

doi: 10.3788/gzxb20134201.0007

超二代像增强器多碱阴极光电发射特性研究

李晓峰^{1,2}

(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:通过测量超二代像增强器多碱阴极的光谱反射率和透射率,根据能量守恒定律计算得到了多碱阴极的光谱吸收率.结果表明,只有当光子的能量大于 1.333 eV 以后,多碱阴极的吸收率才开始快速增大.这说明多碱阴极的光谱吸收存在一个 1.333 eV 的长波吸收限,入射光的光子能量如果小于该吸收限,多碱阴极将不吸收.在多碱阴极的表面电子亲和势进一步降低的情况下,多碱阴极光电发射的长波理论阈值由长波吸收限所决定.多碱阴极在吸收光子之后的电子跃迁过程中,跃迁电子的能量增加小于所吸收入射光子的能量,即存在一个“能量损失”.光子的能量越高,所激发的跃迁电子所处的能级越高,能量损失越大.同时光子的能量越高,跃迁电子所处的能级越高,电子跃迁的几率越低.多碱阴极的量子效率由吸收率、跃迁几率和跃迁能级、扩散过程中的能量损失等因素共同决定,因此多碱阴极的量子效率存在长波阈的同时也存在短波阈.多碱阴极的量子效率在 2.11 eV 达到最大值之后,随着光子能量的增加而单调减小,在 3.6 eV 时,量子效率减小到零.多碱阴极在 3.6 eV 时的吸收系数仍然很高,但由于电子跃迁的几率低,同时电子扩散过程中的能量损失大,导致尽管多碱阴极对短波具有较高的吸收系数,但量子效率仍然较低.因此对多碱阴极所吸收的光子能量中,转换为光电导、晶格热振动等其他非光电发射形式能量的比例而言,短波较长波高,对光电发射的贡献率而言,短波较长波低.

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)01-0007-6

Photoemission Process Study of Multi-alkali Photocathode in the Super Second Generation Image Intensifier

LI Xiao-feng^{1,2}

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

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

Abstract: Multi-alkali photocathode in super generation image intensifier is different from previous multi-alkali photocathode between the production processes, so the photoelectric emission characteristics are different from previous multi-alkali photocathode. In this paper, through the measurement of multi-alkali photocathode spectral reflectivity and transmissivity, according to the law of conservation of energy, cathode spectral absorption rate was obtained. Spectral absorption rate indicates that, only when the photon energy greater than 1.333 eV, cathode absorption rates began to increase quickly. The cathode spectral absorption shows that cathode will not absorb any photons if light incident photon energy is less than the absorption limit, i. e. 933 nm wave absorption limit. In the cathode surface electron affinity further reduced circumstances, cathode photoemission long wave theory threshold is determined by long-wave absorption limit. In the electronic transition process after absorption of a photon, transition energies increase less than the absorption of the incident photon energy, i. e. the presence of an

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:2012-08-22;录用日期:2012-09-29

“energy loss”. The higher energy of a photon is, the higher electronic transition energy level is, the more energy loss is. At the same time, the higher energy of a photon is; the higher-energy level transition electron, the lower electronic transition probability is. Photocathode quantum efficiency is determined by the absorption rate, the transition probability and transition level, energy loss of diffusion process and other factors, thus photocathode quantum efficiency is in the presence of long wave threshold and shortwave threshold also. Photocathode quantum efficiency in 587 nm reaches the maximum value, after that decreases with the photon energy increases, when 3.6 eV, the quantum efficiency is reduced to zero. Cathode in photon energy of 3.6 eV the absorption coefficient is still high, but due to the electronic transition probability is low, while the electron diffusion process of energy loss is big, thus in spite of cathode on lower wavelength has high absorption coefficient, but the quantum efficiency is still low. Therefore on shortwave, cathode absorbed shortwave photon energy is converted into a photoconductive, lattice vibration and other forms of energy; the photoelectric emission utilization rate is very low.

Key words: Multi alkali photocathode; Image intensifier; Photoemission; Electron transition; Quantum yield

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.由于多碱阴极的灵敏度不断提高,使超二代像增强器的信噪比、分辨力等性能参量也随之提高,因此使得超二代像增强器的应用仍然十分广泛.所以仍有必要进一步提高超二代像增强器的性能,其中主要是提高多碱阴极的灵敏度.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^[1-4].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 Na_2KSb 基底表面进行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.电子的跃迁过程严格来讲包括对光子的吸收过程和跃迁过程.只有阴极膜层对光子进行吸收,才有可能激发价带电子跃迁到导带.没有光吸收,就不会产生跃迁电子,更不会有光电发射^[5-10].但仅有光吸收,如果没有电子跃迁或电子的

跃迁几率低,那么也不会有高的量子效率.要进一步提高多碱阴极的量子效率,就要进一步研究多碱阴极光吸收和电子跃迁的规律,这样才能为制作具有更高的电子跃迁几率的 Na_2KSb 阴极膜层提供理论指导,因此有必要进一步研究多碱阴极 Na_2KSb 膜层的电子跃迁的过程和光电发射过程的机理.南京理工大学常本康教授详细研究过多碱阴极的光学反射率、量子效率等方面的特性,并利用计算机模拟技术分析不同种类多碱阴极的特征参量,为进一步研究多碱阴极的光电发射过程奠定了良好的基础^[11].超二代像增强器多碱阴极与二代像增强器多碱阴极相比,由于阴极灵敏度不相同,因此其光电发射过程也会有所区别,所以在原有研究成果的基础上,利用光谱吸收和光致荧光谱来进一步研究多碱阴极的电子跃迁过程,对丰富多碱阴极的理论体系,提高超二代像增强器多碱阴极的灵敏度仍具有重要的现实意义.

1 多碱阴极光谱吸收特性分析

多碱阴极是一层薄膜,一般制作在玻璃窗上,通过真空蒸发化学反应合成的方法制作.另外多碱阴极必须保存在真空中,一旦暴露于大气中,会很快损坏.在超二代像增强器中,玻璃外表面的一端是大气,内表面一端是真空, Na_2KSb 阴极膜层就制作在玻璃窗内表面,结构如图1.光电发射的原理是垂直入射的入射光穿透玻璃并到达 Na_2KSb 阴极膜层, Na_2KSb 阴极膜层吸收光之后产生跃迁电子,跃迁电子扩散到膜层界面并逸出到真空产生光电流.然而当入射光入射到光电阴极时,存在过程较复杂的反射和干涉过程,因此入射的光线不可能全部被多碱阴极膜层所吸收.入射的光线除一部分被阴极膜层吸收外,其余的不是被反射就是被透射.

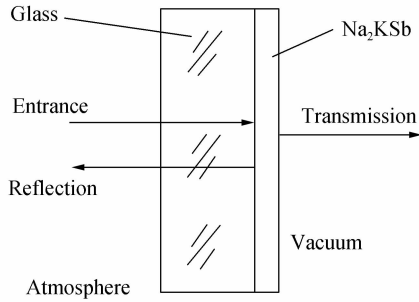


图1 多碱光电阴极结构

Fig. 1 Diagram of multi-alkali photocathode structure

多碱阴极膜层是一种半导体薄膜,其光学性质可由复折射率 n_c 来描述。 n_c 的实部和虚部分别是折射率 n 和消光系数 k , 它们的关系为

$$n_c = n + ik \quad (1)$$

$$n^2 = \epsilon_1 \{ [1 + \sigma^2 (2\pi\nu\epsilon_0\epsilon_1)^{-2}]^{\frac{1}{2}} + 1 \} / 2 \quad (2)$$

$$k^2 = \epsilon_2 \{ [1 + \sigma^2 (2\pi\nu\epsilon_0\epsilon_1)^{-2}]^{\frac{1}{2}} - 1 \} / 2 \quad (3)$$

式中, σ 为多碱阴极的电导率, ϵ_1 为复介电常量的实部, ϵ_2 为复介电常量的虚部, ϵ_0 为真空介电常量, ν 为入射光的频率。当一束平面光波沿阴极膜层厚度 x 的方向传播时, 电场强度 E 的指数衰减形式为

$$E = E_0 e^{-i\omega(t - \frac{x}{c} - i\frac{x}{c})} \quad (4)$$

式中, ω 为光子的角频率, c 为光速, E_0 为多碱阴极膜层表面的初始场强。另外反射率具有如下形式

$$R = [(n-1)^2 - k^2] / [(n+1)^2 + k^2] \quad (5)$$

对多碱阴极而言, 由于其折射率和消光系数均是入射光频率的函数, 因此对不同波长入射光的反射和吸收均不相同。根据能量守恒定律, 入射光能量等于吸收光能量、反射光能量和透射光能量之和, 因此测量出多碱阴极的光谱反射和光谱透射以后, 就可以计算出多碱阴极的光谱吸收。对超二代像增强器多碱阴极的光谱反射率和光谱透过率, 可采用 Lambda950 分光光度计进行测量, 测量范围为 350~1 200 nm, 环境温度为 22℃。图 2 是典型超二代像增强器多碱阴极样品的实测光谱反射曲

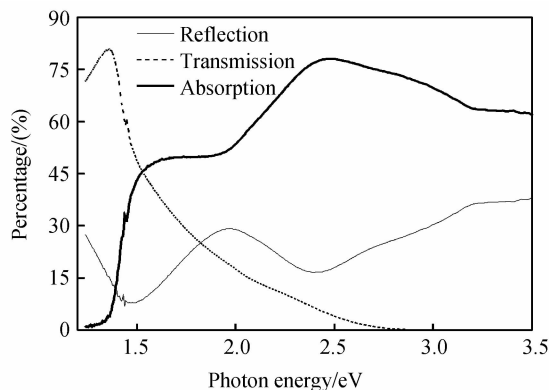


图2 光谱反射、透射和吸收曲线

Fig. 2 Reflection, transmission and absorption

线、光谱透过率曲线和光谱吸收率曲线, 该样品的阴极膜层采用典型的超二代像增强器多碱阴极制造技术制作。其中光谱反射率和光谱透过率为实际测量结果, 光谱吸收率为根据实测光谱反射率和光谱透过率的计算结果。

从图 2 看出, 由于多碱阴极的折射率和消光系数均与波长有关, 因此不同波长光子的光谱反射率、透射率和吸收率并不相同。另外由于多碱阴极的反射光存在干涉作用, 因此在反射曲线上存在干涉加强峰和干涉减弱峰, 同时由于存在光吸收, 使得光谱反射率曲线上干涉峰的高度不相等, 造成曲线形状不规则。透射率似乎不受反射率的影响, 遵循一条指数衰减的规律。透射率曲线在 2.83 eV 以上, 对应光子波长在 538 nm 以下, 所入射的光线没有透射, 除被反射光之外, 全部被吸收, 没有透过。说明在不考虑反射的条件下, 对确定厚度的多碱阴极, 短波的吸收长度小于长波的吸收长度。另外从图 2 中还可看出, 透过率曲线在 1.36 eV 处有一个最大值, 透过率达到 81%。光子能量小于和大于 1.36 eV 均导致透过率减小。光子能量小于 1.36 eV 时透过率减小的原因是当光子能量小于 1.36 eV 以后, 即波长小于 911 nm 之后, 多碱阴极的反射率增大, 由此造成透过率减小, 见图 2。另外从图 2 中还可看出, 由于受到光谱反射的影响, 多碱阴极的吸收曲线不是一条规则的指数上升的曲线。随着光子能量从 1eV 开始逐步增大时, 吸收率也随之增大, 但增大的速率不一样, 见图 3。

图 3 是图 2 中多碱阴极吸收率曲线光子能量从 1.25 eV 至 1.75 eV 之间的局部放大图。从图 3 中看出, 当光子能量小于 1.333 eV 时, 吸收率小于 3%, 并且增加的速率很慢。当光子的能量大于 1.333 eV 以后, 吸收率迅速增大, 并且速率增加的很快, 是光子能量小于 1.333 eV 时的 10.6 倍。说明多碱阴极的光吸收在光子能量大于和小于 1.333 eV

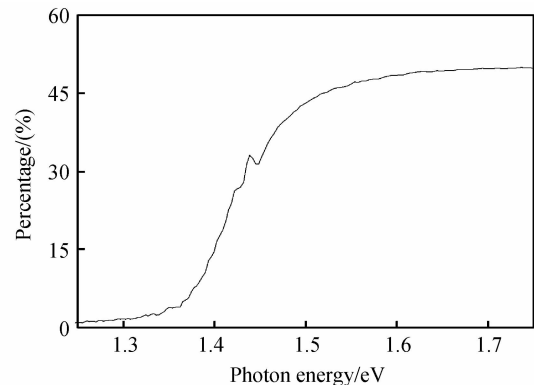


图3 光谱吸收曲线

Fig. 3 Absorption of cathode film

(对应波长 930 nm)时的情况不一样. 尽管多碱阴极的禁带宽度为 1 eV, 而理论上讲能量大于 1 eV 的光子均可以激发价带电子发生跃迁, 因此都会产生光吸收, 但由于光子能量小于 1.333 eV 时吸收率很小, 因此可以认为 1.333 eV 是多碱阴极的吸收限. 当光子能量大于 1.333 eV 以后, 多碱阴极的吸收率迅速增大, 在光子能量达到 1.619 eV 之后, 多碱阴极的吸收率达到 49%, 并且在 1.619 eV 和 1.850 eV 之间保持不变, 见图 4. 当光子能量大于 1.850 eV 以后, 多碱阴极的吸收系数随光子能量的增加而增加, 当光子能量达到 2.48 eV 时, 多碱阴极的吸收率也达到最大, 吸收率为 78%. 之后随着光子能量的增加, 吸收率不增反降.

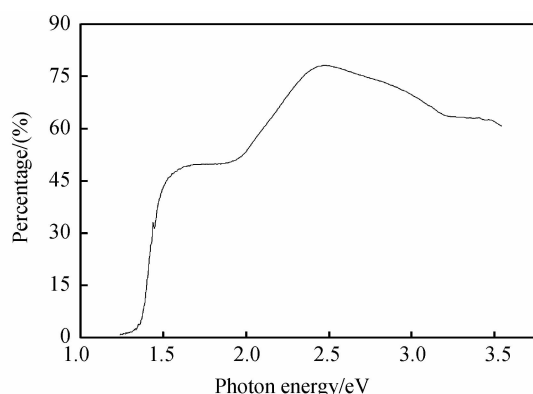


图 4 光谱吸收曲线

Fig. 4 Absorption of cathode film

由于实测超二代微光像增强器的多碱阴极光谱吸收存在一个光子能量为 1.333 eV 的长波吸收限, 因此意味着多碱阴极对小于 1.333 eV 能量的光子将不吸收. 多碱阴极的禁带宽度约为 1 eV, 理论上讲只要光子的能量大于 1 eV, 均可能激发电子跃迁. 但由于多碱阴极存在长波吸收限, 因此只有光子能量大于 1.333 eV 的光子才能激发多碱阴极发生电子跃迁. 多碱阴极的表面电子亲合势约为 1.34 eV, 与多碱阴极的长波吸收限基本相等. 当多碱阴极的表面电子亲合势进一步降低时并且低于其长波吸收限时, 其光电发射的长波阈值就不再取决于表面电子亲合势, 而是取决于多碱阴极的吸收限, 此时进一步降低电子亲和势不会延伸长波限.

2 多碱阴极电子跃迁特性分析

多碱阴极在吸收光子之后, 跃迁的光电子如果不逸出多碱阴极表面, 那么其最终将回到基态. 在此过程中, 跃迁电子的能量将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. 通过测量发光

体发出荧光的强度、峰值波长、半峰宽等参量, 可以分析出发光体内部跃迁电子所处能级的高低和跃迁电子数量等方面的信息. 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. 图 5 为利用光致荧光测量多碱阴极电子跃迁过程的结构原理图. 该样品尽管仅为一只光电二极管, 没有 MCP, 但制作工艺与超二代像增强器的制作工艺一样.

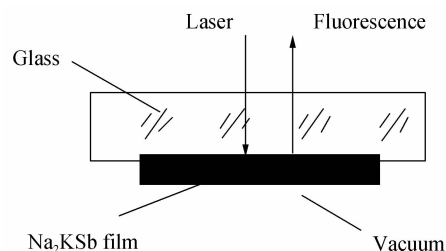


图 5 Na_2KSb 膜层样品结构

Fig. 5 Sketch map of sample structure

样品为玻璃输入窗, 透过玻璃窗可以看到 Na_2KSb 膜层, 样品内部的真空度为 133.32×10^{-8} 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 Na_2KSb 阴极膜层, Na_2KSb 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 Na_2KSb 阴极膜层的荧光光谱. 采用英国雷尼绍公司 (Renishaw) inVia 型号的显微喇曼光谱仪对 Na_2KSb 阴极膜层进行分析. 典型的 0244 # 超二代像增强器多碱阴极样品在 785 nm 波长激光激发条件下所测得的荧光光谱见图 6. 因为多碱阴极荧光光谱的峰值波长反映跃迁电子的能级高低, 而荧光光谱的峰值强度却反映跃迁电子的数量或几率. 根据测不准原理, 荧光光谱的半峰宽在某种程度上还反映跃迁电子在该跃迁能级上的寿命. 因此通过研究多碱阴极在不同波长激光激发条件下

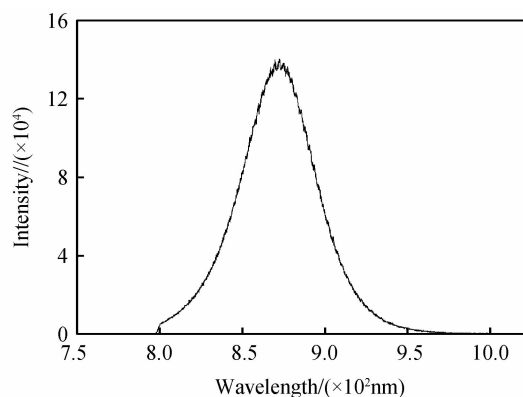


图 6 0244 # 样品的荧光光谱

Fig. 6 Fluorescence spectrum of sample 0244 #

的荧光谱,可以获得多碱阴极在吸收不同波长光子条件下电子跃迁方面的信息.

表 1 是 7650# 超二代像增强器在短波 514.5 nm 和长波 785 nm 波长两种激光激发条件下所测得的荧光谱的数据以及根据图 4 所得到的多碱阴极在 514.5 nm 波长和 785 nm 波长条件下的光谱吸收数据.表中 λ_0 表示激光的波长, ν_0 表示激光波长对应的光子能量, α 表示吸收率, I 表示荧光的峰值强度, ν_1 表示荧光的峰值波长所对应的光子能量, ΔE 为激光光子能量与荧光峰值波长所对应光子能量的差别.

表 1 7650# 样品荧光测试结果

Table 1 Datum of fluorescence spectrum

λ_0/nm	ν_0/eV	$\alpha/(\%)$	$I/(\text{a. u.})$	ν_1/eV	$\Delta E/\text{eV}$
514.5	2.41	77.1	1 326	1.44	0.97
785	1.58	47.6	13 878	1.43	0.16

从表 1 看出, Na_2KSb 膜层在 514.5 nm 波长入射光激发条件下,吸收率高达 77.1%,但荧光强度仅为 1 326.而在 785 nm 波长入射光激发条件下,吸收率虽仅为 47.6%,但荧光强度却高达 13 878.另外,需要说明的是测量荧光时,514.5 nm 波长激光的入射功率为 20 mW,而 785 nm 激光的入射功率仅却为 3 mW.考虑到 514.5 nm 波长的入射功率高于 785 nm 波长入射功率,是 785 nm 入射功率的 6.67 倍,因此可以认为对多碱阴极而言,尽管对短波的光吸收高于对长波的光吸收,但短波激发电子跃迁的几率却低于长波激发电子跃迁的几率.另外 514.5 nm 波长激发时的荧光峰值波长光子的能量为 1.44 eV,与荧光峰值波长光子的能量之差为 0.97 eV.而 785 nm 波长激光激发的荧光峰值波长对应的光子能量为 1.58 eV,与荧光峰值波长所对应光子的能量差为 0.16 eV.这说明 Na_2KSb 阴极膜层在低能光子激发产生跃迁电子时,能量损失小,而高能光子激发产生跃迁电子时,能量损失大.

对超二代像增强器多碱阴极而言,从光子吸收的角度看,波长越短,吸收率越高.但由于光子的能量越高,所激发的光电子所处的能级也越高,因此电子跃迁的几率越低,光子的能量损失越大.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,所激发的光电子所处的能级越低,光子的能量损失越小,电子跃迁的几率越高.高能级的电子跃迁几率小于低能级的电子跃迁几率这一试验结果与波尔兹曼统计分布定律相一致,因此这一现象也可以用波尔兹曼统计分布定律来解释.由于入射光子的能量越高,电子跃迁的能级越高,跃迁电子的数量越少,在跃迁电子数量、所处能级高低以及电子扩散过程中的能量损失等多种因素的共同作用下,造成

多碱阴极的量子效率在达到最大值之后,随着入射光子能量的增加而减小.当达到 3.6 eV 之后,量子效率极低,不再有光电发射.多碱阴极对短波光子的吸收较高,但电子跃迁的几率小,同时量子效率低,说明多碱阴极对短波吸收的大部分光能对光电发射没有贡献,而是主要贡献给了光电导、晶格热振动或其他形式的能量转换.

3 多碱阴极量子效率特性分析

图 7 是典型的超二代像增强器的阴极量子效率曲线.量子效率曲线采用南京理工大学研制的自动光谱响应测试仪测得,测量范围为 350~1 000 nm.实测多碱阴极量子效率曲线表明,多碱阴极的光电发射除存在长波限之外,还存在短波限.存在长波限是因为多碱阴极表面存在逸出功.而存在短波限的原因是短波的电子跃迁几率随光子能量的增加而降低.另外光电子在扩散过程中的能量损失也是一个重要因素.阴极的膜层越厚,光电子在扩散过程中的能量损失越大,对短波限的影响也越大.多碱阴极的逸出功为 1.34 eV,因此多碱阴极光电发射的长波限约为 925 nm,理论计算值与实测值相一致,而实测多碱阴极的量子效率短波限约为 344 nm.多碱阴极的量子效率除存在长波限外和短波限之外,还存在一个最大值,约在 587 nm 处.多碱阴极量子效率的高低取决于跃迁电子的数量和所处能级的高低.对 0288# 样品而言,514.5 nm 波长的量子效率为 12.7%,而 785 nm 波长的量子效率为 12.3%,说明尽管 785 nm 长波产生更多的跃迁电子,但因其跃迁电子的能级低于 514.5 nm 短波跃迁电子的能级,因此 514.5 nm 波长的量子效率高于 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,能级的高低对光电发射量子效率的影响更大.只有跃迁电子的数量多且所处的能级较高时,量子效率才可能高.

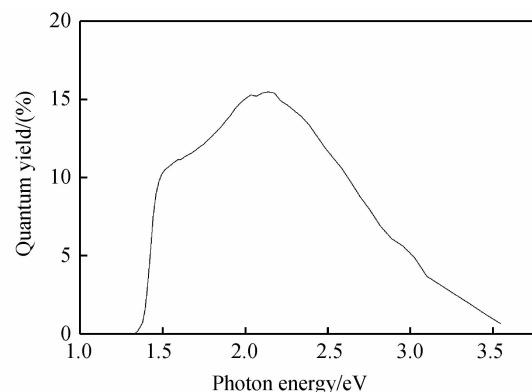


图 7 量子效率与吸收率

Fig. 7 Quantum yield of multi alkali cathode

图7中,随着光子能量的增加,当光子能量达到多碱阴极的吸收限时,多碱阴极开始有光吸收,当光子的能量大于多碱阴极表面电子亲合势之后,多碱阴极开始有光电发射,之后随着光子能量的增加,由于跃迁电子的能级增加,尽管此时跃迁电子的数量减小,但在跃迁电子所处的能级和跃迁电子的数量两者之间,能级的因素占优,因此多碱阴极的量子效率随入射光子的能量增加而增加.当跃迁电子所处的能级高低与数量两者之间的因素达到平衡时,多碱阴极的量子效率达到最大.之后随着光子能量的增加,在跃迁电子的数量和能级两者间比较,跃迁电子数量对多碱阴极灵敏度的影响因素占优,因此随着光子能量的增加,跃迁电子的数量减小,导致多碱阴极的量子效率也随之减小.当入射光子的能量大于3.6 eV时,由于电子跃迁几率极低,导致多碱阴极的量子效率也极低.

需要说明的是,多碱阴极尽管成分相同,但由于制作工艺、厚度等因素不同,使多碱阴极的光电发射特性并不相同.因此针对某种多碱阴极的测试和分析结果仅仅适用于该种多碱阴极,对其他种类的多碱阴极并不一定适用.比如本文谈到的多碱阴极的吸收系数、电子跃迁几率、量子效率特性,均是特指目前国产超二代像增强器的多碱阴极.对于二代像增强器多碱阴极,其吸收系数、电子跃迁几率、量子效率特性所遵循的规律与超二代像增强器多碱阴极所遵循的规律会有所区别.

4 结论

1)多碱阴极的光谱吸收由于受到光谱反射的影响,吸收曲线不是一条理想的指数分布的曲线.随着入射光子能量的增大,当光子能量大于1 eV而小于1.333 eV时,吸收率小于3%,并且吸收率增加的速率很慢.只有当光子的能量大于1.333 eV以后,多碱阴极的吸收率才开始快速增大并达到49%.这说明多碱阴极的光谱吸收存在一个吸收限,入射光的光子能量如果小于该吸收限,多碱阴极将不吸收,因此多碱阴极的这一长波吸收限就应该是超二代像增强器多碱阴极光电发射的长波理论阈值.在多碱阴极的表面电子亲合势进一步降低的情况下,多碱阴极光电发射的长波理论阈值不会增加.

2)多碱阴极在吸收光子之后的电子跃迁过程中,跃迁电子的能量增加小于所吸收的入射光子的能量,即存在一个“能量损失”.光子的能量越高,所激发的跃迁电子所处的能级越高,能量损失越大.同时光子的能量越高,跃迁电子所处的能级越高,电子

跃迁的几率越低.反之,光子的能量越低(大于多碱阴极的吸收限之后),跃迁电子所处的能级越低,电子跃迁的几率越高.

3)多碱阴极的量子效率由吸收率、跃迁几率和跃迁能级、扩散过程中的能量损失等因素共同决定,因此多碱阴极的量子效率存在长波阈的同时也存在短波阈.多碱阴极的量子效率在2.11 eV达到最大值之后,随着光子能量的增加而单调减小,在3.6 eV时,量子效率减小到零.多碱阴极在3.6 eV时的吸收系数仍然很高,但由于电子跃迁的几率低,同时电子扩散过程中的能量损失大,导致尽管多碱阴极对短波具有较高的吸收系数,但量子效率仍然较低.因此对多碱阴极所吸收的光子能量中,转换为光电导、晶格热振动等其他非光电发射形式能量的比例而言,短波较长波高,对光电发射的贡献率而言,短波较长波低.

参考文献

- [1] GUO Xiang-yang, WANG Xiao-hui, CHANG Ben-kang, *et al.* High quantum efficiency of depth grade doping negative-electron-affinity GaN photocathode [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(6): 063104.
- [2] ZHANG Yi-jun, NIU Jun, ZHAO Jing, *et al.* Influence of exponential-doping structure on photoemission capability of transmission-mode GaAs photocathodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(9): 093108.
- [3] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang, YANG Zhi, *et al.* Evolution of surface potential barrier for negative-electron-affinity GaAs photocathodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(1): 013714.
- [4] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang, CHEN Huai-lin, *et al.* Variation of quantum-yield curves for GaAs photocathodes under illumination [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **101**(3): 033126.
- [5] ZHANG Yi-jun, NIU Jun, ZOU Ji-jun, *et al.* Variation of spectral response for exponential-doped transmission-mode GaAs photocathodes in the preparation process [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(20): 3935-3940.
- [6] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang, ZHANG Yi-jun, *et al.* Variation of spectral response from cesium-covered GaAs and band features contained within the spectral response [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(14): 2561-2565.
- [7] LIU Lei, WANG Xin, CHEN Ji-lu, *et al.* Spectral matching technology of a low-light-level night-vision system with a laser illuminator [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 286-291.
- [8] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang. Gradient-doping negative electron affinity GaAs photocathodes [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(5): 054001.
- [9] LIU Lei, CHANG Ben-kang. Spectral response characterization of super S₂₅ and new S₂₅ photocathodes [J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(4): 946-949.
- [10] LI Wei-min, GUO Jin-chuan, ZHOU Bin. Impact of buffer interlayer on the performance of heterojunction organic photovoltaic devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 972-976.
李卫民, 郭金川, 周彬. 缓冲夹层影响异质结有机光伏器件性能研究 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(8): 972-976.
- [11] 常本康. 多碱光电阴极 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011.