

# Super S<sub>25</sub> 与 New S<sub>25</sub> 光电阴极的光谱响应特性的数值模拟

刘 磊 常本康

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

**摘 要** 根据多碱光电阴极的光谱响应理论表达式, 对荷兰 DEP 公司和日本 Hamamatsu 公司美国分公司开发的两种 Super S<sub>25</sub> 阴极的光谱响应曲线进行了理论模拟, 得到了这些阴极的有关特性参量, 并通过对模拟结果的分析以及与美国夜视实验室研制的 New S<sub>25</sub> 光电阴极特性的比较, 揭示了两种 Super S<sub>25</sub> 光电阴极内在机理和可能采用的工艺处理方法, 对多碱光电阴极的理论研究和实际操作具有指导意义.

**关键词** Super S<sub>25</sub>; 光电阴极; 光谱响应; 模拟

**中图分类号** TN223 **文献标识码** A

## 0 引言

在众多的多碱光电阴极中, S<sub>25</sub> 系列阴极因为具有较高的灵敏度和较好的长波响应而受到普遍重视, 特别是 Super S<sub>25</sub> 阴极, 一般具有宽而平坦的光谱响应, 而且响应值很高, 在 500 ~ 850 nm 波长范围以内具有 60 ~ 70 mA/W 的灵敏度. 例如荷兰 DEP 公司的 Super S<sub>25</sub> 光电阴极具有峰值响应 70 mA/W, 而日本 Hamamatsu 公司美国分公司最新公布的 Super S<sub>25</sub> 光电阴极其峰值响应更达到了 78 mA/W<sup>[1]</sup>, 但是有关 Super S<sub>25</sub> 阴极的报道仅限于几条光谱响应曲线, 人们对它们的制备工艺, 组成成分等知之甚少. 本文从 Super S<sub>25</sub> 阴极和 New S<sub>25</sub> 光电阴极的光谱响应出发, 对其进行理论模拟, 得到了这些阴极的有关特性参量, 分析了阴极参量对阴极性能的影响, 揭示了 Super S<sub>25</sub> 光电阴极内在机理和可能采用的工艺处理方法, 模拟结果表明理论和试验得到较好吻合, 对多碱光电阴极的理论工艺研究具有指导意义.

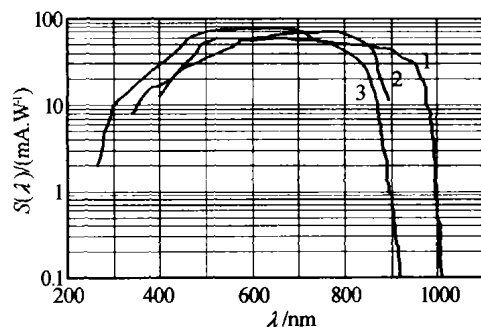
## 1 Super S<sub>25</sub> 及 New S<sub>25</sub> 光电阴极简介

S<sub>25</sub> 光电阴极包括 S<sub>251</sub>, S<sub>252</sub>, New S<sub>25</sub>, Super S<sub>251</sub> 和 Super S<sub>252</sub>. 其中 S<sub>251</sub> 和 S<sub>252</sub> 分别由 JEDEC 和荷兰的 DEP 公司命名, 二者均被命名为 S<sub>25</sub>, 这里为了区别起见, 分别称为 S<sub>251</sub> 和 S<sub>252</sub>. New S<sub>25</sub> 是美国夜视实验室研制的, Super S<sub>25</sub> 分别由荷兰的 DEP 公司和日本 Hamamatsu 公司美国分公司命名, 同样为了区别起见, 分别称为 Super S<sub>251</sub> 和 Super S<sub>252</sub>. 后者是日本公司最新推出的超 S<sub>25</sub> 光电阴极. 这三类阴极的光谱响应参量见表 1, 光谱响应曲线见图 1.

表 1 三种光电阴极的光谱响应参量

| 阴极名                    | 峰值响应 / (mA/W) | 峰值响应 波长/nm | 截至波长 /nm |
|------------------------|---------------|------------|----------|
| New S <sub>25</sub>    | 60            | 650        | 1010     |
| Super S <sub>251</sub> | 70            | 780        | 950      |
| Super S <sub>252</sub> | 78            | 630        | 950      |

从图 1 中看出, 三类光电阴极光谱响应均有各自的优点, 且整个响应曲线宽而平坦. 与 New S<sub>25</sub> 光电阴极相比, Super S<sub>251</sub> 的灵敏度在整个响应范围提高了约 10 mA/W, 短波效应较好, 但是长波响应仍然没有 New S<sub>25</sub> 阴极的好, 后者在 950 nm 处仍然有较高的灵敏度. Super S<sub>252</sub> 则兼顾了短波和长波两个范围响应, 其峰值灵敏度达到了 78 mA/W.



1-New S<sub>25</sub> 2-Super S<sub>251</sub> 3-Super S<sub>252</sub>

图 1 三种光电阴极的光谱响应曲线

Fig. 1 Spectral response of three photo cathodes

## 2 三种光电阴极光谱响应的理论模拟

### 2.1 多碱光电阴极光谱响应的理论表达式

在文献[1]中, 作者根据多碱阴极的光谱响应曲线形状将它们分为两类, 推导了相应的光谱响应表达式, 第一类阴极光谱响应曲线峰值约在 400 ~ 500 nm 之间, 这类阴极的显著特点是厚度较薄, 约 35 nm 左右, 积分灵敏度为 250 μA/lm. 第二类阴极光谱响应峰值在 670 nm 以上, 这类阴极一般较厚,

积分灵敏度为 472 ~ 705  $\mu\text{A}/\text{lm}$ . 这两类阴极的光谱响应表达式为

第一类

$$S(\lambda) = \frac{B\lambda^{-0.5}(1-\lambda/\lambda_j)^{1.5}}{\alpha_T(\lambda) - \beta} e^{12400 P \lambda} \cdot [e^{-\beta D} - e^{-\alpha_T(\lambda)D}] \quad (1)$$

第二类

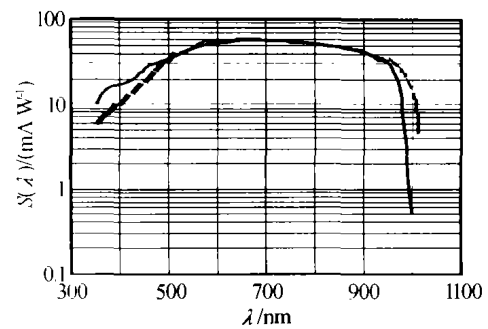
$$S(\lambda) = \frac{B\lambda^{1.5}(1-\lambda/\lambda_j)^{0.5}}{\alpha_T(\lambda) - \beta} e^{12400 P \lambda} \cdot [e^{-\beta D} - e^{-\alpha_T(\lambda)D}] \quad (2)$$

从式(1)、(2)可以看出,第一类和第二类光电阴极的光谱响应表达式主要在有效吸收系数以及逸出概率上存在差别,前者正比于  $\lambda^{-0.5}(1-\lambda/\lambda_j)^{1.5}$ , 后者正比于  $\lambda^{1.5}(1-\lambda/\lambda_j)^{0.5}$ .  $\lambda$  是入射光波长;  $\lambda_j$  是光电阴极光谱响应截至波长;  $\alpha_T(\lambda)$  是光电阴极的光吸收系数;  $D$  是光电阴极的厚度;  $B$  是常数,对不同工艺形成的光电阴极  $B$  值不同;  $\beta$  是光电子逸出深度的倒数;  $P$  为阴极结构参量,是表征光电阴极光电发射性能的物理量,综合反映了光电阴极的宏观性能和微观结构. 从宏观考虑,  $P$  与阴极厚度  $D$ , 光电阴极的光谱响应截至波长  $\lambda_j$ , 峰值响应波长  $\lambda_{\text{max}}$  以及光电阴极的积分灵敏度  $S$  有关,一般  $D, \lambda_j, \lambda_{\text{max}}$  和  $S$  增加,  $P$  增加; 反之则  $P$  减小. 从微观考虑,  $P$  应该与光电阴极层内的晶粒尺寸统计分布有关. 在阴极膜层中,如果大晶粒占主导地位,则具有较大的光电子平均逸出深度; 反之则  $P$  较小. 因此对于多晶膜,取  $P < 1$ , 对于单晶或“准单晶”膜,  $P > 1$ .

## 2.2 三种光电阴极的光谱响应理论模拟

根据前面的介绍, New  $S_{25}$ , Super  $S_{251}$  和 Super  $S_{252}$  均属于第二类阴极,对于这些阴极,  $D$  可以由阴极的颜色,根据经验估计得到,或者用光学方法测得;  $\alpha_T(\lambda)$  一般由经验公式算出;  $\lambda_j$  可由光谱响应近似得到,但参量  $B, P, \beta$  却很难精确测出,同时表达式(1)、(2)的复杂程度也决定了不能将实验值代入表达式中用解方程的方法求出,这给模拟带来了困难. 为此可用变未知为已知的方法,即先设定  $B, P, \beta$  的变化范围和变化步长,对应每一组  $B, P, \beta$  可以求得一条理论光谱响应曲线,在这些理论曲线中找出一条和实际曲线最接近的,这样既实现了模拟,又获得了阴极的  $B, P, \beta$  值. 实际证明,只要  $B, P, \beta$  的变化范围设置得当,变化步长设置的足够小,模拟精度是很高的.

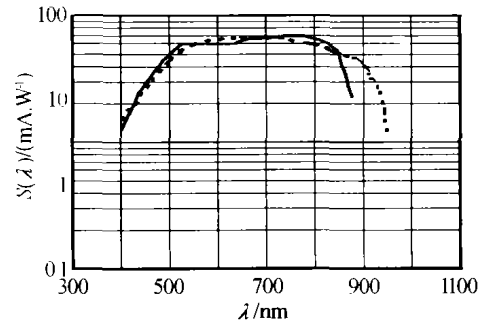
采用上述方法,对  $S_{25}$  系列阴极的光谱响应进行了模拟,模拟图见图 2、3、4,所得参量见表 2 (其中  $L$  是光电子的逸出深度,它是  $\beta$  的倒数).



SOLID-LINE: EXPERIMENT LINE  
DOTTED-LINE: THEORETICAL LINE

图 2 New  $S_{25}$  光电阴极的模拟图

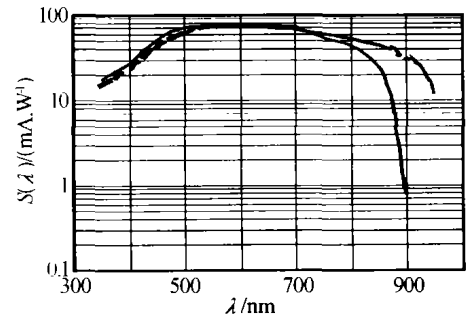
Fig. 2 The simulation figure of New  $S_{25}$



SOLID-LINE: EXPERIMENT LINE  
DOTTED-LINE: THEORETICAL LINE

图 3 Super  $S_{251}$  光电阴极的模拟图

Fig. 3 The simulation figure of Super  $S_{251}$



SOLID-LINE: EXPERIMENT LINE  
DOTTED-LINE: THEORETICAL LINE

图 4 Super  $S_{252}$  光电阴极的模拟图

Fig. 4 The simulation figure of Super  $S_{252}$

表 2 三种光电阴极的特性参量

| 阴极名             | $D/\text{nm}$ | $\lambda_j/\text{nm}$ | $B (\times 10^8)$ | $P$  | $\beta (\text{cm}^{-1} \times 10^5)$ | $L/\text{nm}$ |
|-----------------|---------------|-----------------------|-------------------|------|--------------------------------------|---------------|
| New $S_{25}$    | 125           | 1010                  | 7.28              | 1.21 | 1.71                                 | 58            |
| Super $S_{251}$ | 120           | 950                   | 9.17              | 1.04 | 1.20                                 | 83            |
| Super $S_{252}$ | 90            | 950                   | 7.28              | 1.37 | 1.99                                 | 50            |

## 3 对模拟结果的分析

从模拟结果看,第二类光电阴极光谱响应理论曲线与实验曲线能够较好吻合,尤其是厚度较厚的 New  $S_{25}$  和 Super  $S_{251}$ , 这说明  $S(\lambda)$  是较为理想的光谱响应表达式.

Super  $S_{252}$  的厚度最薄,为 90 nm,属于中等厚度的光电阴极. 而其他两类阴极较厚,约在 120 nm 左右. 这从一个侧面论证了 Sommer 曾经说过的,增加

阴极厚度,有利于提高长波响应,但是会消减短波响应.随着 $D$ 的增加,短波响应下降,光谱响应峰值向长波移动,但是 $D$ 超过100 nm时,长波响应也会下降.因为从图4可以看出,与Super S<sub>252</sub>相比,其他两类的长波响应较高,尤其是NewS<sub>25</sub>,在850 nm波长处灵敏度在20 mA/W以上,但是他们在600 nm以内的短波光响应都比Super S<sub>252</sub>低.这说明对于S<sub>25</sub>阴极,仅凭增加阴极厚度 $D$ 不能期待光谱响应有明显的改善.

Super S<sub>251</sub>和Super S<sub>252</sub>相比,前者在长波范围的响应明显提高很多,也不单纯是由厚度引起的.表2中的数据显示,Super S<sub>251</sub>的 $L$ 值比较大.这说明Super S<sub>251</sub>的阴极膜的有序度比较好,光电发射性能得到了提高,反映在光电子逸出深度上即 $L$ 值较大. Super S<sub>251</sub>的阴极在制备过程中可能采用了特殊的处理工艺,提高了阴极膜的有序度,例如对阴极基底进行处理,在文献[1]中作者曾经提到了对阴极基底进行处理,可以使阴极膜层和基底之间的接触均匀,紧密,有利于阴极膜朝着单晶有序的方向生长.另外Super S<sub>251</sub>可能采用了某种表面处理工艺,降低了阴极表面的有效电子亲和势,这也会使 $L$ 值增大,提高光谱响应.

NewS<sub>25</sub>和Super S<sub>252</sub>相比,前者有较好的长波响应,这一方面是由于它的厚度值较大,另一方面也可能是进行了阴极基底处理,增大了长波的光吸收系数造成的.

Super S<sub>252</sub>虽然长波响应不如其余两者,但是总体而言整个光谱响应显著增加,且短波处的增加幅度明显优于长波处,在630 nm处达到峰值响应值78 mA/W.从表2中可以看出,Super S<sub>252</sub>的结构参量 $P$ 值较大,意味着增大了晶粒的尺寸,就减少了电子在运输过程中由于晶格的不完整性而造成的散射损失.

## 4 结论

根据上述对三种光电阴极的光谱响应特性的研

究,得到了以下几点结论:

1)与Super S<sub>252</sub>相比,NewS<sub>25</sub>和Super S<sub>251</sub>均有较好的长波光响应,这主要是由于后两类的阴极的厚度较大,从而说明较大的阴极厚度有利于提高长波光响应.另外也是由于具有较大的 $L$ 值,所以在光电阴极的制备过程中,合理控制制备工艺,提高阴极膜的有序度,并采用表面处理工艺,降低阴极表面的有效电子亲和势,增大 $L$ 值,可有效地提高光谱响应.在光电阴极制备过程中,进行阴极基底的处理,增大长波光的光吸收系数,也有利于长波光响应的提高.

2)Super S<sub>252</sub>是日本公司最新开发出来主要用于光电倍增管上的多碱光电阴极,探测距离较短,长波响应较差,但是整个光谱响应范围的响应有所提高,兼顾了长波和短波,峰值响应达到了78 mA/W.在沙漠地区军事用途上有很大优点,与粗糙混凝土这样的景物光谱匹配程度较高.而荷兰的SuperS<sub>251</sub>光电阴极长波响应较好,在微光夜视仪上使用较好.

3)SuperS<sub>252</sub>光电阴极从严格意义上讲是介于第一类和第二类之间的光电阴极,因此在使用光谱响应公式进行计算时,可以对有效吸收系数以及逸出概率进行修正,以建立更加适合于中等厚度的光电阴极的光谱响应理论表达式,同时还需修正长波的光吸收系数,使理论和试验曲线在整个波长范围都能吻合得很好,从而指导结构参量的选择以及性能影响因素的分析.

## 参考文献

- 1 Red Hot Sensitivity in NIR. *OE*, 2003, (1): 5
- 2 常本康. 多碱光电阴极机理、特性与应用. 北京:机械工业出版社, 1995  
Chang B K. Multialkali Photocathode Mechanism, Character and Application. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995
- 3 (美) A H 萨默著, 候洵译. 光电发射材料制备、特性与应用. 北京:科学出版社, 1979  
Sommer A H. Photoemissive Materials Preparation, Character and Application. Beijing: Science Press, 1979

## A Study on Spectral Response Characterization of Super S<sub>25</sub> photocathodes

Liu Lei, Chang Benkang

*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094*

Received date: 2003-06-11

**Abstract** According to the spectral response formula of multialkali photocathode, a simulation of the spectral response for Super S<sub>25</sub> and New S<sub>25</sub> photocathodes are carried out. Some characteristic parameters are obtained. The internal mechanism of good properties of Super S<sub>25</sub> and New S<sub>25</sub> photocathodes and some technical methods which could be probably used in three photocathodes production are discussed through analyzing the results of the simulation.

**Keywords** Super S<sub>25</sub>; Photocathode; Spectral response; Simulation



**Liu Lei** was born in March 1979, received the Bachelor degree in Measurement Technology in 2000 from Nanjing University of Science and Technology. She is currently a Ph. D. candidate at this university. Her research interests include physical electronic and photo electronics.