

doi:10.3788/gzxb20134202.0150

光纤面板窗多碱光电阴极荧光谱特性研究

李晓峰^{1,2}, 陆强², 郭骞²

(1 微光夜视技术国防科技重点实验室, 西安 710065)

(2 北方夜视科技集团有限公司, 昆明 650114)

摘 要: 论述了光致荧光的特点以及微光像增强器多碱光电阴极光致荧光的测量原理, 测量了光纤面板输入窗多碱光电阴极的荧光谱. 测试结果表明, 光纤面板窗的多碱阴极的荧光谱不是一条光滑的高斯型曲线, 而是在一条高斯型曲线上叠加了一些小的干涉峰的曲线. 原因是光纤面板窗所传输的荧光中, 有两束特殊的光线. 一束光为准直光, 另一束光为入射角刚好等于全反射临界角的反射光. 这两束光具有固定的相位差或光程. 当这两束光的相位差相差 λ 的整数倍时, 它们将干涉并产生干涉加强峰; 当这两束光的相位差相差 $1/2\lambda$ 的奇数倍时, 它们将干涉并产生干涉减弱峰. 如果在荧光谱的峰值波长处刚好产生干涉加强峰, 那么所测量的峰值荧光强度较其固有的峰值荧光强度要高; 反之, 如果在荧光谱的峰值波长处刚好出现干涉减弱峰, 那么所测量的荧光强度就小于其固有的荧光强度. 另外由于受到干涉的影响, 荧光曲线半峰宽也不能精确确定, 所以在分析光纤面板窗光电阴极的荧光谱时, 要考虑到干涉因素的影响.

关键词: 多碱阴极; 光致荧光; 光谱; 干涉; 像增强器

中图分类号: O462.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0150-6

Characteristics of Fluorescence Spectrum of Multi-alkali Photocathode of FOP Window

LI Xiao-feng^{1,2}, LU Qiang², GUO Qian²

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

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

Abstract: The characteristics of photoluminescence and the measuring principle of photoluminescence of LLL image intensifier were discussed, and the fluorescence spectrum of multi-alkali photocathode of FOP (optical fiber panel) input window was measured. The test results suggest that the fluorescence spectrum of multi-alkali photocathode of FOP window is not a smooth Gauss curve, but a curve with some small interference peaks being added to a Gauss curve, for there are two special light beams in the fluorescence transmitted by FOP window. One light beam is collimated light and the other is the folded light beam at the very moment when the incidence angle is equivalent to critical angle of total reflection. Both light beams have fixed phase difference or optical path. When the difference between the phase differences of the two light beams lives up to the integral multiple of λ , they will interfere to produce constructive interference peak; when the difference between the phase differences of the two light beams lives up to the odd multiple of $1/2\lambda$, they will interfere to produce destructive interference peak. If constructive interference peak is produced exactly at the peak wavelength of fluorescence spectrum, then the measured peak fluorescence intensity is higher than its inherent peak fluorescence intensity; on the contrary, if destructive interference is produced exactly at the peak wavelength of fluorescence spectrum, then the measured fluorescence intensity is lower than its

基金项目: 微光夜视技术国防科技重点实验室基金(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: 2012-07-12; 录用日期: 2012-09-10

inherent fluorescence intensity. Furthermore, due to the impact of interference, the half peak width of fluorescent curve can not be accurately determined. Hence, the impact of interference factors should be taken into consideration when analyzing the fluorescence spectrum of photocathode of FOP window.

Key words: Multi alkali photocathode; Photoluminescence; Spectral; Interference; Image intensifier

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,从而使肉眼能观察到景物的一种光学仪器。它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,微光像增强器已经发展到三代^[1-5]。尽管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)。超二代像增强器的一个主要指标就是光电阴极的灵敏度,超二代像增强器仍使用 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 多碱光电阴极(简称多碱阴极),其在国外最高已达到 $960 \mu\text{A}/\text{Lm}$,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。超二代像增强器的性能目前无论是国内还是国外仍在进一步的改进之中,特别是对光纤面板输入窗的超二代像增强器。因为其性能低于防光晕玻璃(Anti-Veiling Glass,AVG)玻璃输入窗的性能,而国内相当部分的微光夜视仪仍然采用面板输入窗的超二代像增强器,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。光致荧光测量是一种很好的材料研究手段^[6-10],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,多碱阴极的荧光强度反映电子跃迁几率的大小,而荧光峰值波长却反映跃迁电子所处的能级,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 Na_2KSb 材料的性能具有十分重要的现实意义。

1 光致荧光的特点及测量

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 。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,这就必然伴随有发光过程。由于激光荧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之中,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,因此可以通过荧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。

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

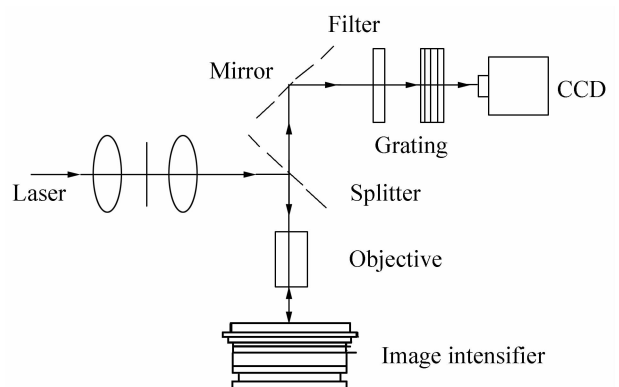


图 1 荧光测量光路原理

Fig. 1 Sketch of measuring instrument

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.

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,其阴极输入窗采用光学纤维面板.一般而言,超二代像增强器采用 AVG,但由于多碱阴极的折射率较高,因此入射光在多碱阴极膜层和玻璃窗外表面之间会发生多次反射.使用 AVG 的超二代像增强器在观察目标时,如果景物的照度较强,就会出现重影,俗称“鬼像”.因此对于要求较高的应用条件或应用环境,仍要求超二代像增强器使用光纤面板输入窗,即要求多碱阴极制作在光纤面板输入窗之上.因此当所测量的超二代像增强器采用光纤面板输入窗时,激光从光纤面板的表面入射,经光纤面板的纤维丝传导到多碱阴极膜层,阴极膜层吸收光之后发射荧光,荧光再经过光纤面板的纤维丝传导出光纤面板,之后被探测器所接收,见图 2.

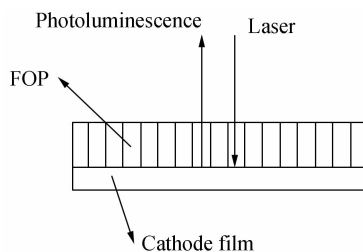


图 2 光纤面板输入窗

Fig. 2 Sketch of fiber optical plate and cathode film

图 3 是 0476# 超二代像增强器多碱光电阴极的光致荧光谱,该像增强器采用光纤面板作为输入窗.从图 3 看出,与一般的荧光谱曲线相比较,该像增强器光电阴极的荧光谱形状较特殊,它不是一条光滑的高斯型曲线,而是一条在高斯型荧光谱上叠加了小的荧光峰的曲线.这一现象对光纤面板输入窗的超二代像增强器光电阴极荧光谱而言具有普遍性.图 4 是 AVG 玻璃输入窗的超二代像增强器光电阴极荧光谱,与图 3 相比,荧光曲线是一条光滑的高斯型曲线,曲线上不存在附加的小的荧光峰.由于图 3、图 4 中所测量的两个样品仅仅是输入窗不同,因此可以断定图 3 中荧光谱曲线上存在的

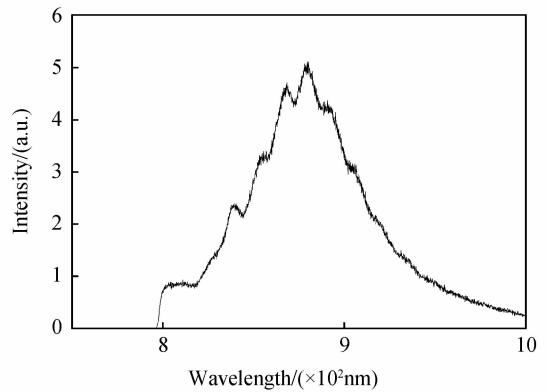


图 3 光纤窗光电阴极的荧光谱

Fig. 3 Fluorescence spectrum of photocathode

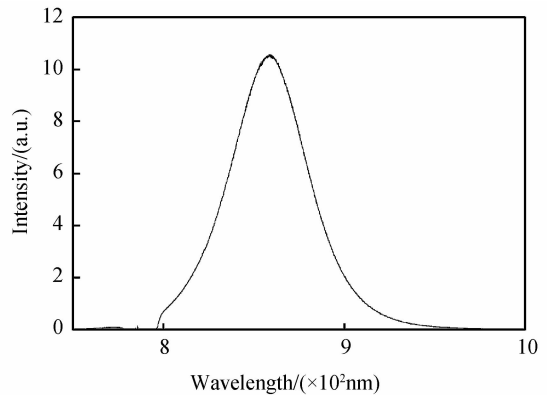


图 4 玻璃窗光电阴极的荧光谱

Fig. 4 Fluorescence spectrum of photocathode

小的荧光峰与样品采用光纤面板作为输入窗有关.

2 光纤面板窗多碱阴极荧光谱特性分析

超二代像增强器主要由阴极输入窗、光电阴极、微通道板 (Micro Channel Plate, MCP)、荧光屏、输出窗组成.当阴极输入窗采用纤维光纤面板时,图像首先成在光纤面板的外表面,之后通过纤维丝传输到光电阴极膜层,光电阴极膜层通过光电发射将输入图像转变为电子图像,再经过 MCP 的电子倍增、荧光屏的亮度转换,从而实现亮度增强的目的.光纤面板的工作原理类似于波导管传输无线电波的原理.光纤面板由密集的纤维丝(光导管)组成.每根纤维丝都是由高折射率的玻璃作芯,低折射率的玻璃作外皮所组成,见图 5.

图 5 是一根纤维丝的结构示意图.纤维丝的直径为 $6 \mu\text{m}$,去除包皮之后,芯玻璃的直径仅为 $5.333 \mu\text{m}$.光线面板的厚度(纤维丝的长度)约为 5 mm.光纤丝的传光原理是基于光线的全反射.因为纤维丝的折射率高于外皮的折射率,因此入射角 θ_i 小于全反射临界角的全部光线都只能在纤维丝的芯玻璃管内反射,所以每一根纤维丝均能独立的传光,相互不串光,这样由大量光导纤维丝所组成的

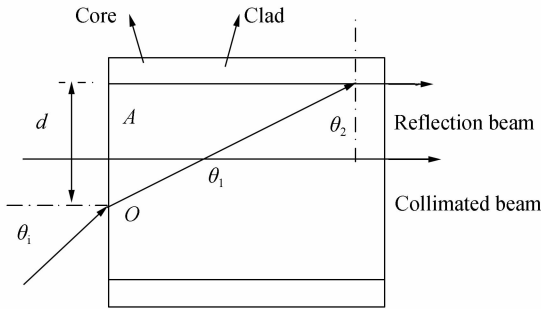


图5 纤维传光原理

Fig. 5 Illustration of light transmission

面板可以传递一幅图像. 图5表示了纤维面板的传光原理, 当光线的入射角为 θ_1 时, 所产生的折射情况可由式(1)和(2)确定

$$\sin \theta_i / \sin \theta_1 n_1 / n_0 \quad (1)$$

$$\sin \theta_2 / \sin \theta_3 = n_2 / n_1 \quad (2)$$

式中, n_0 、 n_1 、 n_2 分别是空气介质、纤维芯料和纤维皮料的折射率, 根据全反射的条件可以得到全反射临界角的表达式

$$\sin \theta_i = \sqrt{n_1 - n_2} / n_0 \quad (3)$$

根据式(3)可知, 只要纤维芯料的折射率和皮料的折射率满足式(4), 纤维面板即可具有理想的传光功能.

$$n_1 \geq \sqrt{n_0 + n_2} \quad (4)$$

纤维面板在设计的过程中, 已经保证了纤维丝的芯料和皮料的折射率满足式(4), 即数值孔径大于1, 所以任何入射角 θ_1 入射的光束均可以从入射端传输到出射端. 当入射光的角度刚好满足式(3)时, 出射光刚好平行纤维丝的轴线. 阴极膜层在受到激光的激发作用下发光, 本质上是原子发光, 因此发光的角度是 360° , 其中 180° 的方向面向纤维面板的方向, 另外 180° 的方向是背对纤维面板的方向. 由于阴极膜层制作在纤维面板的内表面, 因此面向纤维面板方向的荧光均能从纤维面板的内表面传输到纤维面板的外表面, 见图2. 由于荧光是原子发光, 因此是相干光. 只要两束相干光的相位差恒定, 这两束荧光就可以发生干涉. 阴极膜层所发射的荧光在进入纤维丝时, 入射方向在 $0 \sim 180^\circ$ 范围内, 因此在纤维丝中的反射角也各不相同. 又由于入射光在纤维丝中的反射是多次反射, 所以并不是所有的入射光都能满足干涉条件. 在众多的入射光中, 只有两束光满足相干条件, 这两束光就是图5中所示的两束光. 第一束光为平行于纤维丝直径传输的准直光, 第二束光为刚好满足临界角的反射光. 第二束反射光在纤维丝的内壁只发生一次反射, 出射时平行于纤维丝的轴线, 因此第一束准直光和第二束反射光具有固定的相位差. 当这两束荧

光的光程差为 $1/2$ 波长的偶数倍时, 两束光将发生干涉加强; 当两束荧光的光程差为 $1/2$ 波长的奇数倍时, 两束光将发生干涉减弱, 所以图3中所示荧光曲线上的小的荧光峰应该就是图5中所示两束荧光经过光纤面板传输之后发生干涉产生的.

3 光纤面板窗多碱阴极荧光谱特性理论分析

为了验证本文的假设, 开展理论计算. 为方便计算, 将图3中荧光曲线的峰值部份进行局部放大, 见图6. 图中标明了较明显的三个干涉峰, 其中1#峰和3#峰为干涉加强峰, 2#峰为干涉减弱峰. 1#峰的波长为 878.3 nm , 2#峰的波长为 870.9 nm , 3#峰的波长为 868.8 nm .

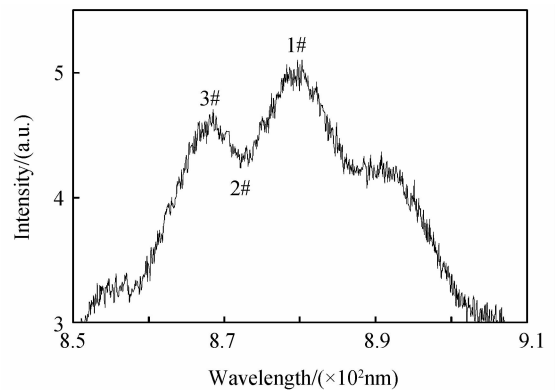


图6 光纤窗光电阴极的荧光谱

Fig. 6 Fluorescence spectrum of photocathode

设图5中以 θ_2 入射的光束与准直入射的光束发生干涉加强, 那么两束光的光程差应为波长的整数倍, 即满足

$$d \left[\frac{1 - \sin \theta_2}{\cos \theta_2} \right] = N\lambda \quad (5)$$

式中 d 为以 θ_2 角入射的光束与纤维丝输入端的交点 O 距纤维丝边沿 A 点之间的距离; λ 为两束入射光的波长; θ_2 为刚好发生全反射时的入射角. 纤维面板芯玻璃的折射率 n_1 为1.81, 皮玻璃的折射率 n_2 为1.51, 因此 θ_2 可根据式(6)进行计算.

$$\sin \theta_2 = n_2 / n_1 \quad (6)$$

将 n_1 和 n_2 的数值代入上式, 求得 θ_2 为 56.54° . 对图6中荧光曲线中的1#峰而言, 其波长 λ 为 878.3 nm , 设 $N=1$, 将 λ 、 θ_2 和 N 的值代入式(5), 求得 d 为 $2.923 \mu\text{m}$. 光纤面板纤维丝直径为 $6 \mu\text{m}$, 芯玻璃的直径为 $5.333 \mu\text{m}$, 所计算的 d 值为 $2.923 \mu\text{m}$, 位于芯玻璃的直径范围内, 因此数值合理. 在上述条件不变的情况下, 再设 $N=2$, 那么所计算的 d 为 $5.846 \mu\text{m}$, 超过实际的纤维芯玻璃的直径, 因此 $N=2$ 的假设不合理. 说明图5中的两束特殊光束发生干涉加强时, 其光程差只可能相

差一个 λ ，而不可能相差两个或两个以上的 λ 。对图6中荧光曲线中的2#峰而言，其峰值波长 λ 为870.9 nm，设 $N=1/2$ ，将 λ, θ_2 和 N 的值代入式(5)，求得 d 为1.446 μm 。在上述条件不变的情况下，再假设 $N=3/2$ 和 $5/2$ ，那么所计算的 d 分别为4.431 μm 和7.234 μm 。因为纤维丝芯玻璃的直径为5.333 μm ，所以计算的 d 为4.431 μm 的数值合理，而 d 为7.234 μm 的数值不合理，因此2#干涉减弱峰是在 d 等于1.446 μm 和4.431 μm 两个位置的反射光与准直光发生干涉的结果。对3#峰，在假设 $N=1$ 和 $N=2$ 的条件下，所计算的 d 分别为2.886 μm 和5.772 μm ，其中5.772 μm 超过纤维丝芯玻璃的直径，不合理，所以3#峰只能是 d 为2.886 μm 处的反射光与准直光干涉加强的结果，而两束相干光只能相差一个 λ 。比较1#峰和3#峰的计算结果，可以看出，波长越小，所计算的距离 d 越小，与实际情况符合。1#峰、2#峰和3#峰的计算结果见表1。

表1 荧光谱干涉峰结果

Peak	λ/nm	N	$d/\mu\text{m}$
1#	878.3	1	2.923
2#	870.9	1/2	1.446
		3/2	4.431
3#	868.8	1	2.886

由表1看出，对1#干涉加强峰和3#干涉加强峰而言，其两束光的光程差只能相差一个 λ ，即产生干涉的两束光中的非准直光只能是位于满足干涉条件的一个锥面上的光；而对2#干涉加强峰而言，其两束光的光程差既可以相差 $\lambda/2$ ，又可以相差 $\lambda 3/2$ ，因此产生干涉的两束光中的非准直光可以是位于满足干涉条件的两个锥面上的光。

图7是0517#样品的荧光谱。与图3相比较，可以看出在图7中荧光谱的峰值位置不好确定，看不出明显的最大荧光强度所对应的尖峰，在应该出

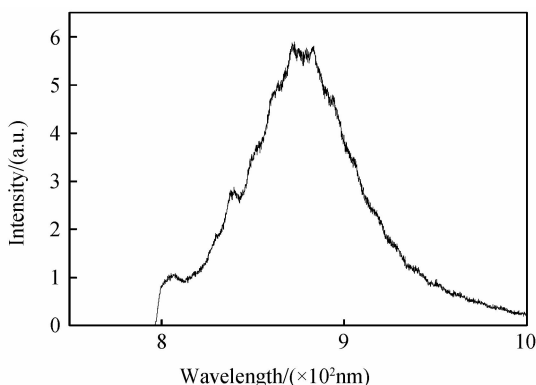


图7 光纤窗光电阴极的荧光谱

Fig. 7 Fluorescence spectrum of photocathode

现峰值的位置处却出现了荧光峰值强度下陷的现象。根据以上的讨论，出现这一现象的原因在于在该波长处荧光满足干涉的条件，出现了干涉减弱的现象。因此对光纤面板窗像增强器的多碱阴极进行荧光测量时，要考虑到荧光干涉加强或干涉减弱的现象。如果在荧光谱的峰值波长处刚好产生干涉加强峰，那么所测量的荧光峰值强度较其固有的荧光峰值强度要高。反之，如果在荧光谱的峰值波长处刚好出现干涉减弱，那么所测量的荧光强度就小于其固有的荧光强度。

4 结论

1)超二代像增强器一般采用AVG玻璃输入窗，但由于多碱阴极膜层的折射率较高，因此入射光在多碱阴极膜层和玻璃窗外表面之间会发生多次反射，从而造成像增强器在使用过程中图像会出现重影的现象，所以在应用条件要求较高的情况下，仍要求超二代像增强器采用光纤面板作为输入窗，这给光纤面板输入窗超二代像增强器的研制带来了很大的困难。目前在光纤面板上的阴极灵敏度仍然小于AVG玻璃窗上的阴极灵敏度，因此进一步开展光纤面板输入窗的超二代像增强器研究具有重要的现实意义。

2)光致荧光与光电发射相比，电子跃迁过程的机理是一样的。两种过程都是首先吸收光子，之后激发电子跃迁，所不同的是光致荧光是跃迁电子从高能级返回到低能级，而光电发射是跃迁电子逸出阴极表面，因此光致荧光是分析多碱阴极的一种有效手段。它可以分析处于真空状态下的多碱阴极，通过测量多碱阴极荧光谱峰值强度和荧光谱的峰值波长，可以分析出多碱阴极电子跃迁过程中的跃迁几率和跃迁电子所处的能级，这对于揭示多碱阴极光电发射的客观规律具有积极的推动作用。微光像增强器多碱阴极的灵敏度由于工艺的改进越来越高，但对工艺变化所带来的多碱阴极材料本身结构变化的认识还不深入，因此利用光致荧光分析多碱阴极的结构变化具有重要的现实意义。

3)当测量光纤面板输入窗的超二代像增强器多碱阴极的荧光谱时，荧光曲线不是一条光滑的高斯型曲线，而是在一条高斯型曲线上叠加一些小的干涉峰的曲线。原因是光纤面板窗所传输的荧光中，有两条特殊的光束。一条光束为准直光，另一条光束为入射角刚好等于全反射临界角的反射光束。这两束光束具有固定的相位差或光程。当这两束光的相位差相差 λ 的整数倍时，它们将干涉产生干涉加强峰；当这两束光的相位差相差 $1/2\lambda$ 的奇数倍时，

它们将干涉产生干涉减弱峰. 如果在荧光谱的峰值波长处刚好产生干涉加强峰, 那么所测量的峰值荧光强度较其固有的峰值荧光强度要高. 反之, 如果在荧光谱的峰值波长处刚好出现干涉减弱, 那么所测量的荧光强度就小于其固有的荧光强度. 另外由于受到干涉的影响, 荧光曲线半峰宽也不能精确确定. 所以在分析光纤面板窗光电阴极的荧光谱时, 要考虑到干涉因素的影响.

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**: 063104.
- [2] ZHANG Yi-jun, NIU Jun, CHANG Ben-kang, *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, 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.
- [5] 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.
- [6] NIU Jun, ZHANG Yi-jun, CHANG Ben-kang, *et al.* Influence of exponential doping structure on the performance of GaAs photocathodes[J]. *Applied Optics*, 2009, **49**(29): 5445-5450.
- [7] ZHANG Yi-jun, CHANG Ben-kang, YANG Zhi, *et al.* Annealing study of carrier concentration in gradient-doped GaAs/GaAlAs epilayers grown by molecular beam epitaxy[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(9): 1715-1720.
- [8] LIU Lei, DU Yu-jie, CHANG Ben-kang, *et al.* Spectral response variation of a negative electron affinity photocathode in the preparation process [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(24): 6094-6098.
- [9] ZHANG Yi-jun, CHANG Ben-kang, YANG Zhi, *et al.* Distribution of carriers in gradient-doping transmission-mode GaAs photocathodes grown by molecular beam epitaxy[J]. *Chinese Physics B*, 2009, **18**(10): 4541-4546.
- [10] NIU Jun, YANG Zhi, CHANG Ben-kang. Equivalent method of solving quantum efficiency of reflection-mode exponential doping GaAs photocathode[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(10): 104202.