

文章编号:1004-4213(2011)09-1438-4

多碱阴极光电发射机理研究

李晓峰, 刘如彪, 赵学锋

(北方夜视科技集团股份有限公司, 昆明 650114)

摘 要:通过比较有 Cs-Sb 表面层多碱阴极和未有 Cs-Sb 表面层多碱阴极的荧光谱, 发现有 Cs-Sb 表面层多碱阴极的荧光谱峰值波长向短波方向“蓝移”以及荧光峰增强的现象. 这一现象表明在多碱阴极 Na₂KSb 基层上制作 Cs-Sb 表面层之后, 不仅多碱阴极的逸出功降低, 而且 Na₂KSb 基层的结构也发生了变化. 这意味着在相同功率和相同频率入射光照射下, 经过表面 Cs-Sb 处理的 Na₂KSb 基层能够产生更多的跃迁电子并且跃迁能级更高, 逸出表面的机率更大, 获得的阴极灵敏度更高. 这表明 Cs-Sb 表面层既具有表面效应, 又具有体效应. 要进一步提高多碱阴极的灵敏度, 除进一步降低多碱阴极的逸出功外, 还需进一步提高 Na₂KSb 基层的性能, 使相同功率和频率的入射光能产生更多的跃迁电子, 并且跃迁的能级更高, 这就需要进一步改进工艺, 提高 Na₂KSb 材料的性能.

关键词:光致荧光; 逸出功; 带隙; 光电发射

中图分类号: O462.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114009.1438

0 引言

多碱光电阴极(简称多碱阴极)制造工艺简单, 可以在各种形状的各种玻璃上制作, 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^[1]. 近年来随着各种新型半导体探测器的出现, 在许多信号探测领域, 光电倍增管等传统的真空器件正逐步被这些新型探测器所替代. 然而在微光夜视领域, 多碱阴极的优点仍然十分突出. 在上世纪 80 年代随着欧洲超二代微光像增强器的出现, 使微光像增强器的性能得以进一步提升^[2]. 超二代微光像增强器性能提高的一个原因就是多碱阴极灵敏度的提高, 即 2856K 色温白光灵敏度从约 400 $\mu\text{A}/\text{lm}$ 提高到 800 $\mu\text{A}/\text{lm}$ 以上, 并且还有进一步提高的趋势. 多碱阴极灵敏度提高的原因显然是随着技术进步, 真空度、材料纯度得到进一步提高, 工艺得到了进一步改进. 所改进的多碱阴极的制作工艺仍然是先制作 Na₂KSb 基层, 然后再制作 Cs-Sb 表面层, 所不同的是在制作 Na₂KSb 基层和 Cs-Sb 表面层时采用不同的工艺而已^[3]. 多碱阴极制作工艺的改进主要还是依靠经验, 原因是多碱阴极的机理研究还不够充分, 理论对工艺的指导作用还不明显.

不同的制作工艺导致不同的阴极灵敏度, 说明尽管都制作了 Na₂KSb 基层和 Cs-Sb 表面层, 但由

于工艺不同, 导致材料结构也不同, 因此其阴极灵敏度的也不同. 因此有必要研究什么样的材料结构更好, 如何改进工艺来进一步提高多碱阴极的灵敏度. 本文通过光致发光的方法探索了多碱阴极 Na₂KSb 基层上制作 Cs-Sb 表面层后多碱阴极的结构变化, 进一步揭示了多碱阴极的光电发射的机理, 为进一步改进工艺提供了重要的参考价值.

1 光致荧光分析的特点及多碱阴极样品制备

当某种物质受到电磁辐射激发后, 电子由基态被激发到激发态(单重激发态或三重激发态), 只要该物质不发生化学变化, 它总要回复到原来的平衡状态. 在此过程中, 一部分多余的能量会通过光或热的形式释放出来. 如果这部分能量是以可见光的形式发射出来, 就称这种现象为发光. 当电子从单重激发态以辐射跃迁方式回到基态时, 物质发出荧光. 当电子从三重激发态以辐射跃迁方式回到基态时, 物质发出磷光. 激光光致发光就是用激光激发物体引起的发光现象. 通过测量发光体发出荧光谱的积分强度、峰值强度、峰值波长、半峰宽等参量, 可以分析出发光体的内部能带结构、带隙、杂质能级、缺陷、复合机制以及材料品质等方面的信息^[4]. 又由于激光荧光分析是一种非破坏性的分析方法, 对测量样

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: 2011-01-18; 修回日期: 2011-03-24

品无特殊要求,因此激光荧光光谱分析在半导体材料领域应用广泛.

多碱阴极是一种 p 型多晶半导体,其带隙约为 1 eV^[5]. 当用激光激发多碱阴极时,只要光子的能量大于其带隙宽度,价带电子会被激发到导带,导带电子在无光电发射的条件下必然要以某种方式返回到价带,其中必然有以辐射跃迁回到价带的方式,这就必然伴随有发光过程,因此可以通过荧光光谱分析来研究多碱阴极的结构^[6]. 要分析多碱阴极的荧光光谱^[7-8],首先要制备样品. 一种样品只有 Na₂KSb 基层,无 Cs-Sb 表面层,另一种样品为一个完整的多碱阴极,即既有 Na₂KSb 基层,也有 Cs-Sb 表面层. 样品封装在圆柱形小真空室内,如图 1. 测试时,激发光从玻璃表面垂直入射,穿透玻璃后再入射到多碱阴极膜层上. 该样品相当于一只光电二极管,可以测量多碱阴极灵敏度,也就可以将膜层的阴极灵敏度与膜层的荧光光谱特性结合起来研究.

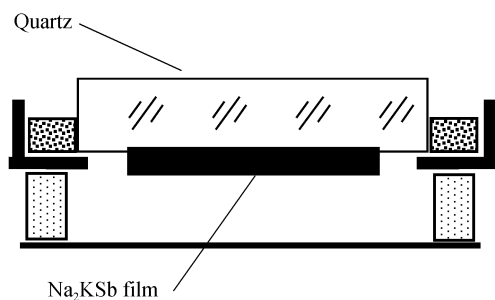


图 1 Na₂KSb 膜层样品结构
Fig. 1 Schematic diagram of the samples

2 多碱阴极光致荧光测量结果

采用英国雷尼绍公司(Renishaw)inVia 型号的显微拉曼光谱仪对 Na₂KSb 多碱阴极进行分析. 激光波长为 785 nm,对应光子的能量分别为 1.57 eV,大于 Na₂KSb 多碱阴极的禁带宽度,因此可以用来激发膜层发光^[9,10]. 测量所用仪器显微物镜的放大倍率为 5 倍,激光输出功率为 3 mW,探测器 CCD 曝光时间为 30 s,累加次数为 1 次,测量范围为 500 nm 至 1 000 nm.

表 1 是 4 支只有 Na₂KSb 基层多碱阴极和 4 支既有 Na₂KSb 基层,又有 Cs-Sb 表面层多碱阴极的荧光光谱测量结果. 表中的峰值波长指荧光峰对应的波长,峰强指荧光峰的强度,灵敏度指 2 856 K 色温白光的阴极灵敏度. 表中的前 4 支样品为无 Cs-Sb 表面层的多碱阴极,后 4 支样品为有 Cs-Sb 表面层的多碱阴极.

表 1 荧光谱峰值波长及峰值强度

Table 1 Peak wavelength and intensity of photoluminescence spectrum

No.	Sample	Wavelength/ nm	Intensity/ (a. u)	Sensitivity/ ($\mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1}$)
1	51052107	896	14640	3.3
2	51052210	899	14926	2.7
3	51052203	894	13910	3
4	51052204	890	13509	3.3
5	51052244	875	21500	600
6	51052241	875	21181	642
7	51052240	874	16186	630
8	51052245	873	17769	621

图 2 是表 1 中 51052107 # 多碱阴极和 51052244 # 多碱阴极所测得的荧光光谱. 其中强度较弱的荧光光谱为无 Cs-Sb 表面层 51052107 # 多碱阴极的荧光光谱,强度较强的荧光光谱为有 Cs-Sb 表面层 51052244 # 多碱阴极的荧光光谱. 比较两条曲线,发现多碱阴极在 Na₂KSb 基层上制作 Cs-Sb 表面层后,不仅荧光强度增加,而且荧光峰的峰值波长向短波方向移动,也就是说在基层上制作 Cs-Sb 表面层后,荧光峰的峰值波长向短波方向“蓝移”,从 896 nm 变为 875 nm,即跃迁能级从 1.38 eV 变为 1.42 eV,同时荧光强度也变强. 再比较表 1 中除上述两支样品之外的另外 6 支多碱阴极样品,即 3 支无 Cs-Sb 表面层多碱阴极和 3 支有 Cs-Sb 表面层多碱阴极,均发现存在荧光峰峰值波长“蓝移”且荧光峰强度变强的现象.

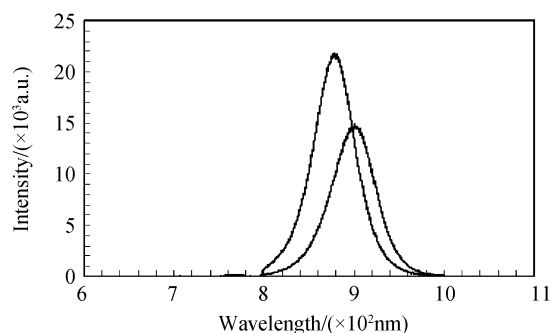


图 2 51052244 # 及 51052107 # 样品荧光光谱
Fig. 2 Photoluminescence spectrum of sample 51052244 # and 51052107 #

3 多碱阴极荧光光谱测量结果分析

对 Na₂KSb 多碱阴极光电发射的一个重要过程是 Na₂KSb 基层吸收光能,激发价带电子向导带跃迁,并且跃迁电子的能级高于真空能级,那么电子就有可能逸出光电阴极的表面并形成光电发射. 对于用 Cs-Sb 激活的 Na₂KSb 多碱阴极而言,逸出功约

为 1.34 eV, 因此只有跃迁能级高于 1.34 eV 的跃迁电子才有可能逸出光电阴极表面并形成光电流. 多碱阴极的能带示意图见图 3, 图中 E_0 为真空能级, E_c 为导带底, E_v 为价带顶, E_e 为电子跃迁能级.

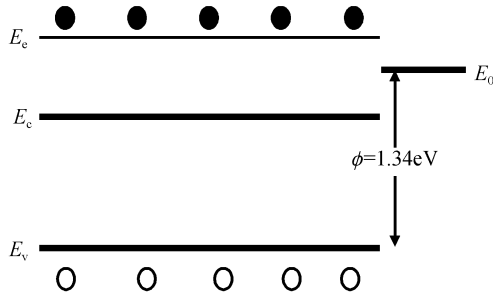


图 3 多碱阴极光电发射能带示意

Fig. 3 Schematic diagram of the photoemission of multi-alkali cathode

根据多碱阴极光电发射原理, 要获得高的阴极灵敏度, 除需要尽量低的逸出功之外, 还需要 Na_2KSb 基层吸收光能后能产生更多能级超过真空能级的跃迁电子, 即 Na_2KSb 基层的荧光峰的强度要强, 且峰值波长对应的能级要高. 比较表 1 中有 Cs-Sb 表面层和无 Cs-Sb 表面层的多碱阴极, 可以看出 4 支具有 Cs-Sb 表面层多碱阴极的平均灵敏度是 4 支无 Cs-Sb 表面层多碱阴极平均灵敏度的 200 倍, 但平均荧光强度仅为 1.34 倍. 荧光强度的高低意味着跃迁电子数的多少, 荧光强度增加到 1.34 倍, 所跃迁的电子数增加 1.34 倍, 相应的阴极灵敏度也应增加 1.34 倍, 但阴极灵敏度实际却增加 200 倍, 与所跃迁电子数的增加不成比例, 说明阴极灵敏度提高的主要原因是逸出的电子数更多, 也就是逸出功的降低, 而不仅仅是跃迁电子数的增加. 多碱阴极在制作 Cs-Sb 表面层以后, 阴极灵敏度大幅度提高, 除表面逸出功降低外, 还有一个原因就是其荧光峰增强并且荧光谱峰值波长发生“蓝移”. 这意味着通过表面 Cs-Sb 处理, 跃迁到激发能级的电子数不仅更多, 而且跃迁的能级更高, 因此逸出真空的机率更大. 这说明经过表面 Cs-Sb 层处理后的 Na_2KSb 基层本身的材料内部结构发生了变化, 从而使得在相同频率和相同功率的入射光照射下, 具有表面 Cs-Sb 层的 Na_2KSb 多碱阴极有更多的电子跃迁到导带, 并且跃迁的能级更高. 即 Na_2KSb 基层经过 Cs-Sb 表面处理后不但具有降低逸出功的表面效应, 而且还有改变 Na_2KSb 基层内部结构的体效应.

4 结论

根据以上对具有 Cs-Sb 表面层多碱阴极荧光峰

值波长向短波方向“蓝移”以及荧光峰增强的现象, 得出了 Cs-Sb 表面层既具有表面效应, 又具有体效应的结论. 根据这一结论, 要进一步提高多碱阴极的灵敏度, 首先是要制作结构良好的 Na_2KSb 基层. 基层要在相同功率和相同频率的入射光照射下, 有更多的电子跃迁到导带, 并且跃迁的能级要更高. 改进工艺制作的 Na_2KSb 基层与原工艺制作的 Na_2KSb 基层相比, 在同样条件下, 前者具有更强的荧光, 并且荧光峰值波长更短. 这意味着改进工艺制作的 Na_2KSb 基层的结构好于原工艺制作的 Na_2KSb 基层, 因此在相同功率和频率入射光照射下, 改进工艺制作的 Na_2KSb 基层能产生更多的跃迁电子并且跃迁能级更高, 因此跃迁电子逸出表面的机率更高, 获得的阴极灵敏度也更高. 在制作结构良好的 Na_2KSb 基层后, 还需要制作 Cs-Sb 表面层. 结构良好的 Cs-Sb 表面层可以降低多碱阴极的逸出功, 还可以改变 Na_2KSb 基层的结构, 提高其电子跃迁的能级和数量, 使阴极灵敏度大幅提高. 因此进一步改进 Na_2KSb 基层和 Cs-Sb 表面层的制作工艺可以进一步提高多碱阴极的灵敏度.

参考文献

- [1] 常本康. 多碱阴极机理、特性与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] CHANG Ben-kang. Study on the principle of multialkali photocathode by optical monitor [J]. *Vacuum Science and Technology*, 1994, **14**(1): 41-46.
常本康. 多碱阴极光学监控原理研究[J]. *真空科学与技术*, 1994, **14**(1): 41-46.
- [3] 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.
- [4] 叶宪曾, 张新祥. 仪器分析教程[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [5] 光电发射材料[M]. 侯海, 译. 北京: 科学出版社, 1979.
- [6] 孙家跃, 杜海燕等. 固体发光材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] CHANG Ben-kang. Study and analysis of structure on multialkali photocathode [J]. *Journal of Applied Optics*, 1984(4): 7-12.
常本康. 多碱阴极的结构分析与研究[J]. *应用光学*, 1984(4): 7-12.
- [8] XUE Zeng-quan, WU Quan-de. Application analysis of cesium in a multialkali cathode by quantum yield spectral[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1988, **16**(2): 23-28.
薛增泉, 吴全德. 用量子产额谱分析铯在多碱阴极中的应用[J]. *电子学报*, 1988, **16**(2): 23-28.
- [9] 张中太, 张俊英. 无机光致发光材料及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [10] 刘光华. 稀土固体材料学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1974.

Photoemission Mechanism of Multi-alkali Cathode

LI Xiao-feng, LIU Ru-biao, ZHAO Xue-feng

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

Abstract: Fluorescent spectra between multi-alkali cathode with Cs-Sb surface layer and without Cs-Sb surface layer were compared. It was found that phenomena of peak wavelength of the fluorescent spectrum shifted to shorter wavelength and intensity of fluorescent spectrum became stronger for the multi-alkali cathode with Cs-Sb surface layer. This phenomenon shows that in the condition of a multi-alkali cathode with Cs-Sb surface layer, the surface work function of multi-alkali cathode is reduced, and Na_2KSb structure is changed. This means that in the conditions of the same frequencies and the same incident power irradiation, Na_2KSb with Cs-Sb surface layer can be excited more transition electrons and obtain higher transition energy levels. So they are able to escape the multi-alkali cathode surface more easily and have higher probability to access the vacuum. This will lead to higher cathode sensitivity and shows that the Cs-Sb surface layer has a surface effect and physical effects. To further increase the sensitivity of multi-alkali cathode, it is needs to improve the performance of Na_2KSb layer in addition to further reduce surface work function of the multi-alkali cathode, so that the same power and frequency of incident light can produce more transition electrons and higher energy transition levels, which needs to further process improvements to make Na_2KSb material better.

Key words: Photoluminescence; Work function; Band gap; Photoemission