的利用率就低，因此灵敏度也较低。不同厚度的阴极膜层，光谱反射率不一样，因此会导致光吸收不一样，进而影响阴极的光谱灵敏度^[5-8]。图3是两个不同厚度阴极膜层样品所测量得到的光谱反射率曲线。图中0140#样品的阴极膜厚比1150#样品的阴极膜厚更厚。

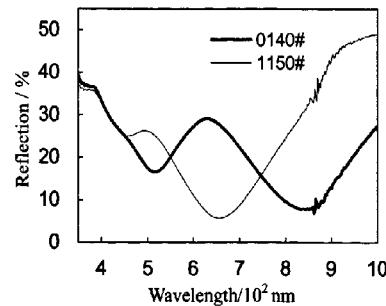


图3 光谱反射率曲线

Fig.3 Spectral reflection of multi alkali photocathode

从图3中看出，1150#样品有两个干涉减弱峰和一个干涉加强峰。两个干涉减弱峰分别位于444 nm和654 nm，一个干涉加强峰位于498 nm。对1150#样品，444 nm干涉减弱峰和498 nm干涉加强峰的位置距离较近，并且峰强不突出。对0140#样品，同样有两个干涉减弱峰和一个干涉加强峰。两个干涉减弱峰的位

置分别位于 518 nm 和 832 nm, 而干涉加强峰位于 634 nm。两条曲线相比较可以看出, 随着阴极膜层的加厚, 如对 0140#样品, 在光谱反射曲线上, 这两个相邻的干涉减弱峰和干涉加强峰均向长波方向移动, 同时干涉峰之间的距离增大, 并且干涉峰的峰强更加突出。0140#厚阴极膜层样品与 1150#薄阴极膜层样品相比, 在 600 nm~700 nm 和 800 nm~900 nm 波长范围之间光谱反射发生了显著的变化, 即在 600 nm~700 nm 波长范围内反射增加的同时, 在 800 nm~900 nm 波长范围反射却减小。反射率的变化会影响到吸收率的变化, 进而影响到阴极的光谱响应。根据能量守恒定律, 吸收率、反射率和透过率之和为 1, 而反射率和透过率可以进行测量, 因此吸收曲线可以根据实测的吸收率和透过率计算出来。典型的转移式多碱阴极光谱反射率、透过率以及吸收率的曲线见图 4。图中看出阴极膜层的透过率在 350 nm~900 nm 之间随波长的变化呈现增加的形式, 在 900 nm 波长之后又呈逐步下降的趋势。因为对同一波长的入射光, 膜层对光线的透过随厚度增长呈指数衰减的形式, 而对一定厚度的阴极膜层, 对光线的透过随波长增大也呈指数增加的形式。因此实测的膜层吸收曲线与理论计算基本吻合。不同的是在 900 nm 波长之后, 由于光子的能量低于膜层的禁带宽带, 膜层对入射光吸收为 0, 而反射和透射之和为 1, 因此反射增加, 透射必然减小。所以膜层的吸收率和透过率均会受到反射率的影响, 正因有了反射的影响, 膜层的吸收曲线才不是随波长的增加而单调的减小, 其曲线的形状受到了反射曲线的“调制”。因此膜层厚度决定光谱反射, 光谱反射又决定光谱吸收, 而光谱吸收又决定阴极的光谱响应, 所以膜层厚度一定, 光谱吸收就定了。

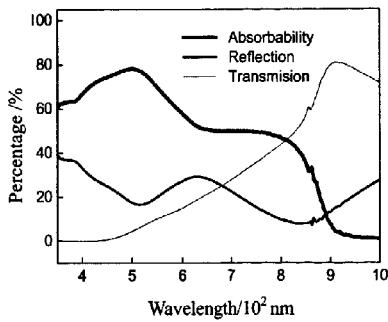


图 4 反射、透射和吸收率曲线

Fig.4 Spectral reflection, transmission and absorption

图 5 是 0140#样品和 1150#样品的吸收率曲线。0140#样品和 1150#样品的膜层厚度分别约为 190 nm 和 120 nm。从图中看出, 两条曲线之间主要存在三段

交叉, 分别是短波 350 nm~570 nm, 中波 570 nm~710 nm 和长波 710 nm~900 nm。对 0140#样品, 吸收曲线在三个波段与 x 轴形成的面积分别为 15786、7235 和 7551; 对 1150#样品, 吸收曲线在三个波段与 x 轴形成的面积分别为 14846、8411 和 5671。对 1150#薄阴极膜层样品, 仅在中波 570 nm~710 nm 范围内吸收率高于厚阴极膜层 1140#样品, 在短波 350 nm~570 nm 范围和长波 710 nm~900 nm 范围的吸收率均低于厚阴极膜层样品, 这说明厚阴极样品不是在所有波段范围内的吸收均高于薄阴极膜层样品。分别对两条吸收曲线进行积分, 求得 0140#厚阴极膜层和 1150#薄阴极膜层吸收曲线与 x 轴形成的面积分别为 30796 和 28761, 因此在整个阴极光谱响应 350 nm~900 nm 范围内, 厚阴极的光吸收总体高于薄阴极的吸收, 因此厚阴极膜层可以获得更高的阴极灵敏度。实践也证明厚阴极膜层的阴极灵敏度也高于薄阴极膜层的阴极灵敏度。

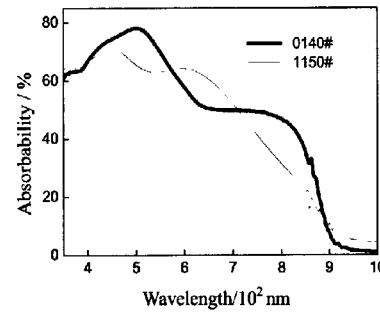


图 5 不同膜层厚度的吸收率曲线

Fig.5 Spectral absorptability of multi alkali photocathode

由于阴极膜层厚度既影响光谱反射率, 也影响光谱的吸收率, 因此也影响阴极的光谱响应。又由于厚膜层阴极比薄膜层阴极具有更高的光吸收能力, 因此要增加阴极的灵敏度, 就需要增加阴极膜层的厚度。然而, 多碱阴极膜层是一种多晶半导体, 电子的逸出深度较小, 而膜层对于短波的吸收, 主要集中在玻璃界面一端的膜层表层, 距离电子逸出的真空界面较远, 所以尽管加厚阴极膜层可以同时增加短波和长波的吸收率, 但由于电子的逸出深度有限, 因此增加阴极膜层厚度虽然增加了阴极膜层的长波吸收率, 导致长波阴极灵敏度有所增加, 但同时也会导致短波光子产生的电子不能逸出阴极表面, 从而导致阴极的短波阴极灵敏度及在整个光谱响应范围内的积分灵敏度有所下降^[9, 10]。因此对转移阴极来讲, 阴极的膜层厚度也存在一个最佳值, 在该厚度, 阴极呈淡红色。在这一厚度, 阴极膜层的吸收率在 600 nm~800 nm 波

长范围内基本相等,见图5,同时阴极光谱响应在600 nm~800 nm波长范围内也基本相等,见图6。图6中0160#样品为膜层颜色为淡红色的样品,该厚度认为是最佳厚度,而0180#样品的厚度超过最佳膜层厚度。0160#样品的阴极灵敏度为731 μA/lm,而0180#样品的阴极灵敏度为614 μA/lm。图中看出,两个样品的光谱响应曲线在720 nm处有一个交叉点,在该波长的两端分别对两个样品的光谱响应曲线与x轴形成的面积进行计算,求得0160#样品光谱响应曲线在350 nm~720 nm波长范围内面积为18366,而0180#样品350 nm~720 nm波长范围内面积仅为15036;0160#样品在720 nm~950 nm范围内面积为10574,而0180#样品在720 nm~950 nm范围内面积为11629。因此当多碱阴极的膜层厚度进一步加厚时,长波的阴极灵敏度增加不多,但500 nm~720 nm波长范围内的阴极灵敏度却急剧下降。

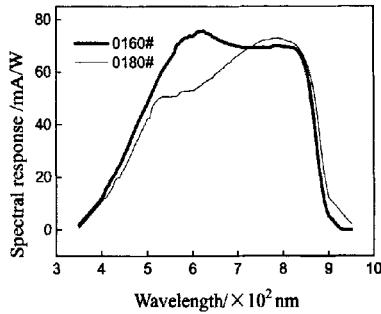


Fig.6 不同膜层厚度的光谱响应曲线
Spectral response of multi alkali photocathode

3 结论

多碱阴极膜层对不同波长的入射光具有不同的折射率和消光系数,因此相应的对不同波长的入射光具有不同的反射率。又由于多碱阴极膜层厚度较薄,因此在其膜层两端面反射的反射光由于存在相位差,对某些波长会发生干涉加强,对某些波长则会发生干涉减弱,所以多碱阴极膜层的光谱反射曲线上会存在干涉加强峰和干涉减弱峰。根据能量守恒定律,吸收率、透过率及反射率三者之和为1,因此阴极膜层的光谱反射对阴极膜层的光谱吸收有一定的影响。又由于光谱反射取决于阴极的膜层厚度,因此阴极的膜层厚度是影响阴极光谱吸收的一个重要参数。

根据光电发射的理论,光电发射的过程首先起始于阴极膜层吸收光子并激发电子跃迁,之后电子从膜层中扩散到表面,最后是电子克服表面势垒逸出。根据这一理论模型,阴极膜层厚度影响了光电反射过程中的两个过程,一个是吸收过程,另一个是扩散过程。

对吸收过程而言,要使光电阴极膜层有好的光吸收,只需增加阴极膜层的厚度即可。然而增加阴极膜层的厚度,并不意味着所有波长的吸收率均增加。增加阴极膜层的厚度,会增加短波和长波的吸收系数,但也会降低中波的吸收系数。另外多碱阴极是一种多晶半导体薄膜,电子在扩散过程中穿越晶粒界面时会存在能量损失,因此电子的逸出深度与单晶半导体相比较短,所以增加阴极膜层的厚度,虽然提高了阴极膜层对入射光的吸收率,特别是提高了对长波入射光的吸收率,但另一方面由于短波的吸收深度短,阴极膜层对短波光子的吸收距玻璃表面一端较近,而距真空气出的一端远,因此增加膜层厚度就会降低短波光子的逸出几率,从而降低多碱阴极短波的光谱灵敏度。阴极的膜层厚度既影响到阴极膜层的光谱反射率,又影响到阴极膜层的光谱吸收率,同时还影响到电子的逸出,因此是影响阴极光谱响应的一个重要参数。综合以上各种因素,转移式多碱阴极膜层也存在一个最佳厚度,在这一厚度,阴极膜层的颜色为淡红色,阴极灵敏度最高。

参考文献:

- [1] 房红兵,常本康,钱芸生.多碱光电阴极制备中中间层光谱初探[J].南京理工大学学报,1997,21(4): 297-300.
- [2] 李晓峰,田金生,房红兵,等.多碱阴极光谱响应监控研究[J].南京理工大学学报,1999,23(3): 245-248.
- [3] 钱芸生,富容国,徐登高,等.多碱光电阴极单色光电流测试技术研究[J].南京理工大学学报,1999,23(1): 34-37.
- [4] 常本康.多晶半导体三碱光电阴极厚度研究[J].南京理工大学学报,1993,14: 11-13.
- [5] 常本康,刘元震.多晶半导体三碱光电阴极厚度的理论研究[J].真空电子技术,1994(1): 13-15.
- [6] 宗志园,常本康.S25系列光电阴极的光谱响应计算机拟合研究[J].南京理工大学学报,1998,22(3): 228-231.
- [7] 常本康.超二代像增强器光电阴极成分控制原理研究[J].南京理工大学学报,1994(2): 16-23.
- [8] 常本康,刘元震.S20光电阴极光谱响应特性的理论研究[J].南京理工大学学报,1994(1): 47-50.
- [9] 常本康,富容国,钱芸生.用动态光谱响应测试技术评价多碱光电阴极的电子亲和势[J].红外技术,2002,24(1): 46-49.
- [10] 吕照顺,吴哈平,周伟,等.近底层紫外自由通信传输距离及影响因素研究[J].红外技术,2011,33(10): 588-592.