

文章编号: 0253-2239(2006)04-0536-5

铟封前后透射式 GaAs 光电阴极光谱响应特性的测试与分析

杜晓晴^{1,2} 常本康² 钱芸生² 邹继军²

(¹ 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044
² 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 利用自行研制的光谱响应测试仪工程化样机,对透射式 GaAs 光电阴极在高温激活结束、低温激活结束以及铟封成管后的光谱响应特性进行了测试。结果显示,铟封后阴极整个响应波段的光谱响应下降,长波响应受到最显著的影响,表现为 800~815 nm 之间长波响应大幅度衰减,截止波长和峰值波长向短波移动,峰值响应和积分灵敏度减小,最终的光谱响应曲线变得平坦。阴极参量的计算结果反映铟封后阴极的表面逸出几率降低,说明铟封引起阴极表面激活层发生变化,使得能量较低的长波段光生电子不容易逸出,阴极长波响应和灵敏度随之降低。进一步分析了铟封过程中影响阴极表面激活层的因素。

关键词: 光电子学; GaAs 光电阴极; 铟封; 光谱响应测试; 长波响应; 逸出几率

中图分类号: TN214 文献标识码: A

Measurement and Analysis of Spectral Response Characteristic of Transmission-Mode GaAs Photocathode before and after Indium Seal

Du Xiaoqing^{1,2} Chang Benkang² Qian Yunsheng² Zou Jijun²

(¹ *Institute of Photoelectric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044*
² *Institute of Electronic Engineering and Opto-Electric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094*)

Abstract: Spectral response characteristics of transmission-mode GaAs photocathode after high-temperature activation, low-temperature activation and indium sealed into intensifier are measured by use of the home-made prototype of spectral response measurement instrument. The results show that spectral response curve in the whole response waveband decreases after indium seal, and long-wave responsibility is most obviously influenced. The long-wave response 800~815 nm decreases largely, cut-off wavelength and peak value wavelength move towards short-wave, peak response value and integral sensitivity decrease, and the final spectral response curve becomes flat. The calculation results of photocathode parameters reflect that surface escape probability decreases after indium seal, which indicates that indium seal leads to the variations of surface activation layers of photocathode, low-energy photoelectrons under long-wave are difficult to escape, and the long-wave response and sensitivity decrease accordingly. The influencing factors on the surface activation layers during indium seal are also analyzed.

Key words: optoelectronics; GaAs photocathode; indium seal; spectral response measurement; long-wave response; escape probability

1 引 言

透射式 GaAs 光电阴极是第三代微光像增强器的核心部件,决定了增强器的总体性能。目前国内制

备的透射式 GaAs 光电阴极在积分灵敏度和稳定性方面与国外还有一定的差距。其中铟封工艺对阴极灵敏度的影响不可忽略。目前国内透射式 GaAs 光

作者简介: 杜晓晴(1978~),女,重庆人,重庆大学教师,博士,主要从事光电探测材料及器件的研究。

E-mail: muyuandu@sina.com

收稿日期: 2005-04-20; 收到修改稿日期: 2005-07-08

电阴极在激活台内的灵敏度大于 $1300 \mu\text{A}/\text{lm}^{[1]}$ ，双钢封到第三代微光管后阴极灵敏度大于 $800 \mu\text{A}/\text{lm}$ ，说明 GaAs 光电阴极的光电发射性能在钢封前后发生了较大变化。对于这种变化目前只能给出积分灵敏度这一单一的表征参量，缺乏有效的测试手段来获得阴极更为细致的光电发射性能参量。这在很大程度上限制了第三代微光管钢封工艺的研究以及钢封工艺水平的提高。

本文利用自行研制的光谱响应测试仪工程化样机以及在线光谱响应测试技术^[2~4]，考察了钢封前后透射式 GaAs 光电阴极的光谱响应特性曲线的变化，并根据测试曲线，获得了钢封前后阴极光谱响应特性参量、积分灵敏度以及阴极参量等多个性能参量的变化情况。

2 在线光谱响应测试

光谱响应测试的原理方框图如图 1 所示。测试仪采用直流稳压电源供电的 12 V-120 W 的卤钨灯作为光源，辐射波长范围 400~1000 nm。经过调制器和光栅单色仪出来的单色光经过光纤传递，由石英棒衰减后入射到阴极面上。阴极产生的光电信号经过微弱信号检测和模-数转换被计算机采集，计算机将采集的信号进行处理，转换成相应的光电流，与对应的单色光辐射功率相比，即可获得阴极在该单色光照下的光谱响应值。扫描器带动光栅单色仪，从设定的起始波长开始，以 5 nm 的扫描间隔步长对入射白光光源进行单色分光，使得测试波段内的单色光入射到光电阴极，从而获得一条完整和平滑的光谱响应曲线。

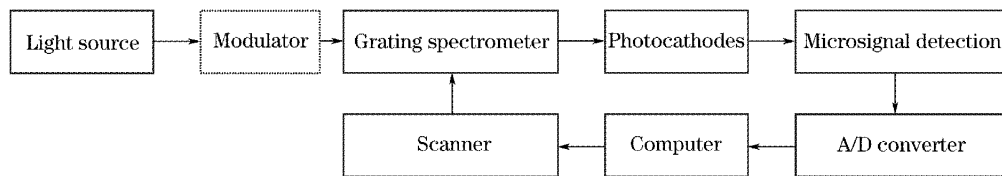


图 1 光谱响应测试原理方框图

Fig. 1 The block diagram of spectral response measurement

对超高真空激活系统内的透射式 GaAs 光电阴极，需要采用在线测试手段。激活过程中，在线光谱响应曲线包含阴极制备工艺和阴极材料性能相关的信息，为研究阴极的机理和改进制备工艺提供了理论依据。在这项在线光谱响应测试技术中，光谱响应测试仪与激活台之间的测试接口设计是主要技术难点，它要求在不破坏超高真空系统，不影响超高真空度以及三代微光像增强器正常制备的条件下，实现对阴极在线光谱响应曲线的准确测试。根据该激活台入射光路结构以及光电信号的输出方式，合理设计了在线光谱响应测试的接口结构，如图 2 所示。光谱响应测试仪的光栅单色仪与光纤相接，通过该光纤再与激活

台的白光传光光路对接。阴极在光照下产生光电信号，通过机械手引出线引出激活台外，并与光谱响应测试仪的信号处理模块相连，从而实现光电信号的采集、处理和显示。超高真空激活系统的真空度可以保持在 1×10^{-8} Pa 以上，样品台操作通过机械手控制，达到了不影响器件可靠制备的目的。

由于入射光为单色光，并经过光纤和反射光路的衰减，最终到达阴极表面的入射光功率很低（一般为 μW 量级），阴极在最初激活阶段所产生的光电流也相应较小（一般为几到几十 nA），这对光谱响应测试仪的测试精度提出了很高要求。通过合理设计光谱响应测试仪的微弱信号检测放大电路，测试仪的

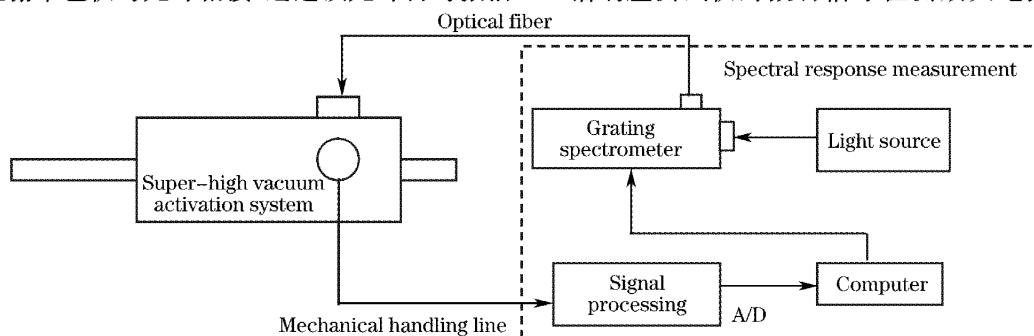


图 2 在线光谱响应测试的接口示意图

Fig. 2 The interface diagram of on-line spectral response measurement

测试精度最高可达 10^{-9} A, 完全保证了在线光谱响应的准确测试。

3 光谱响应测试结果及分析

利用上述在线光谱响应测试技术, 对透射式 GaAs 光电阴极在高温激活结束后、低温激活结束

后以及钢封成管后的光谱响应特性曲线进行了测试, 测试结果如图 3 所示。其中图 3(a) 光谱响应纵坐标测采用传统的对数坐标, 图 3(b) 采用均匀坐标, 以更加明显地给出三条曲线的差异。

根据图 3 的测试曲线, 计算了每条曲线对应的积分灵敏度及光谱响应特性参量, 如表 1 所示。

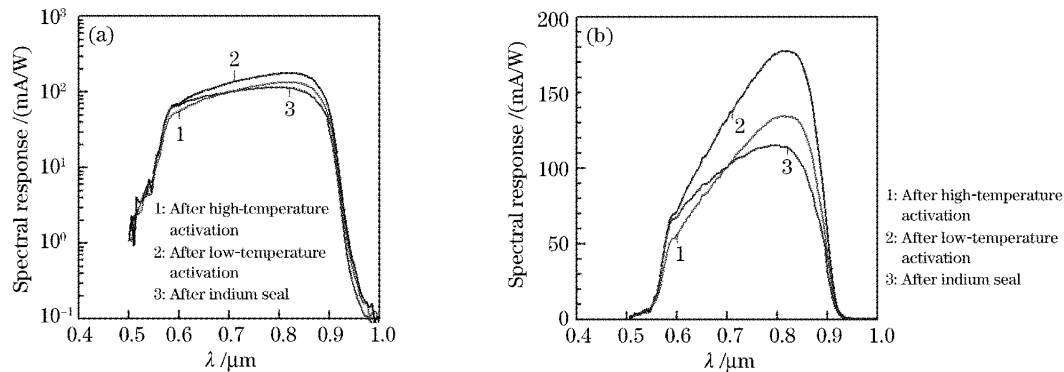


图 3 钢封前后透射式 GaAs 光电阴极的光谱响应测试曲线。(a) 对数纵坐标, (b) 均匀纵坐标

Fig. 3 Spectral response curves of transmission-mode GaAs photocathode before and after indium seal.

(a) Logarithm vertical axis, (b) uniform vertical axis

表 1 钢封前后光谱响应曲线的特性参量变化

Table 1 Variations of performance parameters of spectral response curves before and after indium seal

Curves	Start wavelength /nm	Cut-off wavelength /nm	Peak response /(mA/W)	Peak wavelength /nm	Integral sensitivity /(μA/lm)
1	500	950	134.4	815	1004
2	500	955	177.7	815	1321
3	500	940	115.2	800	917

从光谱响应曲线形状看, 三条曲线的起始波长相同, 但截止波长有差异, 其中高温激活结束后阴极的截止波长为 950 nm, 低温激活结束后截止波长向长波移动了 5 nm, 钢封后阴极的截止波长却向短波移动了 15 nm。高低温激活结束后阴极的峰值波长没有发生变化, 而钢封后阴极的峰值波长也向短波移动了 15 nm, 且峰值响应明显较低。这些变化都说明钢封后阴极的长波响应能力降低了。

三条曲线的平坦性也有差异, 其中高温激活和低温激活后阴极的光谱响应曲线比较陡峭, 长波响应明显大于短波响应, 钢封后阴极的光谱响应曲线变得比较平坦。进一步观察可以发现钢封后的光谱响应曲线低于低温激活结束后的曲线, 这说明钢封后阴极在每个波长下的光谱响应都有衰减。入射波长不同, 光谱响应的衰减程度也不一样, 在 580~815 nm 之间, 入射波长越长, 光谱响应衰减越大, 其中在 800~815 nm 之间钢封前后阴极的光谱响应差距最大, 而 815 nm 和 800 nm 正好分别对应低温激活结束和钢封后光谱响应曲线的峰值位置, 这进

一步说明钢封后阴极长波响应衰减较多。

从阴极的积分灵敏度看, 与高温激活相比, 低温激活后阴极的积分灵敏度提高了 31%, 符合标准高低温两步激活后灵敏度能提高“30%~40%”的标准^[5], 说明激活工艺是成功的。低温激活结束后阴极的灵敏度为 1321 μA/lm, 钢封后阴极的灵敏度降至 917 μA/lm, 灵敏度下降了近 30%, 这个下降幅度是比较大的。

以上光谱响应曲线的分析表明, 钢封后阴极的光谱响应特性发生了明显变化, 与低温激活结束相比, 钢封后阴极在整个响应波段的光谱响应都有不同程度的衰减, 而长波响应受到最显著的影响, 表现为 800~815 nm 之间长波响应大幅度衰减, 截止波长和峰值波长向短波移动, 峰值响应和积分灵敏度减小, 最终的光谱响应曲线变得比较平坦。

4 阴极参量计算及分析

为了探询 GaAs 光电阴极钢封前后光谱响应特性的这种差异, 利用透射式 GaAs 光电阴极的量子

效率公式^[6]:

$$Y(h\nu) = \frac{P(1-R)\alpha_{hv}L_D}{\alpha_{hv}^2L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{\alpha_{hv}D_n + S_v}{(D_n/L_D)\cosh(T_e/L_D) + S_v\sinh(T_e/L_D)} - \frac{\exp(-\alpha_{hv}T_e)[S_v\cosh(T_e/L_D) + (D_n/L_D)\sinh(T_e/L_D)]}{(D_n/L_D)\cosh(T_e/L_D) + S_v\sinh(T_e/L_D)} - \alpha_{hv}L_D\exp(-\alpha_{hv}T_e) \right\}, \quad (1)$$

式中 $Y(h\nu)$ 为阴极的量子效率, P 是阴极表面逸出几率, L_D 是 GaAs 发射材料的电子扩散长度, S_v 为后界面复合速率, T_e 是阴极厚度, R 是阴极表面对入射光的反射率, D_n 是电子扩散系数, α_{hv} 为 GaAs 阴极材料的光谱吸收系数。

对图 3 测试曲线进行了曲线拟合^[7](曲线拟合时选取 $T_e = 1.6 \mu\text{m}$, $R = 0.3$, $D_n = 120 \text{ cm}^2/\text{s}$), 获得了钢封前后阴极表面逸出几率、电子扩散长度以及后界面复合速率这三个重要阴极参量的变化情况, 结果如表 2 所示。

表 2 钢封前后阴极参量比较

Table 2 Comparison of photocathode parameters before and after indium seal

Curves	Surface escape probability	Electron diffusion length / μm	Interface recombination velocity / (cm/s)
1	0.50	1.5	10^6
2	0.65	1.5	10^6
3	0.47	1.5	10^6

拟合结果反映, 电子扩散长度和后界面复合速率没有发生变化, 而阴极的表面逸出几率在钢封前后存在差异, 其中低温激活后表面逸出几率为 0.65, 比高温激活后的表面逸出几率提高了 30%, 其提高幅度与灵敏度的提高幅度一致。钢封后阴极的表面逸出几率低于高温激活和低温激活后的水平, 为 0.47, 比低温激活后的表面逸出几率降低了 28%, 其降低幅度与灵敏度的降低幅度基本一致。

GaAs 光电阴极的高低温两步激活方法是在较高温度的加热净化、Cs, O 交替循环(yo-yo)激活之后, 再来一次温度较低的加热和 Cs, O 交替循环激活。阴极的表面分析结果表明^[8~10], 与第一步高温激活相比, 第二步低温激活更有利于获得一个优化的表面激活层结构, 从而提高阴极的表面逸出几率, 最终获得更高的阴极灵敏度。我们的实验结果也证明, 低温激活结束后阴极的表面逸出几率得到了提高。

在透射式 GaAs 光电阴极组件低温激活结束后, 将三代微光管壳通过钢槽与阴极和荧光屏封接在一起就构成钢封工艺。钢封过程中, 微通道板(MCP)和荧光屏是像管内部两个主要的放气

源^[11,12], 它们将造成像管内残余气体增多^[12], 真空度下降, 阴极表面受到离子轰击后表面发生变化, 引起阴极衰减^[13]。其中能量较低的长波段光生电子更容易受到表面变化的影响^[14]。阴极的表面逸出几率降低, 长波响应能力下降。

GaAs 光电阴极的表面逸出几率对表面层厚度的变化非常敏感。阴极表面激活层厚度存在一个最佳值, 一般为 $0.7 \sim 1.0 \text{ nm}$ ^[15], 如果偏离该最佳值, 过大或过小, 表面逸出几率都会下降。如果假设钢封过程中残余气体与阴极表面作用, 形成残余势垒, 就会导致阴极表面层厚度大于最佳厚度, 当阴极厚度偏离最佳厚度 0.1 nm 时, 理论计算显示^[16], 此时表面逸出几率将下降 9%。 0.1 nm 只相当于半个氧原子单层, 对应表面原子浓度为 $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 左右。根据气体分子运动论得知^[17], 在 10^{-4} Pa 气压下, 晶体表面形成单原子层吸附所需时间约为 1 s ; 在 10^{-5} Pa 下约需 10 s ; 依此类推, 在 10^{-8} Pa 下就会延长到几个小时以上。因此根据 GaAs 光电阴极钢封所需时间, 钢封过程中要始终保证超高真空度优于 10^{-8} Pa , 才能有效避免残余气体对阴极表面造成的影响。

5 结 论

利用在线光谱响应测试技术, 本文解决了三代微光像增强器研制过程中高低温两步激活结束后 GaAs 光电阴极的在线光谱响应测试, 发现了钢封前后透射式 GaAs 光电阴极的光谱响应曲线存在明显差异, 钢封将导致阴极的光谱响应在整个响应波段有不同程度的下降, 其中长波响应衰减最为显著。阴极参量计算结果进一步表明, 钢封后阴极的表面逸出几率降低是导致阴极灵敏度下降的原因。通过对钢封过程的分析我们认为, 钢封后不同放气源产生的残余气体与阴极表面发生作用, 改变阴极表面激活层, 是导致钢封后阴极表面逸出几率下降、阴极长波响应能力降低的直接原因。

将光谱响应测试技术应用于三代微光像增强器的钢封工艺评估上, 并通过阴极参量分析了钢封工艺对阴极光电发射性能影响的内在作用机理, 为钢封工艺的优化提供了依据。这项工作同时表明, 光

谱响应测试是考察三代像增强器制备工艺的一种有效手段,它可以为三代像增强器研制流程中其他工艺的评估和优化提供依据。

参 考 文 献

- 1 Xu Jiangtao. The research of transmissive GaAs photocathode active technique[J]. *Applied Optics*, 2000, **21**(4): 5~7 (in Chinese)
徐江涛. 透射式 GaAs 光电阴极激活技术研究[J]. *应用光学*, 2000, **21**(4): 5~7
- 2 Chang Benkang, Xu Denggao, Qian Yunsheng *et al.*. Peak value position shifting of spectral response multialkali photocathodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2): 233~237 (in Chinese)
常本康,徐登高,钱芸生等. 多碱光电阴极光谱响应峰值位置移动技术研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(2): 233~237
- 3 Zong Zhiyuan, Chang Benkang. Calculation the quantum yield of NEA photocathode by integral[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1177~1181 (in Chinese)
宗志园,常本康. 用积分法推导 NEA 光电阴极的量子产额[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1177~1181
- 4 Li Wei, Zong Zhiyuan, Chang Benkang. Spectral matching factors of S₂₅ photocathodes for reflection spectrum of objects I. Dark green paint and green vegetation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 279~282 (in Chinese)
李蔚,宗志园,常本康. S₂₅ 光电阴极与景物反射光谱的光谱匹配系数 I. 暗绿色涂层和绿色草木[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 279~282
- 5 B. J. Stocker. AES and LEED study of the activation of GaAs-Cs-O negative electron affinity surfaces [J]. *Surface Science*, 1975, **47**: 501~513
- 6 Liu Yuanzheng, Wang Zhongchun, Dong Yaqiang. *Electron Emission and Photocathode* [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1995 (in Chinese)
刘元震,王仲春,董亚强. 电子发射与光电阴极[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- 7 Zong Zhiyuan, Chang Benkang. A study on computer simulation of S₂₅ series photocathodes spectral responses[J]. *J. Nanjing University of Science and Technology*, 1998, **22**(3): 228~231 (in Chinese)
宗志园,常本康. S₂₅ 系列光电阴极的光谱响应计算机拟合研究[J]. *南京理工大学学报*, 1998, **22**(3): 228~231
- 8 D. C. Rodway, M. B. Allenson. In situ surface study of the activating layer on GaAs(Cs,O) photocathodes[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1986, **19**: 1353~1371
- 9 Qingbin Lu, Yongxi Pan, Huairong Gao. Optimum (Cs,O)/GaAs interface of negative-electron-affinity GaAs photocathodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 634~637
- 10 Wang Guihua, Fu Rongguo, Yang Weiyi. Quantitative study on (Cs,O)/GaAs under annealing by angular dependent XPS[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2001, **7**(1): 58~62 (in Chinese)
汪贵华,富容国,杨伟毅. (Cs,O)/GaAs 热退火的变角 XPS 定量研究[J]. *真空与低温*, 2001, **7**(1): 58~62
- 11 Wang Jinxian, Yang Hanqiong. Analysis of stability of imaging intensifiers[J]. *Cloud and Light Technology*, 1999, **31**(2): 43~48 (in Chinese)
王近贤,杨汉琼. 象增强器稳定性分析[J]. *云光技术*, 1999, **31**(2): 43~48
- 12 Xu Jiangtao. Effect of residual gas on emission property of gallium arsenide cathode in vacuum[J]. *Applied Optics*, 2003, **24**(2): 13~15 (in Chinese)
徐江涛. 真空残气对 GaAs 阴极发射性能的影响[J]. *应用光学*, 2003, **24**(2): 13~15
- 13 A. H. Sommer. Stability of photocathode[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(1): 90~92
- 14 E. M. Yee, D. A. Jackson. Photoyield decay characteristics of a cesiated GaAs[J]. *Solid-State Electronics*, 1972, **15**: 245~247
- 15 C. Y. Su, W. E. Spicer, I. Lindau. Photoelectron spectroscopic determination of the structure of (Cs,O) activated GaAs (110) surface[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(3): 1413~1422
- 16 Zong Zhiyuan, Fu Rongguo, Qian Yunsheng. Calculation of electron surface escape probability of GaAs:Cs-O NEA photocathodes[J]. *Infrared Technology*, 2002, **24**(3): 27~30 (in Chinese)
宗志园,富容国,钱芸生等. GaAs:Cs,O NEA 光电阴极电子表面逸出几率的计算[J]. *红外技术*, 2002, **24**(3): 27~30
- 17 Yang Bangchao, Wang Wensheng. *Physics and Technology of Thin Films* [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 1994 (in Chinese)
杨邦朝,王文生. 薄膜物理与技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1994