

文章编号:1004-4213(2011)10-1459-5

超二代微光像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱 光电阴极荧光光谱研究

李晓峰, 宋开俊, 刘如彪, 杨文波

(北方夜视科技集团有限公司, 昆明 650114)

摘 要:利用 785 nm 波长激光作为激发源, 测量了超二代微光像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极的荧光光谱. 试验中发现该荧光光谱不是一条光滑的高斯型曲线, 而是一条在高斯型荧光光谱上叠加了一定频率间隔小锯齿峰的曲线. 经实验验证和理论分析证明该荧光光谱上的小锯齿峰是一种干涉条纹, 与超二代微光像增强器的结构有关. 干涉条纹之间的间距与相邻两干涉峰波长的乘积成正比, 与超二代微光像增强器的近贴聚焦距离成反比. 干涉条纹调制度大小与 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极的厚度成反比. 通过测量超二代微光像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极荧光光谱上两相邻干涉条纹的间距和调制度, 就可以测量或比较出不同超二代微光像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极的膜厚、近贴聚焦距离. 研究结果对提高超二代微光像增强器阴极灵敏度和分辨力提供了一个有效的分析手段.

关键词:光致荧光; 逸出功; 带隙; 光电发射; 多碱光电阴极

中图分类号: O462.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114010.1459

0 引言

微光夜视仪是指在微弱星光、月光和大气辉光条件下, 通过微光像增强器将微弱光学图像增强, 从而使人眼能观察到景物的一种光学仪器. 其在军事上有广泛的应用, 如夜间武器瞄准、车辆行驶和侦察等. 微光夜视仪的核心是微光像增强器. 目前第三代微光像增强器使用更加先进的负电子亲和势 GaAs 光电阴极, 但由于二代微光像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极(简称多碱阴极)的制作工艺简单, 因此人们并未放弃二代微光像增强器的研制和生产, 仍在对其进行改进, 从而发展了超二代微光像增强器(简称超二代像增强器)^[1].

超二代像增强器的一个主要指标就是光电阴极的灵敏度, 其灵敏度在国外最高已达到 $960 \mu\text{A}/\text{Lm}$, 典型值已达 $800 \mu\text{A}/\text{Lm}$ 以上. 这与多碱阴极在问世初期灵敏度仅达到 $180 \mu\text{A}/\text{Lm}$ 的水平相比提高了很多. 在国内, 绝大部分的微光夜视仪仍然采用超二代像增强器, 因此更加迫切的需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^[2]. 光致荧光测量是一种很好的材料研究手段^[3-4], 对材料无损伤, 适合于对存在于真空条件

下的多碱阴极进行研究, 因此通过对超二代微光像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极荧光特性研究来了解 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 材料的性能具有十分重要的现实意义.

1 超二代像增强器光电阴极荧光光谱的特性

当某种物质受到电磁辐射激发后, 电子由基态激发到激发态(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释放出来, 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. Na_2KSb 铯碱化合物是一种 p 型多晶半导体, 其带隙约为 1 eV ^[5]. 当用激光激发 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极时, 只要入射光子的能量大于其带隙宽度, 价带电子就会被激发到导带. 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

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: 2011-04-21; 修回日期: 2011-06-03

然伴随有发光过程. 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.

由于超二代像增强器的光电阴极处于真空中, 一旦暴露大气将会损坏, 因此不能将其移植到大气中测量. 但由于超二代像增强器的光电阴极在输入玻璃窗的下面, 而玻璃是透光的, 所以可以通过荧光光谱测量来研究位于真空之中的超二代像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 光电阴极薄膜材料的性质. 通过测量 Na_2KSb 材料荧光的强度、峰值波长、半峰宽等参量, 可以分析出 Na_2KSb 材料能级、带隙、杂质能级、复合机制等方面的信息.

本文采用英国雷尼绍公司 (Renishaw) inVia 型号的显微喇曼光谱仪对超二代像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱阴极膜层进行测量. 显微喇曼光谱仪的光路原理见图 1. 激发光经过半反射镜反射, 再经过物镜后对测量样品进行激发. 样品发出的荧光沿着激发光的光路逆向传播到达半反射镜, 一部分荧光透过半反射镜, 经过全息滤光片后到达光栅光谱仪, 通过光栅光谱仪的荧光最后被 CCD 接收, 从而测量出样品的荧光光谱. 全息滤光片的作用是滤除样品反射的入射光, 光栅光谱仪的作用是对样品发出的荧光进行分光.

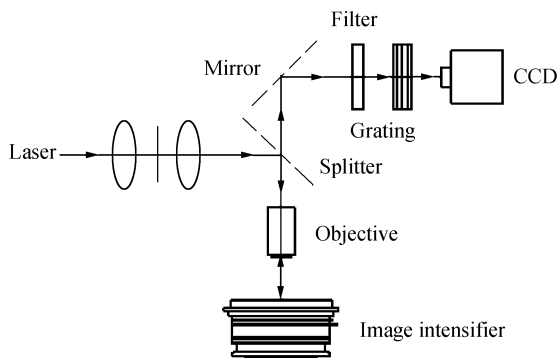


图 1 显微喇曼光谱仪的光路原理

Fig. 1 Sketch of measuring instrument for fluorescence spectrum

对像增强器多碱阴极测量时, 激光波长采用 785 nm, 对应光子的能量为 1.57 eV, 大于 Na_2KSb 膜层的禁带宽度, 因此可以用来激发膜层发光. 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, 测量范围 400~1 000 nm. 探测器 CCD 曝光时间为 10 s, 累加次数为 1 次. 所测样品为按超二代工艺制作的超二代像增强器, 阴极制造工艺也为标准的多碱光电阴极制造工艺. 图 2 是所测量到的编号为 51047698 的超二代像增强器多碱光电阴极的光致荧光光谱; 图 3 是图 2 在 850~920 nm 之间的局部荧光光谱. 从图 3 看出, 与一般材料的荧光光谱相

比较, 超二代像增强器光电阴极的荧光光谱形状较特殊, 它不是一条光滑的高斯型曲线, 而是一条在高斯型荧光光谱上叠加了一定频率小锯齿峰的曲线, 这一现象对超二代像增强器光电阴极荧光光谱而言具有普遍性.

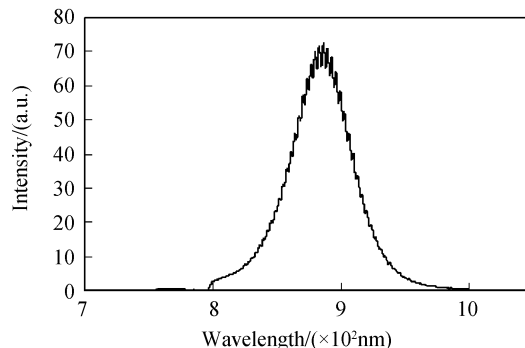


图 2 超二代像增强器光电阴极的荧光光谱

Fig. 2 Fluorescence spectrum of photocathode of the Gen II + image intensifier

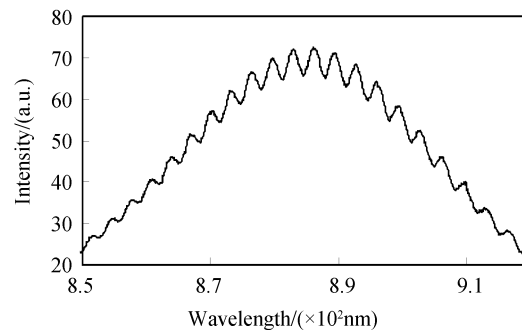


图 3 超二代像增强器光电阴极的局部荧光光谱

Fig. 3 Local fluorescence spectrum of photocathode of Gen II + image intensifier

2 超二代像增强器光电阴极荧光光谱特性分析

超二代像增强器主要由输入窗、光电阴极、微通道板 (Micro Channel Plate, MCP)、荧光屏、输出窗等组成, 结构如图 4 (管子结构)^[6]. 光电阴极与 MCP 输入面之间的距离约为 0.2 mm, MCP 输出面与荧光屏之间的距离约为 0.5 mm. 超二代像增强器荧光光谱上的锯齿峰不是超二代像增强器光电阴

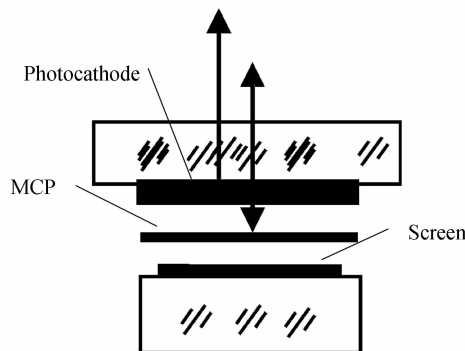


图 4 超二代像增强器结构

Fig. 4 Sketch of the Gen II + image intensifier

极荧光所固有的,它的出现与超二代像增强器的结构有关.因为当测量无 MCP 的二极管样品时(除无 MCP 外,其他均与正常超二代像增强器相同),荧光并未出现锯齿峰的现象.为了进一步验证超二代像增强器多碱阴极荧光谱上出现小锯齿峰与超二代像增强器结构有关的假设,设计一只使用特殊 MCP 的超二代像增强器,编号为 511073105.所谓特殊 MCP 是指该 MCP 的形状为半圆形,而正常 MCP 的形状是圆形的.该只超二代像增强器除 MCP 特殊外,其余结构与正常生产的超二代像增强器相同,即光电阴极与 MCP 输入面之间的距离仍约为 0.2 mm, MCP 的输出面与荧光屏之间的距离仍约为 0.5 mm.由于 MCP 的厚度约为 0.3 mm,因此光电阴极到荧光屏之间的距离约为 1.0 mm.使用半圆形 MCP 后,该超二代像增强器分成了两个区,分别称为 A 区和 B 区. A 区有 MCP, B 区无 MCP,见图 5.在同一条件下对 A 区和 B 区光电阴极的荧光进行测试,结果见图 6.

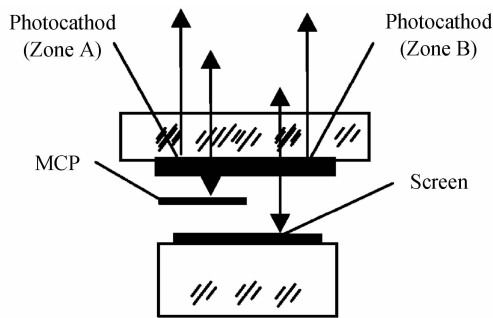


图 5 使用特殊 MCP 的超二代像增强器结构
Fig. 5 Sketch of the Gen II+ image intensifier with special MCP

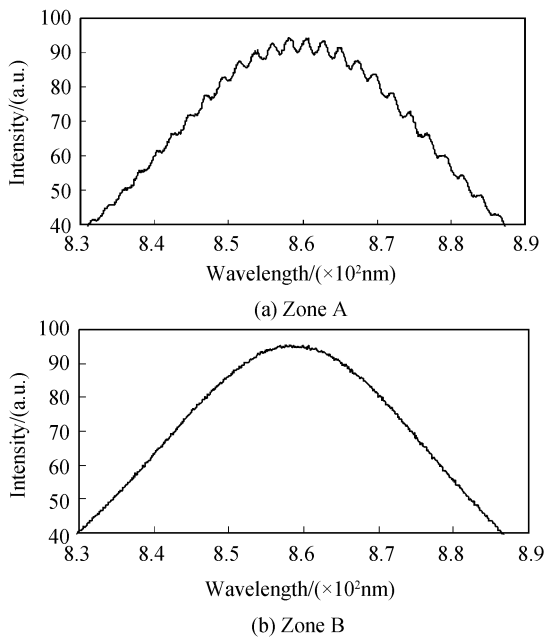


图 6 超二代像增强器 A 区和 B 区的荧光谱
Fig. 6 Fluorescence spectra of Zone A and Zone B of the Gen II+ image intensifier

从测试结果看出,图 6(a)的荧光谱与图 3 的曲线相似,在荧光谱上仍然有锯齿峰存在,但图 6(b)的荧光谱却是一条光滑的曲线,并没有锯齿峰存在.这充分证明超二代像增强器多碱阴极荧光谱存在锯齿峰的现象是由其结构决定的,即超二代像增强器光电阴极的下端存在着 MCP. MCP 是一种多孔的玻璃管阵列,其表面蒸镀有 Ni-Cr 电极, Ni-Cr 层的反射率很高.当多碱阴极受到激光激发时,其所发射的一部分向上传播的荧光(称为初始荧光)被超二代像增强器玻璃输入窗上面的荧光测试仪所接收;而一部分向下传播的荧光到达 MCP 输入端并被 MCP 表面的 Ni-Cr 层所反射,这部分被反射回超二代像增强器玻璃输入窗方向的荧光(称为反射荧光)同样会被超二代像增强器输入端上面的荧光测试仪所接收.由于初始荧光与反射荧光属于同一束光的两部分,他们都是来源于同一原子,其振动方向,频率相同,相位差恒定,因此是相干光,只要两束光相遇就会发生干涉.由于荧光在 MCP 表面 Ni-Cr 层上反射时存在相位变化(半波损失)^[7],这样只要同一波长初始荧光和反射荧光的光程差等于 $1/2$ 波长的奇数倍,那么两束光相干强度相加.当同一波长初始荧光和反射荧光的光程差等于 $1/2$ 波长的偶数倍时,两束光相干强度相减.

另外在 MCP 输入端,只有 MCP 通道壁才能反射入射荧光,通道不会反射荧光; MCP 的开口比很大,因此 MCP 表面的实际反射率很小,所以导致反射荧光的强度远低于初始荧光的强度.这样强度较高的初始荧光与强度较弱的反射荧光干涉,造成了超二代像增强器荧光谱出现小锯齿峰,即出现高斯型荧光谱上叠加干涉条纹的现象.

对超二代像增强器的 B 区而言,虽然光电阴极下方有荧光屏,荧光屏表面有一层铝膜也会反射荧光,而且其反射荧光的强度远大于 MCP 所反射荧光的强度,但初始荧光和反射荧光并没有发生干涉, B 区的荧光谱仍是一条光滑的高斯型曲线. B 区的初始荧光和反射荧光并没有发生干涉,说明他们不满足相干条件.初始荧光和反射荧光来源于同一发光原子,有相同的频率和固定的相位差,这由原子发光的理论分析和 A 区的荧光曲线已经得到证明.但由同一原子的发光经过分光后相遇发生干涉除需要有相同的频率和固定的相位差外,还需要满足另一个条件,那就是这两束光要在其相干长度内相遇.所以由此推断 A 区的初始荧光和反射荧光发生干涉,是因为两束光在其相干长度内相遇.而 B 区初始荧光和反射荧光未发生干涉的原因是两束光由于阴极与荧光屏之间的距离(约 1.0 mm)大于 A 区阴极与

MCP 输入面的距离(约 0.2 mm),因此造成 B 区初始荧光和反射荧光的光程差(约 2.0 mm)大于 A 区初始荧光和反射荧光的光程差(约 0.4 mm),即初始荧光和反射荧光的光程差大于荧光的相干长度,因此造成两束光即使相遇也不会发生干涉.进一步加大阴极与荧光屏之间的距离到,同样发现初始荧光和反射荧光不会发生干涉,这进一步证明多碱阴极荧光的相干长度不大于 2.0 mm 的推论.

比较不同超二代像增强器光电阴极的荧光谱,发现荧光谱上干涉条纹的调制度(干涉条纹极大值极小值之差除以极大值极小值之和)不一样.图 7 是编号为 Q5842382 超二代像增强器的荧光谱.图 7 与图 3、图 6(a)相比较,可以看出图 7 荧光谱的干涉条纹调制度最大,图 3 的调制度居中,图 6(a)的调制度最小,分别为 9.5%,4%和 3%.

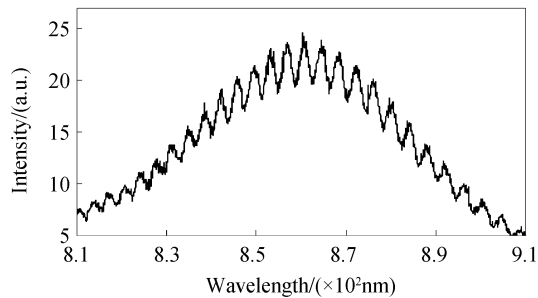


图 7 超二代像增强器(No. Q5842382)光电阴极的荧光谱
Fig. 7 Fluorescence spectrum of photocathode of the Gen II + image intensifier(No. Q5842382)

图 7、图 6(a)和图 3 所示三个样品比较,区别在于图 7 样品光电阴极膜层的厚度较薄^[8],图 6(a)样品和图 3 样品是正常生产的超二代像增强器,其阴极膜层厚度按超二代像增强器的制造工艺要求控制;而图 7 样品在制造工艺过程中有意降低多碱阴极的厚度.多碱阴极的厚度在生产过程中采用控制梯碱交替的次数以及观察阴极膜层颜色的方法来控制.

比较其他不同阴极膜层厚度的超二代像增强器光电阴极的荧光谱,同样发现阴极膜层越薄,样品的调制度越大.这说明光电阴极荧光谱的调制度大小反映了阴极膜层的厚薄.原因是光电阴极膜层是一种具有强吸收系数的半导体膜^[9],膜层越薄,对 MCP 所反射荧光的吸收也越弱,即反射荧光透过光电阴极膜层后的强度衰减越小,反射荧光的强度越大,致使干涉条纹的调制度也越大.如果仔细观察荧光谱上的干涉条纹,还会发现对不同的超二代像增强器,除荧光谱干涉条纹的调制度不一样外,相邻干涉条纹之间的距离 $\Delta\lambda$ 也不一样.对图 7、图 3 和图 6(a)而言,在荧光峰处相邻干涉条纹之间的距离 $\Delta\lambda$ 分别为 3.9 nm、3.1 nm 和 2.4 nm.另外也发现对同

一样品,荧光谱相邻干涉条纹之间的间距 $\Delta\lambda$ 也随波长增大而增大.如对图 7 样品,在 830 nm 处的 $\Delta\lambda$ 为 3.3 nm,在荧光峰 860 nm 处的 $\Delta\lambda$ 为 3.9 nm,而在 892 nm 处的 $\Delta\lambda$ 却为 4.38 nm,即 $\Delta\lambda$ 随波长的增加而增加.

3 超二代像增强器光电阴极荧光谱特性理论分析

设超二代像增强器光电阴极荧光谱上相邻两干涉条纹峰对应的波长为 λ_1 和 λ_2 ,其中 $\lambda_2 > \lambda_1$.超二代像增强器光电阴极膜层到 MCP 输入面的近贴聚焦距离为 Δd .根据干涉加强的原理, λ_1 和 λ_2 应满足

$$2\Delta d = m\lambda_1 \quad (1)$$

$$2\Delta d = n\lambda_2 \quad (2)$$

式中的 m, n 为相邻的奇数($m > n$).式(1)与式(2)相减得

$$\frac{2\Delta d}{\lambda_1} - \frac{2\Delta d}{\lambda_2} = 2 \quad (3)$$

化简得

$$\Delta d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (4)$$

由式(4)可知,对同一超二代像增强器,由于其近贴聚焦距离 Δd 是固定的,因此 λ_1, λ_2 越长, $\Delta\lambda$ 也越大.这样就解释了对同一超二代像增强器,其荧光谱上相邻两干涉峰之间的距离 $\Delta\lambda$ 随波长增大而增大的现象.同时对于不同的样品,由于其近贴聚焦距离 Δd 不一样,因此其荧光谱上干涉峰之间的距离 $\Delta\lambda$ 也不一样.近贴聚焦距离 Δd 越大,荧光谱上干涉峰之间的距离 $\Delta\lambda$ 越小.反知近贴聚焦距离 Δd 越小,荧光谱上干涉峰之间的距离 $\Delta\lambda$ 越大.这样也解释了不同像增强器荧光谱 $\Delta\lambda$ 不一样的现象.表 1 是根据荧光谱测得的相邻两干涉条纹峰的波长 λ_1, λ_2 数据和式(4)计算所得到的图 3、图 6(a)和图 7 三个样品光电阴极到 MCP 输入面之间的距离 Δd .表中的 λ_1 为荧光谱峰值处的干涉条纹峰值波长, λ_2 为相邻干涉峰对应的波长.从表 1 中看出 51047698 号样品和 Q5842382 号样品的近贴聚焦距离在设计值所容许的公差带的范围内,而 511073105 号样品的近贴聚焦距离超出了公差带,出现了异常.原因可能是钢封时阴极玻璃窗未放置到位,从而使近贴聚焦距离偏离了设计值.

表 1 三个样品的 Δd 计算

Table 1 The Δd value of three samples

Sample No.	λ_1 /nm	λ_2 /nm	$\Delta\lambda$ /nm	Δd /mm
51047698	884	887.1	3.1	0.25
511073105	858	860.4	2.4	0.30
Q5842382	860	863.9	3.9	0.15

由以上分析可知,超二代像增强器光电阴极荧光光谱上干涉条纹的信息反映了超二代像增强器光电阴极的厚度以及近贴聚焦距离的信息.通过测量超二代像增强器荧光光谱上相邻两干涉峰的波长 λ_1 、 λ_2 以及两波长之间的距离 $\Delta\lambda$,可以反过来比较超二代像增强器近贴聚焦距离 Δd 的大小.

需要说明的是:在推导超二代像增强器光电阴极初始荧光和反射荧光的相干方程时,将荧光在 MCP 表面 Ni-Cr 层上反射的相位变化简化为 $\pi^{[10]}$,即采用了简化的条件;因此采用式(4)计算超二代像增强器的近贴聚焦距离传播距离 Δd 时,所得到的数据有一定的偏差,需进行一定的修正.

4 结论

当测量超二代像增强器 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极的荧光时,荧光谱上的出现的干涉条纹不是 Na_2KSb 光电阴极材料固有的,而是由超二代像增强器内部结构决定的.荧光谱上的干涉条纹特性反映了光电阴极的厚度和近贴聚焦距离.

近贴聚焦距离和光电阴极膜层厚度是提高超二代像增强器的分辨力和灵敏度的关键参量.在超二代像增强器的制造过程中,控制好超二代像增强器的近贴聚焦距离和光电阴极膜层的最佳厚度对于获得高分辨力和高阴极灵敏度至关重要.荧光法可以在不破坏像增强器管子的条件下进行测量且准确度

更高.因此超二代像增强器多碱阴极的荧光分析法将在研究提高超二代像增强器的分辨力和阴极膜层厚度方面起到积极的作用.

参考文献

- [1] CHANG Ben-kang. Study on the control principle of multi-alkali photocathode by component analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(2): 193-197.
常本康.超二代像增强器光电阴极成份控制原理研究[J]. *光学学报*, 1994, **14**(2): 193-197.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘光华.稀土固体材料学[M].北京:机械工业出版社,1974.
- [5] 萨默 A H.光电发射材料[M].侯洵,译.北京:科学出版社,1979.
- [6] 向世明,倪国强.光电子成像器件原理[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [7] 谢敬辉,赵达尊,阎吉祥.物理光学教程[M].北京:北京理工大学出版社,2005.
- [8] 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.
- [9] CHANG Ben-kang. Study on the absorb coefficient of multi-alkali photocathode[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(1): 87-91.
常本康.多碱光电阴极光吸收系数研究[J]. *光学学报*, 1992, **12**(1): 87-91.
- [10] 梁铨廷.物理光学[M].北京:机械工业出版社,1980.

Fluorescence Spectrum of $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ Multi-alkali Photocathode of the Gen II + Image Intensifier

LI Xiao-feng, SONG Kai-jun, LIU Ru-biao, YAN Wen-bo
(North Night Vision Science and Technology Co., Ltd, Kunming 650114, China)

Abstract: Fluorescence spectrum of $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ multi-alkali photocathode of the Gen II + image intensifier was measured with laser of 785 nm wavelength as the excitation source. It was found that the fluorescence spectrum is not a smooth Gaussian curve, but a Gaussian fluorescence curve superposition of small jagged peaks with a certain frequency interval. Experimental and theoretical analysis show that the small fluorescent jagged peaks on the curve are actually a fringe with relationship of the structure of the Gen II + image intensifier. Pitch between two adjacent interference fringes is proportion to the product of peak wavelength of two adjacent interference fringes, and inversely proportion to the proximity focusing distance of the Gen II + image intensifier. Modulation of interference fringes of fluorescence spectrum is inversely proportion to the thickness of multi-alkali photocathode. By measuring the pitch of two adjacent interference fringes and modulation of $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ multi-alkali photocathode of the Gen II + image intensifier, the proximity focusing distance and the thickness of $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ multi-alkali photocathode of the Gen II + image intensifier can be measured. The results provide an effective means to further increase photocathode sensitivity and resolution of the Gen II + image intensifier.

Key words: Photoluminescence; Work function; Band gap; Photoemission; Multi-alkali photocathode