

doi:10.3788/gzxb20134210.1176

多碱阴极光电发射理论研究

李晓峰^{1,2}, 冯刘², 陆强¹

(1 北方夜视技术股份有限公司, 昆明 650114)

(2 微光夜视技术重点实验室, 西安 710065)

摘要:测量了未经 Cs-Sb 激活的 Na_2KSb 膜层和经过 Cs-Sb 激活的 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层的光谱反射率. 测量结果表明:两种膜层在 200~700 nm 波长范围内光谱反射率基本相同, 因此可以推断出这两种膜层的折射率也基本相同, 说明经过表面 Cs-Sb 激活的 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层内部的成份基本未发生变化, 两种膜层的光程差基本相同; 推断出 Na_2KSb 膜层表面的 Cs-Sb 层很薄, 其表面激活过程是一种表面效应. 对 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层进行了 XPS 能谱分析, 测量结果表明 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层表面除主要存在 Na、K 和 Sb 三种元素之外, 还存在 C、O 以及少量的 Cs 元素; $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层表面存在 C 和 O 的原因是在样品解封的过程中受到了污染. 对 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层表面进行时间为 10 s 的氩离子刻蚀, 再进行 XPS 分析, 结果表明能谱中不再出现 Cs 原子的谱峰. 对 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层表面进行总时间为 600 s 的氩离子刻蚀, XPS 能谱中出现了 Si 原子的谱峰, 说明氩离子已经刻蚀到阴极玻璃窗的表面. 根据刻蚀时间分析, $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层表面存在的 Cs 原子层的厚度约为 3 nm, 并且该 Cs 原子层只是存在于多碱阴极膜层的表面, 并未深入到多碱阴极的膜层内部, 这也说明 Na_2KSb 膜层的表面 Cs 激活是一种表面效应. 测量了未经过 Cs-Sb 激活和经过 Cs-Sb 激活的两种多碱阴极样品的荧光谱, 测量结果表明:经 Cs-Sb 激活的多碱阴极样品与未经过 Cs-Sb 激活的多碱阴极样品相比, 其荧光谱的峰值强度有所增加, 而荧光谱的峰值波长却有所减小. 说明 Na_2KSb 多碱阴极在 Cs-Sb 激活之后, 跃迁电子的数量有所增加, 同时跃迁电子的能级也有所提高, 这种现象可以解释为多碱阴极在激活过程中的“体积”效应. 所以多碱阴极在表面 Cs 激活过程中, 既有表面效应, 又有“体积”效应, 而这种“体积”效应是指 Na_2KSb 膜层内部的能带结构变化, 并非 Cs 原子扩散到 Na_2KSb 膜层内部.

关键词:多碱阴极; 像增强器; 光电发射; 电子跃迁; 量子效率

中图分类号: O462.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)10-1176-6

Photoemission Theory of Multi Alkali Cathode

LI Xiao-feng¹, FENG Liu², LU Qiang¹

(1 North Night Vision Technology Co., Ltd, Kunming 650114, China)

(2 The Key Laboratory on Night Vision Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: The spectral reflectivities of Na_2KSb film both with and without the activation layer of Cs-Sb were measured. The measurement results show that the spectral reflectivity of these two films within the wavelength range of 200~700 nm are substantially the same. So it can be inferred that the refractive index of both films are also substantially the same, and both films are substantially no change in its internal constituent. Because the spectral reflectivity is not changed, and the optical path difference of the two films are substantially the same, it can be inferred that the Cs-Sb layer was coated on the surface of Na_2KSb , so the activation process of Na_2KSb surface is a surface effect. In addition, $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ multi-alkali cathode film was analysis by XPS, the results showed that three elements was existed mainly in addition to Na, K,

基金项目:微光夜视技术重点实验室基金(No. J2011016)资助

第一作者:李晓峰(1963-),男,高级工程师,博士,主要研究方向为真空光电器件. Email: lxf@nvt.com.cn

收稿日期:2013-03-21;录用日期:2013-05-20

and Sb, but also the presence of CO_2 and a small amount of Cs elements. The reason of the presence of C and O on the surface of Na_2KSb (Cs) is oxidation in the unsealed process of sample. After 10 second time of argon ion etching, Na_2KSb (Cs) multi-alkali cathode film was analyzed by XPS, the results show that the energy spectrum of Cs atoms has disappeared. When continued for 600 seconds time of the argon ion etching, on Na_2KSb (Cs) multi-alkali cathode film surface, the spectrum of the Si atoms in XPS spectroscopy was appeared. This showed that argon ion has already etched to the glass window surface. According to the etching time analysis, the thickness of the multi-alkali cathode film surface Na_2KSb (Cs) of Cs atomic layers approximately 3nm, and the Cs atomic layer exists only in the surface of the multi-alkali cathode layer, No deep into the multi-alkali cathode film inside. The fluorescence spectrum of multi-alkali cathode with the Cs-Sb activation and without Cs-Sb activation has been measured. The measurement results showed that the peak wavelength of fluorescence spectrum of sample with Cs activation has shifted toward to short directions, while peak intensity of samples with the Cs-Sb has reduced compared with sample without Cs activation. This phenomenon lustrated that not only quantity of transition electron of Na_2KSb multi-alkali cathode with Cs activation has increased, but also the energy level of transition electron has increased. This phenomenon can be defined as "volume effect" during the activation process. So during activation process of Na_2KSb multi-alkali cathode, the reason of sensitivity increasing is a kind of surface effect and a kind of "volume effect". Yet this "volume effect" refers to the structure change inside the multi-alkali cathode layer material, rather than surface Cs atoms diffused inside film.

Key words: Multi alkali cathode; Binding energy; Photoemission; Fluorescence; Spectrum

0 引言

在传统的光电发射理论中,多碱阴极的光电发射既有表面效应的一方面,又有体积效应的一方面^[1-4].表面效应指多碱阴极膜层真空界面上的单分子层或几个分子层,这一分子层的特性不同于阴极膜层材料内部的特性.尽管这一分子层与整个阴极膜层相比厚度较薄,但其对光电阴极表面逸出功的降低却具有决定性的作用,因此在光电发射过程中扮演着十分重要的角色.对多碱阴极而言,当 Na_2KSb 膜层制作完工之后,需要在其表面上制作一层较薄的Cs-Sb层,这一过程俗称激活.经过激活的 Na_2KSb 膜层的逸出功大幅度降低,因此阴极光谱响应大幅度提升.对多碱阴极激活之后表面逸出功降低的原因有多种解释,其中南京理工大学常本康教授提出的偶极层理论较具说服力^[5-8].偶极层理论是一种表面效应的模型,未涉及到 Na_2KSb 膜层内部的变化.而所谓的体积效应是指表面激活层对阴极膜层内部结构的影响,即经过表面Cs-Sb激活之后, Na_2KSb 膜层晶格常量的变化^[9].晶格常量变化的原因解释为在多碱阴极激活过程中,Cs原子顺着晶粒晶界扩散到了 Na_2KSb 膜层中.近年来,多碱阴极的灵敏度有了很大的提高,其制作工艺、材料结构等方面有很多改进,而传统的多碱阴极理论又是基于过去的制作工艺和材料结构,是否仍适合于目前的高灵敏度多碱阴极还需进一步研究.本文通过研究超二代像增强器多碱阴极在表面Cs-Sb激活之

后光谱反射率、光致荧光的变化,并结合X射线光电电子能谱的分析,提出了 Na_2KSb 膜层在Cs-Sb激活之后能带结构发生变化的假设,丰富了多碱阴极理论体系,对多碱阴极研究有一定的参考价值.

1 光谱反射率研究

Na_2KSb 膜层或 Na_2KSb (Cs)膜层是一种多晶半导体,其性能参量包括折射率、消光系数、电阻、禁带宽度、迁移率等. Na_2KSb 膜层在表面Cs-Sb激活之后,如果是Cs原子进入 Na_2KSb 膜层内部,或Cs原子顺着晶界向 Na_2KSb 膜层中扩散并成为 Na_2KSb 膜层内部中元素的一部分,那么 Na_2KSb (Cs)膜层的性能必定与 Na_2KSb 膜层的性能不同,如膜层的折射率会发生变化,因此可以通过测量 Na_2KSb 膜层和 Na_2KSb (Cs)膜层的光谱反射率来比较 Na_2KSb 膜层和 Na_2KSb (Cs)膜层成份或结构的变化.图1为光谱反射率的测量原理示意图,入射光从多碱阴极玻璃窗的外表面入射,而被多碱阴极 Na_2KSb 膜层反射的反射光仍从阴极玻璃窗的外表面出射.为了测量紫外波长的光谱反射率,玻璃窗采用透紫外的合成石英玻璃制作.输入光为经过光栅分光的单色光,波长范围为200~700 nm.被 Na_2KSb 膜层反射的单色光被探测器所吸收,经过标定之后,就可以测量出 Na_2KSb 膜层的光谱反射率.对整个光电阴极组件而言, Na_2KSb 膜层对入射光的反射过程较复杂.首先是玻璃窗的外表面会反射,而反射率的大小取决于玻璃窗的折射率.其次,

由于 Na_2KSb 膜层是一层薄膜,在膜层与玻璃界面和膜层与真空界面上的反射光还会存在干涉,因此对入射光的反射除了与 Na_2KSb 膜层的折射率有关之外,还与膜层的厚度有关.但无论怎么说,当两种膜层的厚度一定时,如果光谱反射不同,那么两种膜层的折射率必定不同.而折射率不同,材料的性能也不相同,因此通过比较 Na_2KSb 膜层和 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层的光谱反射率可以来分析出 Na_2KSb 膜层和 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层的成份区别.

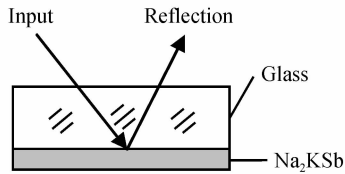


图1 光谱反射率测量原理

Fig. 1 Illustration of spectral reflection measuring

为了比较 Na_2KSb 膜层和 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层光谱反射率的变化,在同一条件下制作了不经 Cs-Sb 激活的 Na_2KSb 膜层和经过 Cs-Sb 激活的 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层,之后在同一条件下测量两种膜层的光谱反射率并进行比较分析.图2是3106#样品和3732#样品的光谱反射率实测曲线,其中的3106#样品为未经过 Cs-Sb 激活的 Na_2KSb 膜层样品,而3732#样品为经过 Cs-Sb 激活的 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层样品.两个样品的 Na_2KSb 膜层为同时制作,因此其厚度一样,不同的是3106#样品未经过 Cs-Sb 激活,而3732#样品经过了 Cs-Sb 激活.

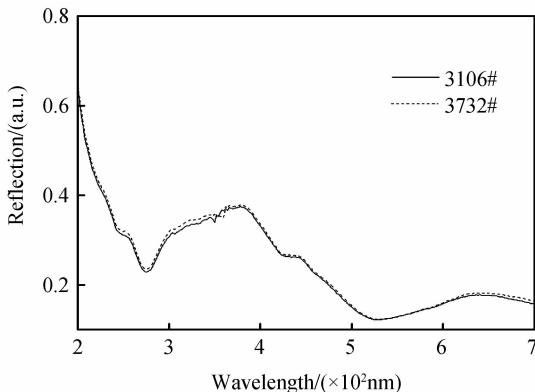


图2 光谱反射率曲线

Fig. 2 Spectral reflection of cathode

从图2看出,未经过 Cs-Sb 激活的3106#样品的光谱反射率曲线与经过 Cs-Sb 激活的3732#样品的光谱反射率曲线在200~700 nm的波长范围内基本相同.因为两个样品的 Na_2KSb 膜层是在 $\Phi 18$ mm 近贴式像增强器的制作设备中同时一次制作的 Na_2KSb 膜层,因此其厚度是基本相同的.这样影响其光谱反射率的因素只有膜层本身的折射率,而折射率又与其膜层本身的成份相关,因此

Na_2KSb 膜层和 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层的光谱反射率曲线相同,表明在 Na_2KSb 膜层的激活过程中,Cs层是一层沉积在 Na_2KSb 膜层表面的膜层,即在 Na_2KSb 膜层的表面激活过程中,并没有 Cs 原子深入到 Na_2KSb 膜层的内部或成为 Na_2KSb 膜层中的一种成份,否则由于其膜层的成份不同,折射率也不同,相应的光谱反射率也会不同.光谱反射率的实测曲线表明, Na_2KSb 膜层经过 Cs-Sb 激活之后,Cs层是沉积在 Na_2KSb 膜层表面的,另外该 Cs 层的厚度也相当薄,其厚度与 Na_2KSb 膜层的厚度相比较可以忽略.否则如果 Na_2KSb 膜层表面所吸附的 Cs 层较厚,那么由于膜层厚度改变,光程差改变,随之干涉条件也发生变化,光谱反射率的峰值波长必定会发生变化,因此 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层的光谱反射率曲线必定与 Na_2KSb 膜层的光谱反射率不一样.

2 表面 XPS 分析

对 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层成份分析的有效工具之一是 X 射线光电子能谱分析 (X-ray Photoelectron Spectrum, XPS). XPS 配合氩离子刻蚀,可以对膜层成份沿膜层深度变化的规律进行分析.但由于 Na_2KSb 或 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层只能保存在真空之中,一旦暴露大气将很快损坏,因此给 Na_2KSb 膜层或 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 膜层性能参量的分析带来了很大的困难.而要对多碱阴极膜层进行 XPS 分析,需要在真空的状态下将 Na_2KSb 多碱阴极膜层送入 XPS 仪器的分析室.一种选择是在 XPS 仪器的真空室中制作 Na_2KSb 膜层,另一种选择是将 Na_2KSb 膜层的制作设备通过真空管道与 XPS 仪器的真空室连接起来.这样一来,可以想象分析将非常复杂,费用也相当昂贵.为了方便地对多碱阴极进行分析,采用一种简单易行的方法.该方法的基本过程是这样.首先采用转移阴极技术在多碱阴极制作设备上制作好多碱阴极,阴极玻璃窗与样品管壳阴极法兰盘之间采用低温钼合金封接,所封接的多碱阴极样品为一个二极管,其内部的真空度约为 10^{-8} 托.在对多碱阴极样品进行分析之前,将二极管样品送入 XPS 仪器的预真空室,当预真空室的真空度抽到 10^{-7} 托以上时,利用光加热的方法将该二极管样品加热到 80°C ,保温 15 min,之后利用真空机械手将多碱阴极样品的阴极玻璃窗与阴极样品的法兰盘解封,最后再将多碱阴极玻璃组件送入 XPS 分析室进行分析.测量时,首先对 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极表面进行全谱扫描,标准样品为 $\text{Cu } 2p_3 = 932.44 \text{ eV}$,测量面积为 $2 \times 2 \text{ mm}^2$,测得的全扫描能谱图见图3.

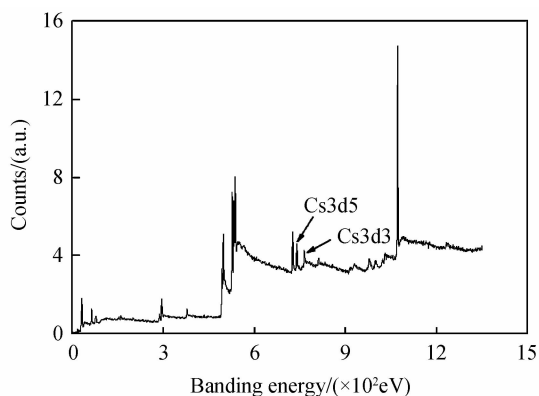


图3 多碱阴极表面能谱图

Fig. 3 Spectrum of multi alkali cathode surface

从图3可以看出,在刻蚀前的全扫谱图中,可以分别看到Na、Sb、Cs、O、K和C共6种元素Na1s、Sb3d、Cs3d、O1s、K2p和C1s的主峰以及次峰.说明多碱阴极表面存在Na、Sb、Cs、O、K和C这6种元素.在多碱阴极的制作过程中,使用了Na、K、Sb和Cs四种元素,因此其表面能谱中存在这四种元素是在预料之中的.但对C峰和O峰而言,理论上在XPS的能谱图上不应该出现.所以287 eV对应的C1s的谱峰(C-OH根化合物),可以认为是多碱阴极在预真空室中加热解封脱离壳体的过程中使多碱阴极受到了C污染,从而吸附到了多碱阴极的表面上.而对位于532 eV的O1s谱峰,也可以认为是多碱阴极在预真空室中加热解封脱离壳体的过程中使多碱阴极受到了氧化.根据能谱扫描图进行半定量分析,得到原子的相对含量,数据见表1.表1中的BE为束缚能,单位为电子伏特(eV); I 为谱峰的强度,单位为每秒钟的计数(cps);FWHM为谱峰的半峰宽(Half Width at Half Maximum,FWHM),单位为电子伏特(eV);Atom为原子百分比,单位为%.

表1 刻蚀前各种元素的谱峰

Table 1 Spectrum of elements before etch

Element	BE/eV	I /cps	FWHM/eV	Atom/%
O1s	531.81	7 660	1.38	26.29
Sb3d5	526.27	13 790	1.03	7.87
Na1s	1 072.07	29 221	1.6	43.18
K2p	293.03	2 781	1.03	9.18
Cs3d5	725.52	4 446	2.03	2.91
C1s	286.93	879	1.42	10.57

从表1看出,多碱阴极表面的O原子数量是C原子数量的两倍多,因此可以近似看作为多碱阴极的表面吸附了一定数量的CO₂.但Na、K和Sb三种原子的比例并不是Na₂KSb膜层理论上所遵循的2:1:1的比例.这是因为Na原子的数量分别是K原子数量的4.7倍和Sb原子数量的5.55倍,而K原子的数量超过Sb原子的数量,Na原子的数量又

远远超过K原子的数量,即 $Na > 2, K > 1, Sb < 1$.从多碱阴极表面元素的比例中可以看出Cs原子的比例很小,只占2.91%,这与多碱阴极制作工艺中所蒸发的Cs原子量的估计基本相一致.

对多碱阴极表面进行全谱扫描之后,再对多碱阴极表面进行氩离子刻蚀,时间为10 s.刻蚀时,离子枪刻蚀电压为2 kV,电流为1 μ A.经过10 s的氩离子刻蚀之后,再对多碱阴极表面进行扫描,发现Cs原子的谱峰已经消失.刻蚀前Cs原子的窄谱扫描谱图见图4(a),刻蚀后Cs原子窄谱扫描谱图见图4(b).从图4(a)可以看出,能谱图中对应725 eV和739 eV的两个谱峰的束缚能分别为Cs3d5和Cs3d3的束缚能,因此表明在Na₂KSb膜层的表面上存在有Cs原子.但多碱阴极表面在经过10 s的刻蚀之后,Cs原子的两个特征谱峰,即725 eV和739 eV的两个谱峰已经消失,见图4(b).这充分说明在多碱阴极的激活过程中,Cs原子只是吸附在多碱阴极Na₂KSb膜层的表面上,而没有深入到Na₂KSb膜层的内部.如果Cs原子深入到了Na₂KSb膜层的内部,经过刻蚀之后,Cs原子的谱峰仍然应该看到,所以Cs原子只是吸附在Na₂KSb膜层的表面.

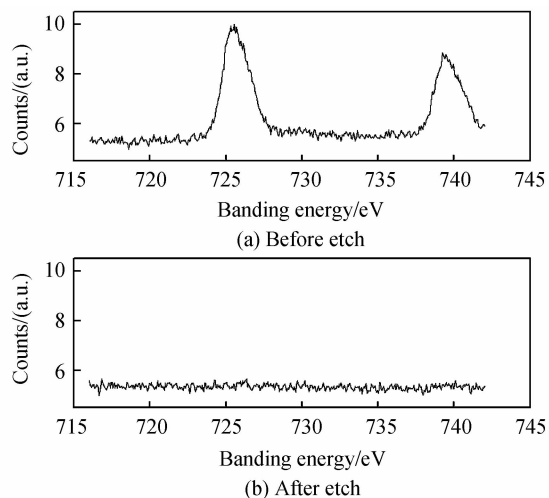


图4 Cs原子的能谱图

Fig. 4 Spectrum of Cs atom

进一步对多碱阴极膜层进行刻蚀,在经过600 s的氩离子刻蚀之后,能谱图中出现了束缚能为102 eV的谱峰,对应Si2p的特征谱峰,见图5.这说明氩离子已经刻蚀到了玻璃的表面,从而测量到了玻璃中的Si原子能谱.超二代像增强器多碱阴极的膜层厚度约为180 nm^[10-11],如果氩离子的刻蚀速度是相同的,那么对Na₂KSb膜层而言,600 s刻蚀180 nm,10 s的刻蚀深度仅为3 nm,所以从XPS表面分析的结果看出,在多碱阴极的激活过程中,Cs原子只是吸附在Na₂KSb膜层的表面,并没有深入

到 Na_2KSb 膜层的内部,且 Cs 原子层的厚度很薄。

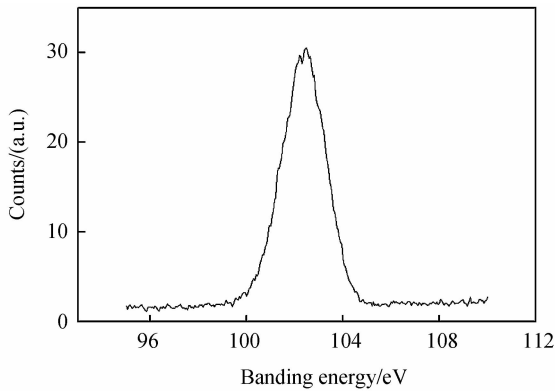


图 5 Si 原子的能谱图
Fig. 5 Spectrum of Si atom

3 光致荧光光谱研究

光致荧光(Photoluminescence, PL)是研究多碱阴极电子跃迁几率和跃迁能级的有效工具^[12-16]。荧光过程与光电发射过程相比较,两者的光子吸收过程和电子跃迁过程是相同的,均是首先吸收光子,之后再激发电子跃迁。荧光过程与光电发射过程的区别是,荧光过程中跃迁电子不逸出膜层表面,而光电发射过程中,跃迁电子要逸出膜层表面。因为荧光光谱的强度反映跃迁电子的数量,而荧光光谱的峰值波长却反映跃迁电子所处的能级,因此多碱阴极的荧光光谱与多碱阴极的光谱响应正相关,所以通过研究多碱阴极的荧光光谱可以来研究多碱阴极的光谱响应。为了比较 Na_2KSb 膜层在经过 Cs-Sb 激活之后的荧光光谱变化,测量了 4 个多碱阴极样品的荧光光谱。4 个多碱阴极样品分别为 210#、203#、130# 和 043#。其中的 210# 和 203# 样品均未经过 Cs-Sb 激活,而 130# 和 043# 样品均经过了 Cs-Sb 激活。测量仪器采用喇曼光谱仪,激发光采用 785 nm 波长的激光,功率为 1 mW。4 支多碱阴极样品的荧光光谱见图 6。从图中看出,203# 和 210# 样品的荧光光谱与 043# 和 130# 的荧光光谱相比,不仅荧光的强度有所区别,

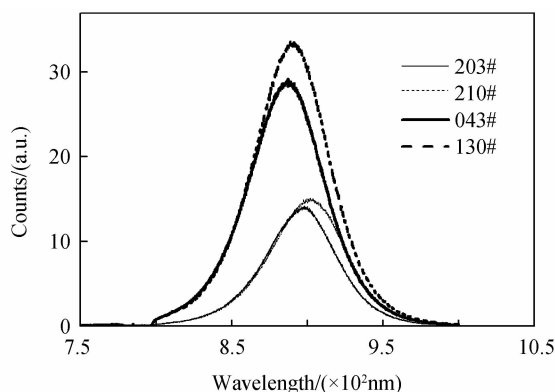


图 6 多碱阴极荧光光谱
Fig. 6 Fluorescence spectrum of multi alkali cathode

而且荧光光谱的峰值波长也有所区别。

表 2 为图 6 中 4 支多碱阴极样品的荧光光谱测量数据。表中看出,203# 样品的荧光光谱峰值强度为 13 844,峰值波长为 895 nm;210# 样品的荧光峰值强度为 14 926,峰值波长为 899 nm。203# 和 210# 样品的平均荧光峰值强度为 14 385,平均荧光峰值波长为 897 nm。而 043# 样品的荧光峰值强度为 28 883,荧光峰值波长为 886 nm;130# 样品的荧光峰值强度为 33 883,荧光峰值波长为 888 nm。043# 和 130# 样品的平均荧光峰值强度为 31 384,平均荧光峰值波长为 887 nm。因此经过 Cs-Sb 激活的 043# 和 130# 样品的荧光光谱峰值强度较未经过 Cs-Sb 激活的 203# 和 210# 样品的荧光峰值强度有所增加,平均增加了 2.21 倍。而经过 Cs-Sb 激活的 043# 和 130# 样品的荧光光谱峰值波长较未经过 Cs-Sb 激活的 203# 和 210# 样品的荧光光谱峰值波长有所减小,平均减小 10 nm。

表 2 多碱阴极荧光光谱测量数据

Table 2 Measuring results of multi alkali cathode

Sample	Intensity/cps	Wavelength/nm
203#	13 844	895
210#	14 926	899
043#	28 886	886
130#	33 883	888

荧光光谱峰值强度的增加,意味着跃迁电子的数量有所增加,而荧光光谱峰值波长的减小,意味着跃迁电子的能级有所提高。由于 Na_2KSb 膜层在 Cs-Sb 激活之后,阴极灵敏度有大幅的提升,这与激活之后电子跃迁的数量增加和跃迁电子的能级提高有必然的联系,因此 Na_2KSb 膜层在 Cs-Sb 激活之后,阴极灵敏度大幅提升的原因除了逸出功的降低之外,还有电子跃迁数量增加以及电子跃迁能级提高的原因。而跃迁电子数量增加以及跃迁电子能级提高的现象可以定义为一种体积效应,但产生这种现象的原因目前尚不清楚,还有待进一步研究。

4 结论

1) Na_2KSb 多碱阴极膜层在 Cs-Sb 激活之后,阴极灵敏度有大幅提升的主要原因是表面逸出功降低。 Na_2KSb 多碱阴极在表面 Cs-Sb 激活之后, Na_2KSb 膜层的材料性能并未发生变化,即 Cs 原子并没有扩散到 Na_2KSb 膜层的内部,并且 Cs 层的厚度较薄。

2) $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层的 XPS 光电子能谱分析结果表明,Cs 原子层的厚度较薄,仅约为 3 nm。

3)多碱阴极在表面 Cs-Sb 激活之后,除了存在逸出功降低的表面效应之外,还存在跃迁电子数量增加和跃迁电子能级升高的“体积”效应.所以多碱阴极激活过程中的“体积”效应是指 Na_2KSb 膜层内部能带结构的变化,并非表面 Cs 原子通过晶粒之间的晶界向 Na_2KSb 膜层的内部扩散.

参考文献

- [1] 常本康. 多碱光电阴极[M]. 北京:兵器工业出版社, 2011.
- [2] WANG GUI-hua, YANG Wei-yi, CHANG Ben-kang. Varied angle XPS study on surface of Cs/ p-GaAs(100)[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2000, **20**(3): 176-178.
汪贵华,杨伟毅,常本康. Cs/p-GaAs(100)表面的变角 XPS 研究[J]. *真空科学与技术*, 2000, **20**(3): 176-178.
- [3] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang. Gradient-doping negative electron affinity GaAs photocathode[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(5): 054001.
- [4] LIU Lei, CHANG Ben-kang. Spectral response characterization of super S_{25} and new S_{25} photocathodes[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(4): 946-949.
- [5] LI Wei, CHANG Ben-kang. Spectral matching factors between GaAs and multialkali photocathodes and reflective radiation of objects[J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(5): 674-677.
- [6] WANG Xiao-feng, ZENG Yi-ping, CHANG Ben-kang. The effect of Be-doping structure in negative electron affinity GaAs photocathodes on integrated photosensitivity [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**: 4104-4109.
- [7] DU Xiao-qing, CHANG Ben-kang. Angle-dependent XPS study of the mechanisms of “high - low temperature” activation of GaAs photocathode [J]. *Applied Surface Science*, 2005, **251**: 267-272.
- [8] LIU Lei, CHANG Ben-kang, DU Yu-jie, *et al.* The variation of spectral response of transmission-type GaAs photocathode in the seal process[J]. *Applied Surface Science*, 2005, **251**: 273-277.
- [9] 刘元震,王仲春,董亚强. 光电发射与光电阴极[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
- [10] YANG Zhi, ZHOU Jie-jun, CHANG Ben-kang. Study on optimal thickness of transparent GaAs cathode with exponent doping[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(6): 4290-4295.
杨智,邹继军,常本康. 透射式指数掺杂 GaAs 光电阴极最佳厚度研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(6): 4290-4295.
- [11] LI Xiao-feng, LU Qiang, LI Li. Thickness measurement of multi-alkali photocathode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1377-1381.
李晓峰,陆强,李莉. 超二代像增强器多碱阴极膜厚测量研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1377-1381.
- [12] LI Xiao-feng, LIU Ru-biao, ZHAO Xue-feng. Photoemission mechanism of multi-alkali cathode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1438-1441.
李晓峰,刘如彪,赵雪峰. 多碱阴极光电发射机理研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1438-1441.
- [13] LI Xiao-feng, YANG Wen-bo, WANG Jun. Photoemission mechanism of multi-alkali photocathode by photoluminescence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1435-1440.
李晓峰,杨文波,王俊. 用光致荧光研究多碱阴极光电发射机理[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1435-1440.
- [14] SERVICE R F. Organic LEDs look forward to a bright, white future[J]. *Science*, 2005, **310**(5755): 1762-1763.
- [15] LI Jian-hua, CUI Yuan-shun, CHEN Gui-bin. Structural phase transition, electronic structures and optical properties of GaN[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 161-166.
李建华,崔元顺,陈贵宾. GaN 结构相变、电子结构和光学性质[J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 161-166.
- [16] DING Huan-jun, GAO Yong-li. Evolution of the unoccupied states in Cs-doped copper phthalocyanine [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(5): 3309-3311.