

〈微光技术〉

## 超二代像增强器多碱阴极电子逸出机理研究

李晓峰<sup>1,2</sup>, 瞿利平<sup>2</sup>, 黄建民<sup>2</sup>, 张云昆<sup>2</sup>

(1.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2.北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650114)

**摘要:** 测量了超二代像增强器多碱阴极的光谱反射率和透射率, 计算了多碱阴极的光谱吸收率。从光谱吸收率看出, 当波长大于 850 nm 以后, 多碱阴极的吸收率下降很快, 但当波长大于 915 nm 之后, 吸收率的下降变慢, 同时吸收率低于 5%。这说明多碱阴极的  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层存在一个 915 nm 的长波吸收限, 入射光的波长如果大于该吸收限, 多碱阴极将不吸收。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光子能量, 即存在“能量损失”。光子的能量越高, 跃迁电子的能级越高, 能量损失越大。超二代像增强器  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层在 Cs 激活之后, 荧光的峰值波长向短波方向移动, 发生“蓝移”现象, 表明多碱阴极  $\text{Na}_2\text{KSb}$  膜层在进行表面 Cs 激活之后, 跃迁电子的能级有所升高。多碱阴极无论是单独采用 Cs 激活还是采用 Cs、Sb 同时激活, 光谱响应的长波阈值基本相同, 但光谱响应却不相同, 原因是采用 Cs、Sb 同时激活时,  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层存在“体积”效应。由于  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极存在长波吸收限, 对应的光子能量为 1.35 eV, 因此如果多碱阴极的逸出功进一步降低并且低于 1.35 eV 时, 尽管多碱阴极的光谱响应会进一步提高, 但光谱响应的长波阈并不会向长波方向延伸, 此时多碱阴极光谱响应的长波阈值由其长波吸收限所决定。

**关键词:** 多碱阴极; 光电发射; 电子跃迁; 逸出功

中图分类号: O462.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2012)12-0729-05

## Study on Electron Escaping Mechanism of Multi-alkali Photocathode in the Super Gen. II Image Intensifier

LI Xiao-feng<sup>1,2</sup>, QU Li-ping<sup>2</sup>, HUANG Jian-min<sup>2</sup>, ZHANG Yun-kun<sup>2</sup>

(1.Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China

2.North Night Vision Science & Technology Group Co., Ltd, Kunming 650114, China)

**Abstract:** By measuring the multi-alkali cathode spectral reflectance and transmittance of super gen. II image intensifier, the spectral absorption was obtained through calculating by the energy conservation law. The spectral absorption indicates that, when the wavelength is greater than 850 nm, the absorption of the multi-alkali cathodes drops quickly, but when the wavelength is greater than 915 nm, the absorption drops slowly, and is less than 5%. This shows that the multi-alkali cathode spectral absorption has a long wavelength absorption limit of 915 nm. If the wavelength of the incident light is greater than the absorption limit, it will not be absorbed by multi-alkali cathode. During the electronic transition process of multi-alkali cathodes after the absorption of a photon, the energy increases of transition electron is less than the energy of the incident photons, i.e. there is an “energy loss”. The higher the photon energy and the higher transition electron's energy level are, the greater the energy loss is. After  $\text{Na}_2\text{KSb}$  cathode film of super gen. II image intensifier was activated by Cs, the peak wavelength of the fluorescence is shift toward blue, i.e. “blue shift” phenomenon was occurred. This indicated that transition electron energy levels of  $\text{Na}_2\text{KSb}$  cathode film was promoted because of surface Cs activation. Whether  $\text{Na}_2\text{KSb}$  cathode was activated by Cs alone or by Cs and Sb simultaneously, their long wavelength threshold are substantially same, but spectral response are not same.

收稿日期: 2012-07-12.

作者简介: 李晓峰 (1963-), 男, 高级工程师, 博士, 真空光电器件。Email: lxf@nvt.com.cn.

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金, 编号: J2011016.

The reason is that there is a kind of “volume effect” in  $\text{Na}_2\text{KSb}$  layer. The  $\text{Na}_2\text{KSb}$  layer has a long wave absorption limit corresponding to photon energy of 1.35 eV. When work function is low than 1.35 eV, the long wavelength threshold of spectral response would not stretch toward long wavelength although spectral response would increase further. On this occasion, the long wavelength threshold of spectral response would be determined by long wavelength absorption limit.

**Key words:** multi alkali photocathode, photoemission, electron transition, work function

## 0 引言

超二代像增强器  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$  多碱光电阴极(简称多碱阴极)是一种多晶半导体阴极, 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。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、分辨力等性能参数也随之提高, 因此使得超二代像增强器的应用仍然十分广泛。国外高性能超二代像增强器的信噪比已经达到了 25, 若该像增强器仍采用  $\Phi 6 \mu\text{m}$  孔径 MCP, 那么根据 MCP 噪声因子计算, 其多碱阴极的灵敏度已经超过  $900 \mu\text{A}/\text{lm}$ , 而超二代像增强器的阴极灵敏度一般在  $750 \mu\text{A}/\text{lm}$  左右, 因此高性能超二代像增强器多碱阴极的灵敏度相比超二代像增强器的阴极灵敏度又提高了 20%。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。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<sup>[1-5]</sup>。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。有了光吸收和电子跃迁, 如果电子没有足够的能量扩散到阴极膜层的表面, 或即使电子扩散到阴极的表面, 但没有足够的能量克服逸出功, 电子也不能逸出阴极表面而产生光电发射。根据多碱阴极光电发射过程的原理, 要获得高的光谱响应, 需要多碱阴极的吸收率高、电子跃迁的几率高、电子跃迁的能级高、电子扩散到真空界面的几率高, 同时逸出功低。因此对多碱阴极光电发射过程的研究, 应该围绕以上的各个过程进行, 其中主要是电子跃迁过程和逸出过程。对多碱阴极电子跃迁过程的研究可以采用测量其荧光谱的方法, 而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>[6-11]</sup>。为了进一步提高超二代像增强器的阴极灵敏度, 需要进一步研究多碱阴极电子逸出的机

理, 进一步揭示多碱阴极在电子逸出过程中的客观规律, 这样才能为制作具有更高阴极灵敏度的多碱阴极提供理论指导, 因此有必要进一步对多碱阴极电子逸出的机理进行研究。

## 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。多碱阴极必须保存在真空中, 一旦暴露大气, 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,  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层就制作在玻璃窗内表面, 结构如图 1 所示。多碱阴极光电发射的原理是垂直入射的入射光穿透玻璃并到达  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层,  $\text{Na}_2\text{KSb}$  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。多碱阴极膜层是一种半导体薄膜, 其折射率为复折射率, 包括实部折射率  $n$  和虚部消光系数  $k$ , 因此多碱阴极膜层在存在反射和折射的同时还存在吸收。因为多碱阴极的折射率很高, 约为 3.3, 因此入射光在玻璃表面、玻璃与  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层的界面以及  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层与真空的界面上存在较高的反射。另外除一次反射外, 还存在多次反射和较复杂的反射、折射和干涉过程。因此入射光线不可能全部被  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层所吸收。入射光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。

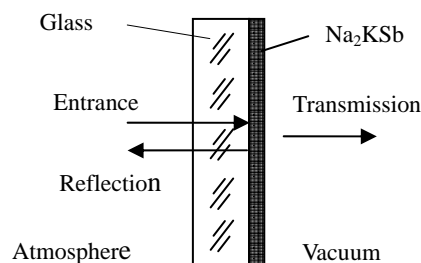


图 1 多碱光电阴极结构示意图

Fig.1 Diagram of multi-alkali photocathode structure

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的测量,可采用 Lambda950 分光光度计进行,测量范围为 350~1200 nm,环境温度为 22℃。图 2 是超二代像增强器多碱阴极样品光谱反射率、透过率和吸收率曲线,其中反射率和透过率为实测结果,吸收率为根据实测反射率和透过率的计算结果。

从图 2 看出,多碱阴极对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。吸收率由于受到反射率的调制,没有呈现出一条理想的指数型衰减的曲线,而透射率受反射率影响的程度不大,仍遵循一条近似指数型上升的曲线。由于短波的吸收长度小于长波的吸收长度,因此按理短波的吸收率应高于长波的吸收率较低,即随着波长的增大,吸收率应该变小。但从测量的吸收曲线看,多碱阴极的吸收率并不完全是这样。吸收曲线存在一个极大值,吸收率为 78%,波长为 550 nm。在波长小于 550 nm 的区间,吸收率随波长的增加而减小。原因是受到反射率的影响,因为反射的越多,吸收的越少。多碱阴极的吸收率在波长大于 550 nm 之后,随波长的增加而减小。值得注意的是,当波长达到 850 nm 之后,至 915 nm 之间,多碱阴极吸收率的下降变快,但当波长达到 915 nm 之后,吸收率下降速率又变慢,并且吸收率降到 5% 以下。两个区间吸收率的变化相差 10 倍以上。

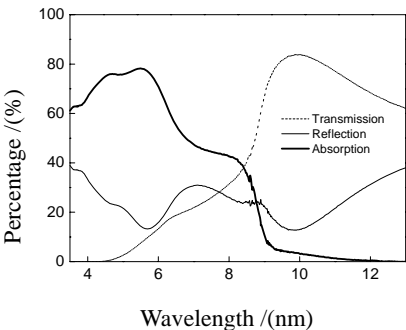


图 2 光谱反射、透射和吸收曲线  
Fig.2 Reflection, transmission and absorption

吸收曲线的这一特性应该与多碱阴极的内部能带结构有关。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 的光子或波长小于 1240 nm 的光线均可以激发价带电子发生跃迁,因此都会产生光吸收,但由于当光线的波长大于 915 nm 后,吸收率小于 5%,而且无有效的光电发射,因此可以认为波长大于 915 nm 之后的吸收不是一种跃迁吸收,而是一

种热吸收,所以可以认为 915 nm 波长是多碱阴极产生跃迁吸收和光电发射的长波吸收限。超过这一波长,由于无光电发射,因此吸收是一种热吸收。

2 多碱阴极电子跃迁特性分析

多碱阴极在吸收光子之后,跃迁电子如果不逸出多碱阴极表面,最终将回到基态。在此过程中,跃迁电子的能量将会通过光的形式释放出来。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、半峰宽等参数,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。

采用英国雷尼绍公司 (Renishaw) inVia 型号的光谱仪对超二代像增强器多碱阴极膜层进行测量。典型的超二代像增强器多碱阴极在 785 nm 波长激光激发条件下测得的荧光谱见图 3。因为多碱阴极荧光谱的峰值波长反映跃迁电子的能级高低,而荧光谱的峰值强度反映跃迁电子的数量。根据测不准原理,荧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。

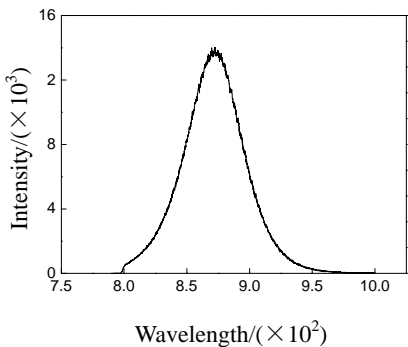


图 3 多碱阴极样品的荧光谱  
Fig.3 Fluorescence spectrum of cathode sample

表 1 是 107#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数据。表中  $\lambda_0$  表示激光的波长,  $\nu_0$  表示激光波长对应的光子能量,  $\nu_1$  表示荧光的峰值波长所对应的光子能量,  $\Delta E$  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 1 107#样品荧光测试结果

Table 1 Data of fluorescence spectrum				
$\lambda_0/\text{nm}$	$\lambda_1$	$\nu_0/\text{eV}$	$\nu_1/\text{eV}$	$\Delta E/\text{eV}$
514.5	870	2.41	1.42	0.99
785	887	1.58	1.39	0.19

从表 1 看出，不管是 514.5 nm 的短波激发还是 785 nm 的长波激发，所获得的荧光谱的峰值波长总是大于激发光的波长。如对 514.5 nm 的短波激发，荧光谱的峰值波长为 870 nm，而对 785 nm 的长波激发，荧光谱的峰值波长为 887 nm。514.5 nm 波长光子的能量为 2.41 eV，荧光峰值波长对应光子的能量为 1.42 eV，能量差为 0.97 eV。而 785 nm 波长光子的能量为 1.58 eV，荧光峰值波长对应光子的能量为 1.39 eV，能量差为 0.19 eV。比较短波 514.5 nm 激发和长波 785 nm 激发的能量损失，可以看出，多碱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。产生能量损失的原因是电子在跃迁过程中存在碰撞损失。短波激发与长波激发相比，除能量损失较大之外，所激发跃迁电子的能级也高。因此在电子的逸出过程中，如果不考虑电子在扩散过程中的能量损失，那么短波光子产生的光电子与长波光子产生的光电子相比，在逸出光电阴极表面时具有更高的初始动能。

多碱阴极在制作过程中，一个非常关键的过程就是进行表面激活，即在制作完工 Na<sub>2</sub>KSb 阴极膜层之后，在其表面再制作一层较薄的 Cs-Sb 层，俗称激活。Na<sub>2</sub>KSb 阴极膜层在激活完成之后，阴极灵敏度有大幅度的提升。对表面未进行 Cs 激活的多碱阴极样品 A 和表面进行了 Cs 激活的多碱阴极样品 B 进行了荧光进行了测试，测量时所采用的激光波长为 785 nm，荧光谱曲线见图 4。

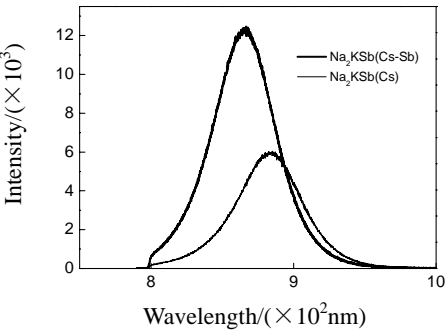


图 4 多碱阴极样品荧光谱  
Fig.4 Luminescence spectra of cathode film  
图 4 中荧光强度较弱的曲线为 A 样品的荧光谱，

荧光强度较强的曲线为 B 样品的荧光谱。比较两条曲线，可以看出 Na<sub>2</sub>KSb 膜层在进行激活之后，不仅荧光强度有所增加，峰值荧光强度从 5941 变为 12830，而且荧光的峰值波长也向短波方向移动，从 891 nm 变为 864 nm，发生“蓝移”。荧光强度增加，意味着跃迁电子的数量增加，荧光峰值波长发生“蓝移，从 891 nm 变为 864 nm，意味着电子跃迁能级升高，即从 1.41 eV 变为 1.43 eV。荧光测量结果见表 2，表中 I 表示荧光的峰值强度， $\lambda$ 表示荧光的峰值波长。

表 2 128#样品荧光测试结果

Table 2 Data of fluorescence spectrum			
Sample	Film	I/a.u	$\lambda/\text{nm}$
A	Na <sub>2</sub> KSb	5941	891
B	Na <sub>2</sub> KSb(Cs-Sb)	12830	864

多碱阴极在激活前后荧光谱的变化表明多碱阴极在激活之后，由于跃迁电子的数量和能级均有提高，因此对阴极灵敏度的提高起到了积极的作用，所以 Cs 激活之后阴极灵敏度的提高有来自 Na<sub>2</sub>KSb 膜层本身能带结构变化的因素，即存在“体积”效应的因素。

3 多碱阴极光谱响应特性分析

多碱阴极在进行 Cs 激活时，实际上是在 Na<sub>2</sub>KSb 阴极膜层的表面上制作一层较薄的 Cs-Sb 层。为了比较仅仅用 Cs 激活和用 Cs 和 Sb 同时激活条件下多碱阴极光谱响应的区别，对 Cs 激活样品和 Cs-Sb 激活样品的光谱响应曲线进行了测量，测量结果见图 5。所采用的仪器为南京理工大学研制的自动光谱响应测试仪。

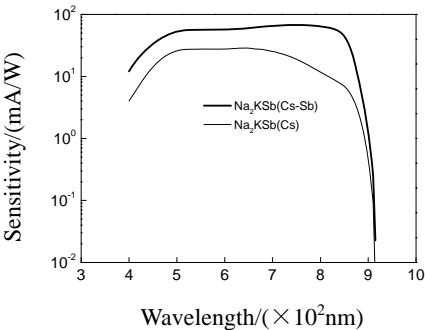


图 5 多碱阴极光谱响应  
Fig.5 Spectral response of cathode film  
图中可以看出，两种样品光谱响应的长波截止波长基本相同，约为 915 nm，但光谱响应差别较大。因为长波截止波长由逸出功所决定，所以 Na<sub>2</sub>KSb 阴极膜层无论是单独采用 Cs 激活还是采用 Cs、Sb 同时激

活,表面电子亲和势的降低是相同的。采用 Cs、Sb 同时激活,由于存在跃迁电子的能级升高和跃迁电子的数量增多的“体积”效应,因此阴极灵敏度较单纯用 Cs 激活所获得的阴极灵敏度高。

根据多碱阴极样品在 Cs 激活或 Cs、Sb 激活后的光谱响应长波截止波长,可以计算出激活之后的逸出功为 1.35 eV。 $\text{Na}_2\text{KSb}$  多碱阴极是一种多晶半导体薄膜,其禁带宽度为 1 eV,逸出功为 1.35 eV,因此表面电子亲和势为 0.35 eV,能带结构示意图见图 6。该图中, $E_+$ 为禁带底, $E_-$ 为导带顶, $E_v$ 为真空能级, $E_g$ 为禁带宽度, $\phi_A$ 为逸出功。

因为  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层存在 915 nm 的长波吸收限,对应的光子能量为 1.35 eV,因此能量低于 1.35 eV 的光子将不产生跃迁电子。一旦逸出功低于跃迁吸收限波长所对应的能级以后,尽管会进一步提高多碱阴极的光谱响应,但不会使光谱响应的长波截止波长向长波方向延伸,此时多碱阴极光谱响应的长波截止波长就由吸收阈值所决定。

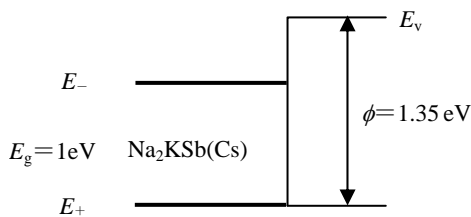


图6  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层能带示意图

Fig.6 Energy band illustration of  $\text{Na}_2\text{KSb}$  cathode

最后需要说明的是,本文介绍的实验和分析只针对超二代像增强器样品,因此所获得的结论或结果只适应于超二代像增强器多碱阴极。多碱阴极的光电发射机理还未定论,仍有许多问题需要进一步的研究。

## 4 结论

1) 多碱阴极光谱吸收曲线变化的趋势仍是短波的吸收率高于长波的吸收率。但当波长大于 850 nm 以后,吸收率在 850 nm 至 915 nm 之间下降很快。当波长大于 915 nm 之后,吸收率下降到 5% 以下,并且下降的速率变慢。当光子的波长小于 850 nm 之后以后,多碱阴极的吸收率才开始快速增大并达到 49%。因此可以认为 915 nm 为多碱阴极的光谱吸收限,入射光的波长如果大于该吸收限,多碱阴极将不吸收。

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。超二代像增强器  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层在 Cs 激活之后,荧光的峰

值波长向短波方向移动,发生“蓝移”,表明多碱阴极  $\text{Na}_2\text{KSb}$  基层在进行表面 Cs 激活之后,跃迁电子的能级有所提高,这导致了光谱响应的进一步提高。

3) 由于  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层在 Cs 激活或 Cs、Sb 同时激活条件下的逸出功相同且为 1.35 eV,因此光谱响应的长波阈相同,为 915 nm。但采用 Cs、Sb 同时激活的多碱阴极具有更高的光谱响应,原因是采用 Cs、Sb 同时激活时, $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极膜层存在“体积”效应,即跃迁电子的能级升高,跃迁电子的数量增加。由于多碱阴极存在长波吸收限,因此当逸出功进一步降低,低于长波吸收限对应的光子能量时,光谱响应的长波阈由长波吸收限所决定。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZOU Ji-jun, CHANG Benkang, 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.
- [3] 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.
- [4] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang. Gradient -doping negative electron affinity GaAs photocathodes[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(5): 054001.
- [5] LIU Lei, CHANG Ben-kang. Spectral response characterization of super  $S_{25}$  and new  $S_{25}$  photocathodes[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(4): 946-949.
- [6] 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.
- [7] 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**: 093108.
- [8] 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**: 013714.
- [9] 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**: 033126.
- [10] 姚琴芬, 顾国华. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测算法[J]. *红外技术*, 2012, **34**(8): 441-443.
- [11] 常本康. 多碱光电阴极[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011.