

doi:10.3788/gzxb20124112.1435

## 用光致荧光研究多碱阴极光电发射机理

李晓峰<sup>1,2</sup>, 杨文波<sup>2</sup>, 王俊<sup>2</sup>, 邱永生<sup>2</sup>

(1 微光夜视技术重点实验室, 西安 710065)

(2 北方夜视科技集团有限公司, 昆明 650114)

**摘 要:**本文介绍了多碱光电阴极的特点及其在微光像增强器中的应用,叙述了光致荧光的原理,探索了利用光致荧光方法来研究多碱阴极  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层电子跃迁几率的方法,并测量了两个不同灵敏度多碱阴极的荧光谱及同一个多碱阴极在工作和非工作两种状态下的荧光谱.测试结果表明,多碱阴极的荧光强度与其电子跃迁的几率及阴极灵敏度成正比,同时多碱阴极在工作状态下,荧光强度比非工作状态下有所降低,原因是一部分跃迁电子逸出多碱阴极产生光电发射,而这部分电子不再回到基态,因此不再发出荧光.另外本文还测量了多碱阴极在不同波长激光激发条件下的荧光谱.结果表明,长波激发与短波激发相比,长波激发所获得的荧光强度更高,这说明长波激发产生跃迁电子的几率高,同时荧光谱峰值波长与激光波长的偏移较小,因此跃迁电子数多且能量损失小,有利于光电发射.将多碱阴极的荧光谱与多碱阴极的量子效率相比较,看出跃迁电子数量和所处能级这两个对光电发射过程有影响的关键因素中,能级因素对光电发射过程的影响更大.但对多碱阴极而言,由于短波激发时的电子跃迁几率低于长波激发时的电子跃迁几率,跃迁电子扩散过程中的能量损失较大,因此短波的量子效率随波长的增加而增加.实践证明,光致荧光是研究多碱阴极光电发射过程的一种有效手段,通过对多碱阴极荧光谱的研究,进一步揭示了多碱阴极的光电发射的机理,为进一步改进工艺和提高多碱阴极的灵敏度提供了重要的参考价值.

**关键词:**多碱阴极;光致荧光;波长;量子效率

**中图分类号:**O462.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2012)12-1435-6

### 0 引言

多碱光电阴极(简称多碱阴极)是一种由  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$  膜层组成的多晶半导体阴极,尽管其阴极灵敏度低于  $\text{GaAs}$  单晶半导体阴极,但由于制造工艺简单、真空度要求低、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  $800 \mu\text{A}/\text{Lm}$  以上的水平,最高已经达到  $960 \mu\text{A}/\text{Lm}$ ,并且还有进一步提高的趋势.国内批量生产的超二代像增强器阴极灵敏度也达到了  $700 \mu\text{A}/\text{Lm}$  的水平,但与国外相比还有一定的差距.

多碱阴极灵敏度提高的原因是真空度、材料纯度得到进一步提高,工艺得到了进一步改进.不同的制作工艺导致不同的阴极灵敏度,说明工艺不同,材料结构也不同.根据光电发射理论,光电发射过程起

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真空界面,最后是电子克服表面势垒逸出.因此对多碱阴极光电发射过程的研究,应该从以上三个过程入手.对多碱阴极电子逸出过程的研究,可以采用测量其光谱响应长波截止波长的方法<sup>[1-5]</sup>,但对于电子跃迁过程和扩散过程的研究,目前还没有较有效的手段.多碱阴极必须保存在真空中,一旦暴露大气将很快损坏.如果要对多碱阴极进行原位分析,制造设备和分析仪器须通过真空连接起来,因此研究非常复杂.根据多碱阴极光电发射三过程的原理,要获得高的光谱响应,需要电子跃迁的几率高,电子亲合势低,同时电子扩散到真空界面的几率高.对多碱阴极而言,在对  $\text{Na}_2\text{KSb}$  表面进行 Cs 激活之后,其光电发射光谱响应曲线的长波截止波长是基本一定的,因此可以认为其电子亲合势也是一定的,在表面 Cs 激活过程相同的条件下,多碱阴极光谱响应的高低主要由电子跃迁过程和电子扩散过程所决定.要进一步提高多碱阴极的灵敏度,就

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:2012-06-25;修回日期:2012-07-17

要研究进一步改进制作工艺的方法,使  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层(简称  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层或阴极膜层)具有更高的电子跃迁几率和更高的几率扩散到真空界面. 本文探索了通过光致荧光的方法来表征多碱阴极  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层电子跃迁几率的方法,进一步揭示了多碱阴极光电发射过程的机理,为进一步改进工艺提供了重要的参考价值.

## 1 光致荧光的特点及测量

当某种物质受到入射光激发后,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的强度、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<sup>[6-7]</sup>. 又由于激光荧光光谱分析是一种非破坏性的方法,对测量样品无特殊要求,因此激光荧光光谱分析在半导体材料领域应用广泛.  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层是一种 p 型多晶半导体,其禁带宽度约为 1 eV. 当用激光激发  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层时,只要光子的能量大于其禁带宽度,价带电子就会被激发到导带,导带电子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  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层的电子跃迁过程. 又由于无论是激发光还是阴极膜层所发射的荧光均能穿透多碱阴极的玻璃窗,因此可以利用光致荧光来分析多碱阴极的电子跃迁过程.

图 1 为多碱阴极样品的结构原理图. 该样品采用像增强器多碱阴极的制作工艺制作,与像增强器不同之处为样品中没有微通道板(Micro-Channel Plate, MCP),仅仅为一只光电二极管,利用它可以

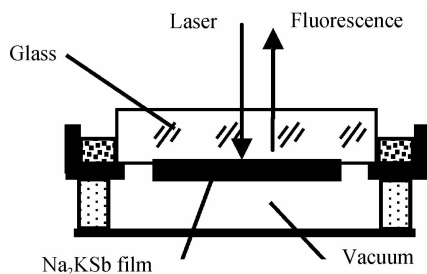


图 1  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层样品结构示意图  
Fig. 1 Sketch map of sample structure

测量  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层的光谱响应,因此可以将膜层的光谱响应与膜层的荧光光谱结合起来研究. 样品为玻璃输入窗,透过玻璃窗可以看到  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层,样品内部的真空度为  $1.33 \times 10^{-6}$  Pa. 对样品进行测试时,激光从玻璃窗外表面垂直入射,穿透玻璃后再入射到  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层,  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层在被激发之后发出荧光,而荧光透过玻璃窗后被信号探测器所接收,所接收的信号再经过光栅单色仪进行分光之后即可测量出  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层的荧光光谱.

采用英国雷尼绍公司(Renishaw)inVia 型号的显微拉曼光谱仪对  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层进行分析. 激发光源为激光器,激光波长分别为短波 514.5 nm 和长波 785 nm,对应光子的能量分别为 2.41 eV 和 1.57 eV,均大于  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层的禁带宽度,因此均可用来激发阴极膜层发光. 因为阴极膜层制作在玻璃窗(硼硅酸盐玻璃)上,激光通过玻璃后才能激发阴极膜层,因此激光在激发阴极膜层发光之前也会激发玻璃发光,这样测量仪器信号探测器既能接收到玻璃发出的荧光,也能接收到膜层发出的荧光. 为了在所测得的荧光光谱中准确区分玻璃的荧光峰和  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层的荧光峰,将有阴极膜层样品的荧光光谱与玻璃窗的荧光光谱相比较,两条荧光光谱中相同的部分为玻璃窗的荧光光谱,阴极膜层样品荧光光谱中有而玻璃窗荧光光谱中没有的部分才为阴极膜层的荧光光谱.

## 2 测试结果分析

### 2.1 荧光强度与阴极灵敏度关系

对 0240# 和 0150# 两个样品在同样条件下进行了测试,测试结果见图 2. 测量所用激光器的波长为 785 nm,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 500~1 000 nm. 由于在 785 nm 波长激光激发条件下,玻璃窗的荧光较阴极膜层的荧光弱得多,因此两个样品的荧光

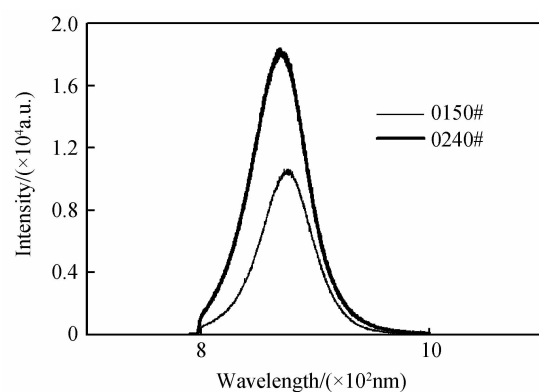


图 2 荧光光谱强度比较  
Fig. 2 Fluorescence intensities of different samples

谱曲线中都只有阴极膜层的荧光谱而没有出现玻璃窗的荧光谱. 图中强度较高的荧光谱为 0240 # 样品阴极膜层的荧光谱, 峰值波长为 866 nm, 其峰值荧光强度(简称荧光强度)为 18 022, 而强度较弱的荧光谱为 0150 # 样品阴极膜层的荧光谱, 峰值波长为 874 nm, 其荧光强度为 10 331. 而 0240 # 样品的阴极灵敏度为  $650 \mu\text{A}/\text{lm}$ , 0150 # 样品的阴极灵敏度为  $465 \mu\text{A}/\text{lm}$ , 所以说明阴极膜层的荧光强度反映阴极灵敏度的高低, 这是因为荧光强度反映阴极受光激发之后电子跃迁几率的大小.

对 7650 # 样品进行荧光测试, 测试条件与 0240 # 和 0150 # 两个样品的测试条件一样, 但在测试 7650 # 样品时, 共测量了两次. 第一次测量时, 样品不工作, 即样品的阴极和阳极之间不加电压; 而第二次测量时, 样品工作, 即在样品的阴极和阳极之间施加了 30 V 的直流电压, 其中阴极为零电位, 阳极为高电位, 这样在激光激发阴极膜层发光的过程中, 阴极膜层还有光电发射. 两次荧光的测量结果见图 3, 其中强度较强的荧光谱为第一次测量结果, 即样品未加工作电压时的荧光谱, 而强度较弱的荧光谱为第二次测量结果, 即样品加工作电压时的荧光谱. 比较两次测量结果不难发现, 两次测量荧光谱的峰值波长没有变化, 只是强度有所降低. 原因是当样品加电压时, 多碱阴极膜层产生的跃迁电子一部分逸出膜层表面进入真空形成光电流, 而这一部分跃迁电子就不再回到基态产生荧光, 因此造成所发射的荧光强度减小. 这充分说明荧光谱的强度反映电子的跃迁几率的大小, 而跃迁几率又反映了阴极的灵敏度.

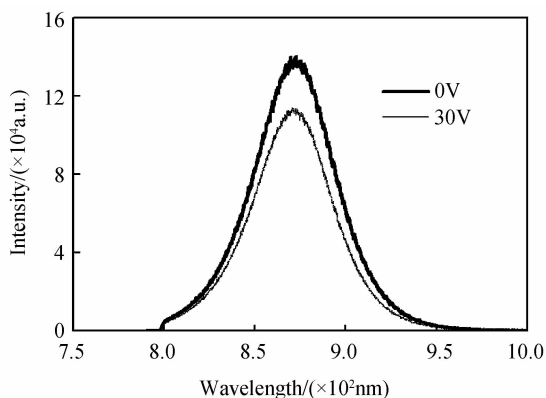


图 3 7650 # 样品的荧光谱( $\lambda=785 \text{ nm}$ )

Fig. 3 Fluorescence spectrum of sample 7650 # ( $\lambda=785 \text{ nm}$ )

为了比较不同波长激光激发条件下阴极膜层产生荧光的区别, 对 7650 # 样品再次采用 514.5 nm 波长的激光进行激发. 测量所用激光的功率为 20 mW, 探测器 CCD 曝光时间为 30 s, 累加次数为 1 次, 测量范围为 500~1 000 nm, 测量结果见图 4.

图 4 中看出, 在 514.5 nm 波长激光激发条件

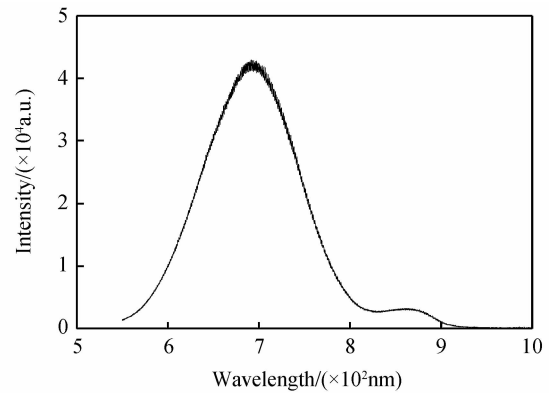


图 4 7650 # 样品的荧光谱( $\lambda=514.5 \text{ nm}$ )

Fig. 4 Fluorescence spectrum of sample 7650 # ( $\lambda=514.5 \text{ nm}$ )

下, 其荧光谱有两个荧光峰, 一个短波峰和一个长波峰. 短波峰的强度较强, 长波峰的强度较弱, 短波峰的峰值波长为 687 nm, 长波峰的峰值波长为 860 nm. 为了区别两个荧光峰中的哪一个为  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层的荧光峰, 对玻璃窗的荧光单独进行了测试. 图 5 是阴极玻璃窗(无多碱阴极膜层)的荧光谱, 该荧光谱仅有一个荧光峰, 峰值波长为 687 nm, 与图 4 相比较, 两荧光谱中均存在 687 nm 的荧光峰, 且强度相同, 说明图 4 中 687 nm 的短波荧光峰为玻璃窗的荧光峰. 而 860 nm 的长波峰在图 5 中未出现, 只是在图 4 中出现, 因此可以认为 860 nm 的荧光峰为  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层的荧光峰. 所以图 4 中的短波峰为玻璃的荧光峰, 长波峰为阴极膜层的荧光峰.

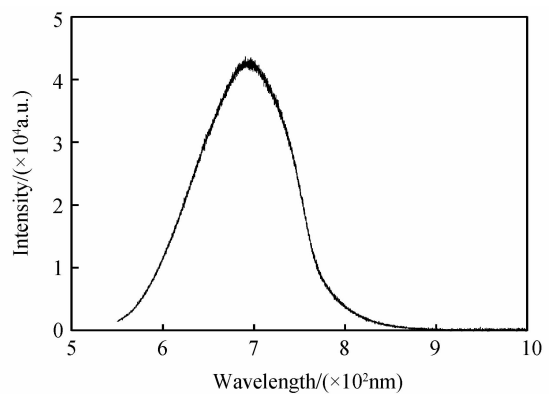


图 5 阴极玻璃窗荧光谱

Fig. 5 Fluorescence spectrum of glass window

将图 3 和图 4 作比较, 即比较 7650 # 样品在 514.5 nm 波长激光激发和 785 nm 波长激光激发条件下的荧光谱, 可以发现 785 nm 波长激光激发条件下的荧光强度较强, 而 514.5 nm 波长激光激发条件下的荧光强度较弱. 因为在 3 mW 功率的 785 nm 波长激光激发条件下, 所获得的荧光强度为 13 878, 而在 20 mW 功率的 514.5 nm 波长激光激发条件下, 所获得的荧光强度仅为 1 326, 相差一个

数量级. 如果假设荧光强度与输入功率成正比, 再考虑到入射功率的差别, 那么 785 nm 波长激发的荧光强度是 514.5 nm 波长激发荧光强度的近 66 倍. 这说明对多碱阴极膜层而言, 785 nm 长波激发比 514.5 nm 短波激发所获得的电子跃迁几率高.

表 1 是 7650# 样品在两种不同波长激光激发条件下的荧光测量数据. 表中  $\lambda_0$  表示激光的波长,  $I$  表示荧光的峰值强度,  $\lambda_1$  表示荧光的峰值波长,  $\Delta\lambda$  表示荧光峰值波长相对激光波长的偏移.

表 1 7650# 样品荧光测试结果

Table 1 Datum of fluorescence spectrum

$\lambda_0/\text{nm}$	$I/(\text{a. u.})$	$\lambda_1/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$
514.5	1 326	860	346
785	13 878	870	85

表 1 看出, 514.5 nm 波长激光激发条件下的荧光峰值波长为 860 nm, 荧光峰值波长相对激光波长偏移 346 nm, 而 785 nm 波长激光激发的荧光峰值波长为 870 nm, 荧光峰值波长相对激光波长偏移仅为 85 nm. 514.5 nm 波长对应的光子能量 2.41 eV, 785 nm 波长对应的光子能量为 1.58 eV, 860 nm 荧光峰值波长对应的光子能量为 1.44 eV, 而 870 nm 波长对应的光子能量为 1.42 eV. 因此以 514.5 nm 波长激光激发时, 激发光的光子能量与荧光的光子能量差为 0.97 eV, 而以 785 nm 波长激光激发时, 激发光的光子能量与荧光的光子能量差为 0.16 eV. 这说明长波激发时, 光子的能量损失小, 光子能量的利用率较高, 而短波激发时, 光子的能量损失大, 光子能量的利用率较低. 同时由于长波激发与短波激发相比, 荧光的强度较低, 因此从电子跃迁的角度讲, 长波光产生跃迁电子的几率较短波光产生跃迁电子的几率大. 原因是光子的能量越高, 所激发的电子来自的能级越深, 能量损失越大, 因此电子跃迁的几率越低. 反之, 在光子能量大于阴极膜层禁带宽度的条件下, 光子能量越低, 所激发的电子来自的能级越浅, 能量损失越小, 因此电子跃迁的几率越高. 由于跃迁电子需要有足够高的能量克服表面势垒才能逸出阴极表面, 因此长波光产生跃迁电子的几率高并不一定意味着阴极的量子效率高. 只有跃迁的电子数量多且所处的能级较高时, 量子效率才可能高. 尽管 785 nm 长波产生更多的跃迁电子, 但其跃迁电子的能级低于 514.5 nm 短波跃迁电子的能级; 而 514.5 nm 短波激发产生的跃迁电子数少, 但其跃迁电子的能级相对又较高, 因此 514.5 nm 和 785 nm 两种波长量子效率的高低只能通过实测来确定.

图 6 中曲线 a 是 7650# 样品多碱阴极量子效

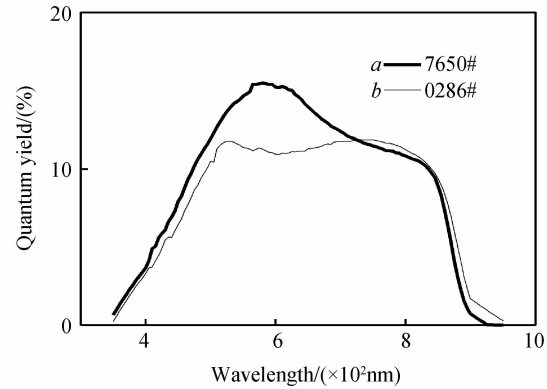


图 6 阴极量子效率曲线

Fig. 6 Quantum efficiency of photocathode

率曲线, 该曲线采用南京理工大学研制的自动光谱响应测试仪测得. 图中看出, 514.5 nm 波长的量子效率为 13%, 而 785 nm 波长的量子效率为 11%. 需要说明的是 514.5 nm 波长的反射率为 16.6%, 而 785 nm 波长的反射率为 10.8%, 短波的反射率高, 吸收率低. 所以尽管 785 nm 波长的荧光强度是 514.5 nm 波长荧光强度的 66 倍, 而 514.5 nm 波长跃迁电子的能级仅仅比 785 nm 波长跃迁电子的能级高 0.02 eV, 514.5 nm 波长的量子效率就高于 785 nm 波长的量子效率, 所以对光电发射过程而言, 在跃迁电子的数量和能级两者间比较, 能级大小对光电发射量子效率的影响更大.

## 2.2 荧光谱与量子效率谱关系

根据讨论可知阴极膜层的荧光强度与其电子跃迁几率密切相关, 而电子跃迁几率又与阴极量子效率密切相关, 因此可以通过研究阴极膜层的荧光谱来研究阴极的量子效率. 从图 6 中曲线 a 看出, 多碱阴极的量子效率在 580 nm 处获得最大, 并且在最大值的两边, 曲线的形状并不对称, 量子效率随波长的变化从左到右大致可以分为三个区间. 第一区间位于量子效率最大值的左边, 范围为 350~580 nm, 第二区间位于量子效率最大值的右边, 范围为 580~830 nm, 第三区间也位于量子效率最大值的右边, 范围为 830~925 nm. 三个区间量子效率随波长变化的斜率不一样, 第三区间量子斜率随波长变化的斜率最大, 第一区间次之, 第二区间最小. 在第三区间, 阴极的量子效率从 830 nm 的 10% 在不到 100 nm 范围内下降到零. 这是因为多碱阴极的逸出功约为 1.34 eV, 对应的长波截止波长为 925 nm, 波长大于这一波长的光子不会产生光电发射, 当光子的能量接近逸出功时, 产生光电发射的几率很快下降, 因此量子效率在这一区间下降很快. 而在第二区间, 量子效率从 580 nm 的 15% 在 200 nm 范围内下降到 830 nm 的 10%. 在这一区间, 量子效率随波长

的增加而减小,原因是波长越长,跃迁电子的能量越低,因此逸出的几率越低,量子效率也越低.但在第一区间,量子效率的变化与第二区间和第三区间相反,量子效率随波长的增加而增加,波长越长,光子能量越低,量子效率也越高.原因之一是波长越短,光吸收的深度越浅,跃迁电子距真空界面的距离越远,因此能够扩散到真空界面的几率越小,自然量子效率越小.原因之二是因为阴极膜层在长波和短波激发条件下的电子跃迁几率不一样,波长越短,所激发跃迁电子的几率越小.如 514.5 nm 波长激发的电子跃迁几率低于 785 nm 波长激发的电子跃迁几率.

图 6 中曲线 a 和 b 是 7650 # 样品和 0286 # 样品的阴极量子效率曲线,0286 # 样品与 7650 # 样品相比较,其阴极膜层的厚度增加了 25%. 图中看出,随着阴极膜层厚度的增加,0286 # 样品的阴极量子效率在第二区间下降很多,但在第一区间和第二区间变化不大.第三区间的量子效率稍有增加,这是因为阴极膜层厚度增加之后,对长波的光吸收有所增加,因此量子效率有所增加.而在第二区间,由于阴极膜厚增加,跃迁电子扩散到真空界面的距离有所增加,导致跃迁电子的能量有所下降,从而导致量子效率下降很多.而在第一区间,尽管跃迁电子扩散到真空界面的距离有所增加,但由于跃迁电子的能量较高,所以当扩散到真空界面时,仍有足够能量逸出阴极表面,因此量子效率的降低较小,并且波长越短,量子效率降低越小,并且当波长接近短波阈值波长时,量子效率基本未变.

在多碱阴极的应用过程中,为了提高多碱阴极的短波响应,常常采用减小多碱阴极膜层厚度的方法来提高阴极膜层对短波的响应.尽管多碱阴极的厚度做得很薄,但对短波的响应仍然低于  $K_2CsSb$  阴极膜层,说明材料不同,对不同光谱的电子跃迁几率不同,因此对光谱的响应也不同.由于条件的限制,本文只研究了多碱阴极在 514.5 nm 和 785 nm 两种激光波长激发条件下的荧光谱,而多碱阴极的光谱响应范围在 350~925 nm 之间,如果在 350~950 nm 波长范围内连续对多碱阴极的荧光谱进行研究,那么对多碱阴极光电发射机理认识会更加全面和深入.另外南京理工大学常本康、钱芸生教授在多碱阴极的研究过程中采用了多信息量监控技术<sup>[8-10]</sup>,即在多碱阴极制作过程中,实时的对多碱阴极的光谱响应、光学反射率和光电流等参量进行了监控,充分揭示了多碱阴极光电发射的客观规律,对提高多碱阴极的灵敏度起到了积极的推动作用.因此如果在多信息量监控技术中再增加荧光监控手

段,对不同工艺制作的多碱阴极进行测试,就能总结出能制作更高电子跃迁几率的工艺,从而进一步提高多碱阴极的量子效率和提高微光像增强器的性能.

### 3 结论

1) 荧光强度反映多碱阴极电子跃迁几率的大小,荧光谱的峰值波长反映跃迁电子所处能级的高低.在多碱阴极有光电发射的条件下,其荧光强度较无光电发射条件下的荧光强度有所降低,原因是跃迁电子中的一部分逸出多碱阴极产生光电发射后,这部分电子不再回到基态,因此不再发出荧光.因此光致荧光是一种分析光电发射过程的有效的手段.

2) 多碱阴极的荧光越强,说明其电子跃迁的几率越高,因此其阴极的灵敏度也越高.但决定阴极灵敏度高低的因素除跃迁电子的数量之外,跃迁电子所处的能级也是一个关键因素.在跃迁电子数量和所处能量两个对光电发射过程有影响的关键因素中,能级因素对光电发射过程的影响更大.

3) 对多碱阴极而言,由于短波激发时的电子跃迁几率相对于长波小,光子的能量损失大,另外又由于跃迁电子扩散过程中的能量损失也较大,因此短波的量子效率随波长的增加而增加.减小多碱阴极膜层的厚度,可以进一步提高多碱阴极短波的量子效率,但提高的幅度有限.多碱阴极的材料特性决定了多碱阴极对短波电子跃迁几率低,能量损失大,因此短波响应低.

4) 在多碱阴极的研究过程中,采用多信息量监控技术,对认识多碱阴极的光电发射过程起到了积极的作用.如果在多信息量监控技术中再增加荧光监控手段,对不同工艺制作的多碱阴极进行测试,总结出能制作更高电子跃迁几率的工艺,从而进一步提高多碱阴极的量子效率和提高微光像增强器的性能.

#### 参考文献

- [1] LIN Juan, YANG Pei-zhi, HUA Qi-lin. Preparation and optics band gap characterization of si-rich silicon nitride thin films [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, **33**(6): 596-600.  
林娟, 杨培志, 化麒麟. 富硅氮化硅薄膜的制备及其光学带隙研究[J]. *发光学报*, 2012, **33**(6): 596-600.
- [2] MA Zi-guang, WANG Wen-xin, WANG Xiao-li, et al. The optical and electrical properties of gan epitaxial films with  $SiN_x$  interlayers inserted at different position[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(10): 1014-1019.  
马紫光, 王文新, 王小丽, 等.  $SiN_x$  插入层的生长位置对 GaN 外延薄膜性质的影响[J]. *发光学报*, 2011, **32**(10): 1014-1019.
- [3] GAO Zhen-jie, YANG Yuan-zheng, XIE Zhi-wei, et al. Structural and photoluminescence properties of Eu-doped ZnO

- thin films grown by RF magnetron sputtering [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(10): 1004-1008.
- 高振杰, 杨元政, 谢致薇, 等. 射频磁控溅射法制备的 Eu 掺杂 ZnO 薄膜的结构及其发光性质 [J]. *发光学报*, 2011, **32**(10): 1004-1008.
- [4] ZHENG Hai-rong, GAO Dang-li, GAO Wei, *et al.* Controlling the fluorescence emission of rare earth doped nanocrystals [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, **33**(2): 115-121.
- 郑海荣, 高当丽, 高伟, 等. 稀土掺杂纳米晶体荧光发射性质的调控 [J]. *发光学报*, 2012, **33**(2): 115-121.
- [5] NI Qi-liang, BU Shao-fang, LIU Shi-jie, *et al.* Preconditioning experiment research of microchannel plate photon counting imaging detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 658-663.
- 尼启良, 卜绍芳, 刘世界, 等. 微通道板光子计数成像探测器预处理实验研究 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 658-663.
- [6] DU YU-jie, DU Xiao-qing, CHANG Ben-kang, *et al.* Study on transmission-mode Ga<sub>99</sub>As photocathode spectral response characteristic in activation platform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1792-1794.
- 杜玉杰, 杜晓晴, 常本康, 等. 激活台内透射式 GaAs 光电阴极的光谱响应特性研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1792-1794.
- [7] LIU Lei, CHANG Ben-kang. Spectral response characteristics numerical simulation of Super S25 and New S25 photocathode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 613-616.
- 刘磊, 常本康. Super S25 与 New S25 光电阴极的光谱响应特性的数值模拟. *光子学报*, 2004, **33**(5): 613-616.
- [8] DU Xiao-qing, ZONG Zhi-yuan, CHANG Ben-kang. Spectral response measurement and analysis of GaAs photocathode stability [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 939-941.
- 杜晓晴, 宗志园, 常本康. GaAs 光电阴极稳定性的光谱响应测试与分析 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 939-941.
- [9] XIA Zheng-rong, LI Rong-qing. Fluorescence enhancement of CdTe nanocrystals induced by Ag/TiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 166-169.
- 夏峥嵘, 李荣青. 银/二氧化钛核壳纳米颗粒对碲化镉纳米晶的荧光增强研究 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 166-169.
- [10] CHEN Dong, ZHANG Bo-kun, HU Xie, *et al.* Research on the high resolution trace Gas detection based on the difference-frequency mid-infrared spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 678-683.
- 陈东, 张伯昆, 胡燮, 等. 基于差频中红外激光的痕量气体高分辨光谱检测研究 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 678-683.

## Photoemission Mechanism of Multi-alkali Photocathode by Photoluminescence

LI Xiao-feng<sup>1, 2</sup>, YANG Wen-bo<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, QIU Yong-sheng<sup>2</sup>

(1 *The Key Laboratory on Night Vision Technology, Xian 710065, China*)

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

**Abstract:** The characteristics of multi-alkali photocathode and its application in low light level image intensifier are introduced, the principle of light induced fluorescence is described, the method to study electron transition probability of Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb cathode film by use of light induced fluorescence is explored, and the fluorescence spectrum of two different cathodes in the states of work and non work are measured respectively. The test results show that, the fluorescence intensity of cathode is proportional to both its electronic transition probability and sensitivity, at the same time fluorescence intensity in work states declines compared to that in non work states. The reason is that part of the transition electrons escape from cathode surface and produce photoelectric emission. These transition electrons do not return to the ground state, therefore they do not emit fluorescence no longer. In this paper the fluorescence spectrum of cathode is also measured excited at different wavelengths of incident light. The results show that, compared with short waves excitation, long waves excitation can obtain higher intensity, which shows long waves excitation can get higher transition electron probability as well; at the same time wavelength shifts between fluorescence peak wavelength and excitation light wavelength is smaller; therefore, the energy loss is small, the photoelectric emission is more favorable. Compared the fluorescence spectrum with multi-alkali photocathode quantum efficiency, it can be concluded that transition electron energy level plays more important role in the process of photoelectric emission between transition electron number and the energy level. As to the multi-alkali cathode, due to electron transition probability of short wave excitation is relatively small, and energy loss of the transition electron diffusion process is bigger, therefore the short-wave quantum efficiency decreases as wavelength decreases. Practice has proved that the photoluminescence is an effective study way of cathode photoemission process, through the study of cathode fluorescence spectrum the cathode photoelectric emission mechanism is further revealed. This provides important reference value for further improving the process and raising the cathode sensitivity.

**Key words:** Multi-alkali photocathode; Photoluminescence; Wavelength; Quantum efficiency