

# 用于高速摄影变象管的 软 X射线光电阴极

雷志远 常增虎 侯 洵 张小秋  
龚美霞 刘秀琴 宋克昌

(中国科学院西安光机所)

## 摘 要

光阴极由衬底(包括介质阴极的导电基底)和光电发射膜构成。采用了聚丙烯、Formvar 和 Parylene 三种有机薄膜作阴极衬底。建立了这些薄膜的制备技术。用一台自制的软 X射线单色仪在 277—7469 eV 光子能量范围内测量了这些薄膜的透过率。

研究了 CsI、CsBr、Au 和 MgF<sub>2</sub> 四种光电阴极的光电发射特性和光电发射与阴极厚度的关系, 找出了最佳阴极厚度。用软 X射线单色仪在 277—7469 eV 光子能量范围内测量了最佳厚度阴极的绝对量子效率, 四种阴极最大值分别为 4.50、2.90、0.25 和 0.12。我们还在同一阴极衬底上分区制备了四种阴极, 在变象管荧光屏上比较其亮度, 结果和测量的一致。

用 LAB5 型表面分析仪对 CsI 和 Au 阴极的光电子初能量分布作了测量, CsI 阴极光电子初能量分布半高宽远小于 Au。因此 CsI 是适用于高速摄影变象管比较理想的软 X射线光电阴极。

关键词: 软 X射线光电阴极, 软 X射线光阴极衬底, 软 X射线光阴极量子效率。

## 一、引 言

X射线条纹相机和分幅相机是激光等离子体诊断的有力工具。这种相机与可见光相机的最大不同之处即在于变象管的光阴极。激光等离子体辐射的 X射线光子能量范围一般主要是在 0.1—10 keV 之内<sup>[1]</sup>。因此, 在这个光子能量区域内研究 X射线光电阴极的特性是十分必要的。这一研究对于其他方面的软 X射线探测, 例如 X射线天文学等方面也有着重要意义。

对用于高速摄影变象管的软 X射线光电阴极来说, 人们感兴趣的有四项基本特性:

- ① 阴极衬底对软 X射线的透过率特性;
- ② 阴极对软 X射线光电发射的量子效率;
- ③ 阴极的导电性能;
- ④ 光电子的初能量分布。该分布对于变象管的时间分辨率具有特殊的重要意义。

此外, 对于开放式变象管来说, 阴极光电发射的稳定性对使用者也非常重要。

本文报告我们为满高速摄影要求进行软 X射线光电阴极研究所做的一些工作及所

本文 1989 年元月 27 日收到

取得的结果。

## 二、阴 极 衬 底

X射线皮秒变象管光电阴极的结构示意于图1。光电发射体是用真空蒸发沉积在衬底上的。对于介质型阴极,还必须在衬底上沉积一层导电基底。

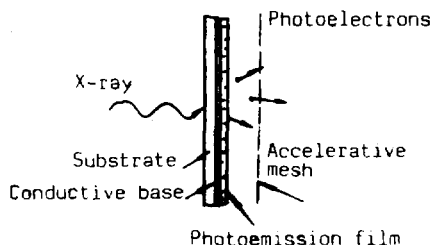


图1 阴极结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of photocathode.

衬底、导电基底的透过率和光电发射体的量子效率共同决定了整个变象管的光谱响应特性并直接影响相机的最小可探测能量。衬底的透过率愈高,光电发射体的量子效率愈高,则相机的最小可探测能量阈值愈低,变象管的光谱响应也愈宽。同时,对衬底透过率的标定及对阴极光谱响应的测量对于相机的某些应用(如瞬时光谱测量)有着极为重要的意义。

提高衬底透过率的途径有两条,一是选择轻元素材料,二是减小衬底的厚度。有机薄膜

兼有这两方面的优点,故有潜在的优势。

### 1. 衬底薄膜的制备:

我们主要使用了聚丙烯、Formvar和Parylene三种有机薄膜作衬底。

聚丙烯( $C_3H_6$ )薄膜是在一种专用拉膜机上将商品化的厚聚丙烯膜加热到 $110^\circ\text{C}$ 左右拉伸而成的。拉成的膜要慢慢冷却到室温,以达到退火消除应力的目的。用这种方法可以拉出0.8微米的薄膜。

Formvar(聚乙烯醇缩甲醛( $C_5H_8O_2$ ))薄膜是用溶液提取法制备的。将Formvar粉末溶解于有机溶剂之中,例如三氯甲烷。将干净的玻璃片浸入Formvar溶液,然后以恒定的速度提出液面,凉干后,玻璃表面则附有一层均匀的薄膜。薄膜的厚度由溶液的浓度和提玻璃片的速度决定。我们用大约2%左右的Formvar溶液,提片速度 $20\text{cm/分}$ ,制备出 $1000\sim 2000\text{\AA}$ 厚度的薄膜。用利刀将膜沿玻璃边缘划开,这种薄膜就可在水面上漂浮起来,并被捞在阴极基片上。

Parylene(聚对二甲苯, $C_8H_8$ )薄膜是用汽相沉积技术制备出来的。这种技术是在真空中将一种粉末环二体材料加热汽化。通过 $600^\circ\text{C}$ 高温区裂解为单体,然后进入成膜室,在室温下沉积于玻璃表面聚合而成薄膜。成膜后,用利刀沿玻璃边缘划开,Parylene膜便可漂浮在水面上,这样即获得自支撑的自由膜。我们设计了一台小型Parylene薄膜汽相沉积设备,已制备出小于 $1000\text{\AA}$ 的Parylene自支撑膜。

### 2. 透过率测量

我们用自己建立的软X射线单色仪对几种衬底的透过率作了测量。图2为测量设备示意图,它是为测量X射线光电阴极的光谱响应而建立的。由Henke型X射线管发出的原级X射线在荧光靶室激发靶材料的单色次级荧光X射线。荧光靶可以在真空室外转动切换,以改变荧光X射线的波长。荧光X射线进入样品室,透过测试样品后进入

流气式正比计数管, 用正比计数管测量 X 射线强度。可以在真空外操作将被测样品转入或转出 X 射线束, 或者更换几种不同的测试样品。

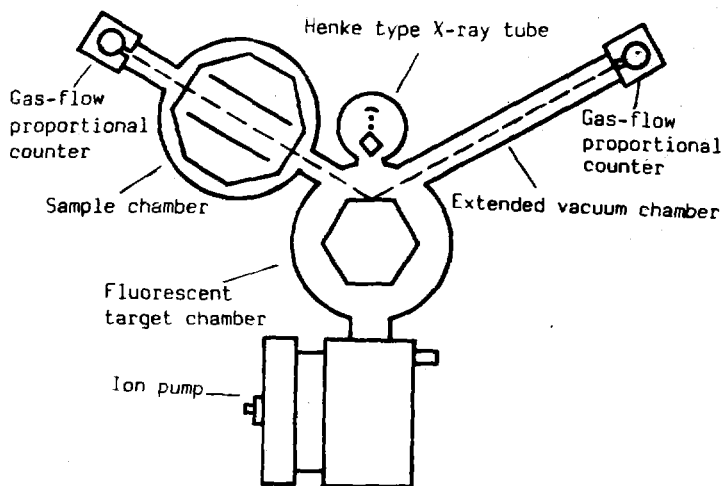


图 2 透过率测量装置示意图

Fig. 2 Configuration of transmission measurement device

对几种衬底薄膜透过率测量结果示于图 3。图中实线为根据 Henke 的质量吸收系数数据计算的曲线<sup>(2)</sup>, 点符号为实测数据, 可以看出, 二者是基本上符合的。

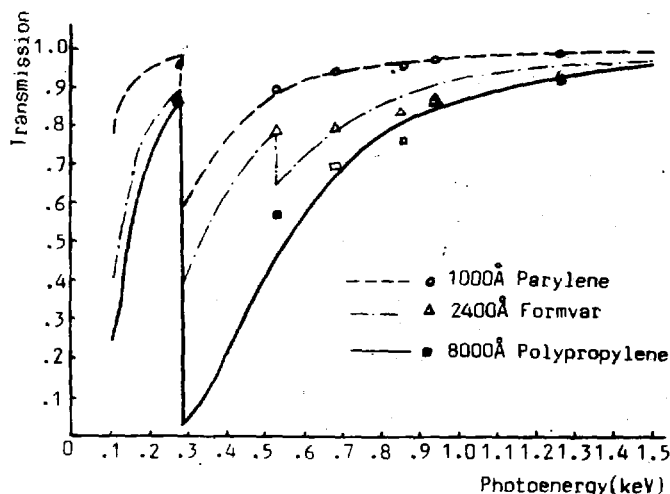


图 3 三种衬底薄膜的透过率

Fig. 3 Transmissions of three kinds of substrate.

### 3. 衬底薄膜的性质

从图 3 可以看出, Parylene 在三种衬底中透过率最高, 所以它是一种比较理想的衬底材料。它在 0.1—10 keV 光子能量范围内透过率大都在 80 % 以上。在美国劳伦茨·利佛莫尔实验室和日本的滨松公司新发展的 X 射线条纹相机<sup>(3,4)</sup>都采用了这种薄膜作阴极衬

底。Parylene实际上不与酸和碱起反应,在170°C以下不溶于大多数有机溶剂,熔点或热破坏点达280~400°C。

聚丙烯对软X射线虽然具有较低的质量吸收,但是由于拉膜厚度的限制,和Parylene比较透过率还是较低,而且存在残余应力,容易出现针孔。

Formvar膜对软X射线透过率也不如Parylene,而且它吸湿性很大,这对于制备易于潮解的CsI阴极是不利的。然而该膜失去水分之后表面会收缩拉平,这一特点表现在发纹的膜在真空中变得平如镜面,作为阴极衬底有利于电子光学成像。用这种材料易制成大面积平整膜,对分幅相机应用最为合适。

在条纹相机中主要使用Parylene膜。

### 三、导电基底

对于高速摄影变象管相机来说,阴极横向电阻是摄影时间分辨率的重要因素。阴极衬底为有机膜,它是不导电的。有的光电发射体是良导体,如Au。但有些介质型光电阴极如CsI的面电阻很高,无法工作在瞬时大电流密度状态,这时就需要在衬底上镀导电基底。导电基底的电阻应小于 $50\Omega/\square$ ,同时对软X射线还应有足够的透过率。我们采用Al或Au膜作导电基底,并对Parylene衬底上不同厚度的Al膜电阻作了试验,结果列入下表。可以看出,100 Å厚度的Al膜作导电基底已经足够。50 Å以下的Al膜,由于薄膜微细结构以及衬底表面的微小伤痕,膜面会出现不连续的小岛、断裂等缺陷,这时膜电阻迅速增大且变化不规则。为了保险起见,我们采用200 Å的Al或Au膜作导电基底。Au膜会使Parylene衬底更加平展,对180 eV以下的超软X射线透过率比Al更高,有利于降低相机最小可探测能量阈值。

Parylene衬底上Al膜的电阻

| 膜厚 (Å) | 电阻 ( $\Omega/\square$ ) |
|--------|-------------------------|
| 210    | 5                       |
| 110    | 16                      |
| 100    | 21                      |
| 85     | 18                      |
| 55     | 26                      |
| 25     | 500                     |
| 30     | 2000                    |

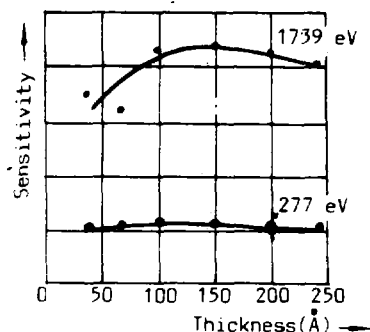


图4 Au的灵敏度与厚度关系  
Fig. 4 Sensitivity change with thickness for Au.

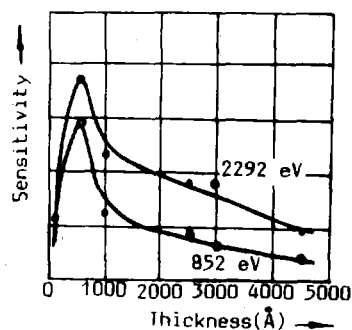


图5 CsI灵敏度与厚度关系  
Fig. 5 Sensitivity change with thickness for CsI.

## 四、量 子 效 率

对X射线光谱灵敏度的研究也是在图2所示的软X射线单色仪上进行的。在进行光阴极量子效率测量时,单色的荧光X射线穿过阴极样品室进入流气式正比计数管作X射线强度标定,在另一边对称方向有另一正比计数管,用来作测量过程中X射线强度的监测。阴极样品通过弹簧触头与静电计相接,光电子收集极为一金属圆筒,接+75V电压,用干电池供电。荧光X射线源的光子能量范围为277—7469eV,共有13条单色X射线。样品室内每次可放六个样品,并能从真空室外转换,这样可以保证测试条件的一致性。

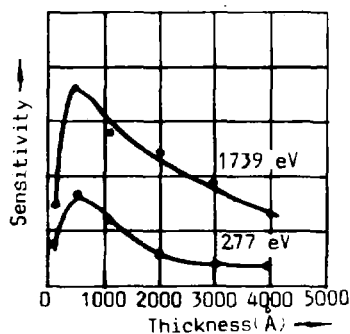


图6 CsBr灵敏度与厚度关系

Fig. 6 Sensitivity change with thickness for CsBr.

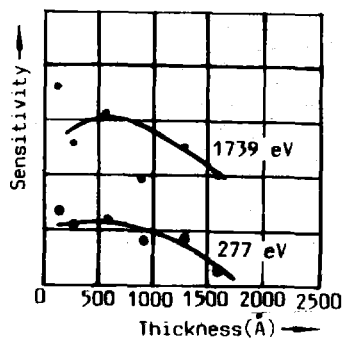


图7 MgF<sub>2</sub>灵敏度与厚度关系

Fig. 7 Sensitivity change with thickness for MgF<sub>2</sub>

光阴极的量子效率定义为每个入射光子所能产生的逸出阴极面的电子数。对于透射式阴极,量子效率与阴极对入射光的吸收率和二次电子的逸出深度有关,从而与阴极的

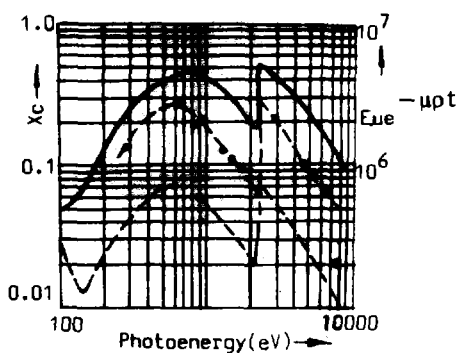


图8 2000 Å Au的量子产额

Fig. 8 Quantum efficiency change with photoenergy for 200 Å Au

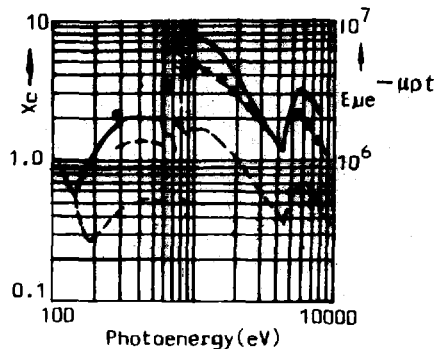


图9 500 Å CsI的量子产额

Fig. 9 Quantum efficiency change with photoenergy for 500 Å CsI.

厚度有关。我们研究了 Au、CsI、CsBr 和  $\text{MgF}_2$  四种阴极的厚度对灵敏度的影响。阴极厚度在镀膜时用石英晶体振荡器监测，膜厚用激光椭圆偏振仪测量。测试结果示于图 4 ~ 7。Au 阴极灵敏度在  $100 \sim 300 \text{ \AA}$  厚度范围内变化不大，三种介质型阴极在  $500 \text{ \AA}$  左右灵敏度最高。

最佳厚度阴极的绝对量子效率测量结果见图 8—11。图中实线为按照 Henke 透射式阴极模型给出的曲线，图 8，9 最下面的虚线为 Henke 的测量结果<sup>[5]</sup>。可以看出，测量结果是和 Henke 阴极模型的计算相当符合的。Au、CsI、CsBr 和  $\text{MgF}_2$  四种阴极的最高量子效率分别为 0.25、4.5、2.9 和 0.12，以 CsI 阴极量子效率为最高。

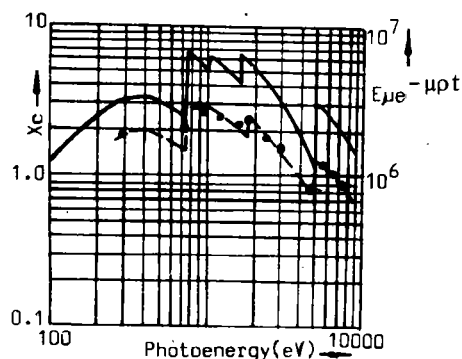


图 10  $500 \text{ \AA}$  CsBr 量子产额

Fig. 10 Quantum efficiency change with photoenergy for  $500 \text{ \AA}$  CsBr

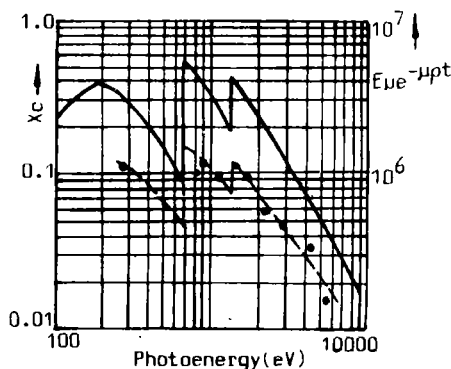


图 11  $500 \text{ \AA}$   $\text{MgF}_2$  量子产额

Fig. 11 Quantum efficiency change with photoenergy for  $500 \text{ \AA}$   $\text{MgF}_2$

为了直观比较几种阴极的效率，我们在同一衬底上分区制备了几种不同材料的阴极，用钨靶 X 射线管作光源，在变象管荧光屏上观察图象的亮度。图 12 为这种图象的照片，图 13 为图象的黑度扫描曲线，可以看出，CsI 区域的亮度最高。

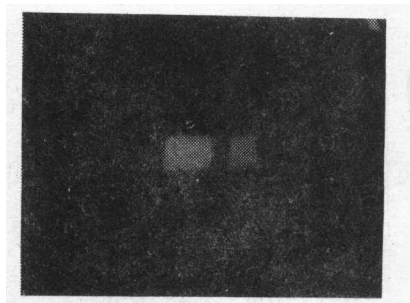


图 12 分区阴极亮度照片

自左至右  $200 \text{ \AA}$  Au,  $600 \text{ \AA}$  CsI,  $600 \text{ \AA}$  CsBr

Fig. 12 Brightness photograph took with separate photocathode.

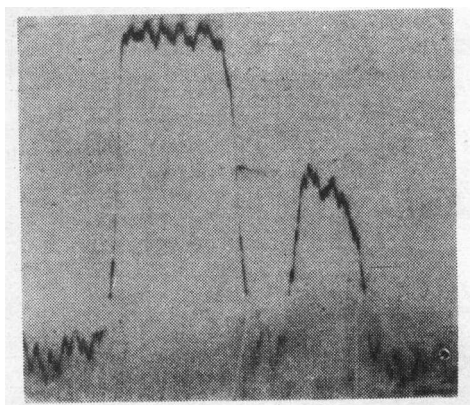


图 13 阴极底片黑度扫描结果

Fig. 13 Microdensitometer trace of image took with separate photocathode.

在条纹相机中实用的光电阴极为 Au 和 CsI 两种, Au 阴极的量子效率虽然较低, 但稳定性好。CsI 阴极的量子效率比 Au 高 20 倍, 对于研究弱光现象最为合适。

## 五、初 能 量 分 布

我们用英国 VG 公司 ESCA LAB5 型表面分析仪测量了 Au 和 CsI 的光电子初能量分布。该设备主要用于物体表面化学元素成份分析。用它测量阴极光电子初能量分布与进行常规的光电子能谱分析有所不同。

受到 X 射线照射的物体释放出的光电子可以分为三类, 特征光电子、非弹性散射电子和次级电子。特征光电子的动能由入射光子的能量和材料壳层电子的结合能所决定,

据此原理可进行表面成份分析。特征光电子和非弹性散射电子的动能较大, 在变象管中大部分被孔阑所截获而不参与成像。次级电子在从固体表面射出的电子总数中所占比例很大, 其动能很小, 变象管利用的主要是次级电子。在进行表面成分分析时, 次级电子是作为背景而应当扣除的, 但对于光阴极研究, 所要知道的正是次级电子的初能量分布。

对用于测量阴极光电子初能量分布的设备主要有三方面的要求。首先, 要有合适的 X 射线源, 即其光子能量应合适, 且单色性应较好。其次, 仪器的能量分辨率应足够高。另外还应知道能量分析器的传输率与光电子动能的关系。所谓传输率即从阴极样品出射的光子到达探测器的比例。

ESCA LAB5 表面分析仪上的 X 射线管有 Al 和 Mg 两种靶材可供选择, 我们使用的是 Mg- $k\alpha$  线(1254 eV)。在测量阴极光电子初能量分布时, 总能量分辨率主要由能量分析器所限定, 可达 1%。能量分析器如图 14 所示。

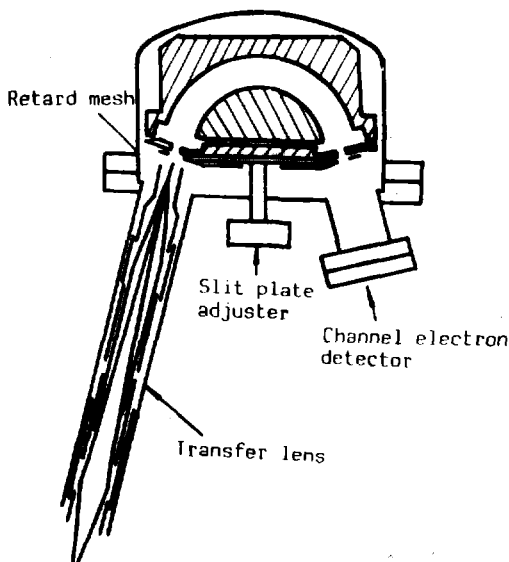


图 14 能量分析器示意图

Fig. 14 Schematic diagram  
of energy analyser

分析器的传输率与能量扫描方式有关, 当采用 CRR(固定减速比) 方式进行能量扫描时, 传输率与光电子动能无关, 对于初能量分布的测量来说, 这是较理想的扫描方式。遗憾的是本设备不能用此方式进行 XPS 分析。我们使用的是 CAE(固定分析器能量) 扫描方式。这时, 传输率随光电子能量减小而增加, 故对测量值应进行校正。

待测的阴极制备在光洁度很高的玻璃片上。对于 CsI 阴极, 为了防止电荷积累效应, 预先蒸镀了 Al 导电层。

测量结果如图 15~16 所示。Au 和 CsI 的光电子初能量分布半高宽分别为 13.4 eV 和 5.6 eV。即 CsI 的初能分布远小于 Au 的值。与 Henke 等人<sup>(5)</sup>的结果相比, 这一定性的

对比结论是相同的,但具体的数值相差较大。

图中,光电子信号不是在  $KE = 0$  而是在  $KE = 5$  eV 时为零。这主要是由于该仪器关于光电子动能的定义中计入了谱仪的功函数而造成的。

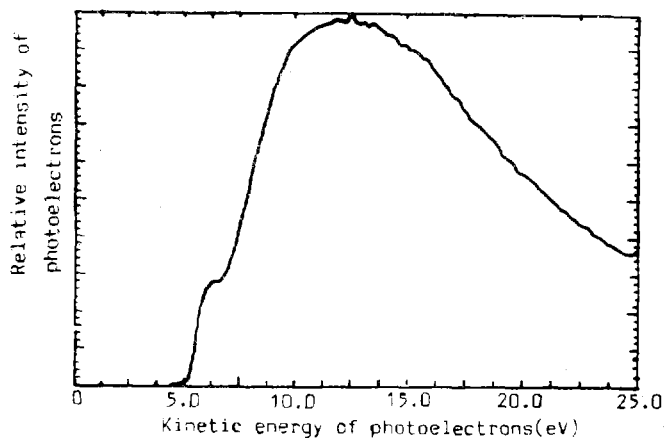


图15 Au阴极光电子初能量分布

Fig. 15 Primary energy distribution of photoelectrons emitted from Au.

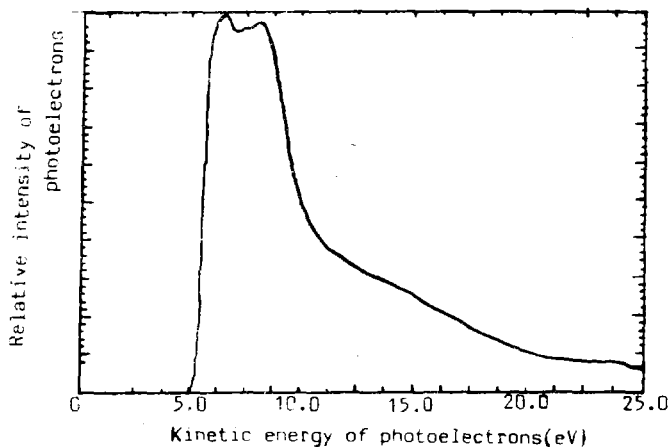


图16 CsI阴极光电子初能量分布

Fig. 16 Primary energy distribution of photoelectrons emitted from CsI.

## 六、结 论

对用于高速摄影变象管的软 X 射线光电阴极, Formvar 和 Parylene 都是比较合适的阴极衬底, 其中 Parylene 的透过率最高。100 Å 的 Al 或 Au 膜作导电基底已经足够。据我们对几种阴极的测量结果, CsI 阴极量子效率为最高, 比 Au 高出一个数量级, 最佳

阴极厚度为500 Å左右,它的光电子初能量分布远小于Au。因此,CsI是适用于高速摄影变象管比较理想的软X射线光电阴极。我们找出的阴极最佳厚度为阴极制备工艺规范的建立提供了依据。我们所测出的阴极衬底的透过率和阴极的光谱量子效率对相机作为时间分解光谱测量时的数据处理非常重要。另外,我们为阴极研究建立起来的超薄膜技术和软X射线单色仪还可用于很多其他研究。

### 参 考 文 献

- [1] J. C. Cheng, R. A. Lerche, K. G. Tirsell, and G. R. Tripp: Response of Ultrafast Scintillators, *SPIE*, 1976, **97**, 211-217.
- [2] B.L.Henke, and E. S. Ebisu: Mass Absorption Coefficients, *Adv. X-Ray Anal.*, 1973, **17**, 187-213.
- [3] G. L. Stradling, D. T. Attwood, and R.L.Kauffman,: A Soft X-Ray Streak Camera, *IEEE J. of Quantum Electronics*, 1983, **V. QE-19** (4), 604-615.
- [4] Katsuyuki Kinoshita, Eiji Inuzuka, et al: Demountable photo-cathode Streak Camera, *SPIE*, 1983, **427**, 36-44.
- [5] B.L.Henke, J. P. Knauer, and K. Premaratne, The Characterization of X-Ray Photocathodes in the 0.1-10keV Photon Energy region, *J. Appl. Phys.*, 1981, **52** (3), 1509-1520.

## SOFT X-RAY PHOTOCATHODE OF IMAGE TUBE FOR HIGH SPEED PHOTOGRAPHY

Lei Zhiyuan, Chang Zenghu, Hou Xun,  
Zhang Xiaoqiou, Goug Meixian, Liu Xiouqin, Song Kechang

*Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica*

### Abstract

The photocathode consists of a substrate (involving a conductive base film for dielectric cathode) and a photoemission film. Polypropylene, Formvar and Parylene thin films were used for the photocathode substrates. We have established the preparation technique of these substrates. The transmissions of these substrates in the photoenergy range from 277 to 7469 eV had been measured with a soft X-ray monochromatic source that we have established in our laboratory.

The photoemission characteristics of CsI, CsBr, Au and  $\text{MgF}_2$  photocathodes and the relationship between photoemission and cathode thickness were investigated. The optimum thickness of these photocathodes had been found and the quantum efficiency of the optimum thickness photocathodes in the photoenergy range from 227 to 7469 eV had been measured with above soft X-ray monochromatic source. The maximum values of CsI, CsBr, Au and  $\text{MgF}_2$  photocathodes are 4.50, 2.90, 0.25 and 0.12 respectively. We also prepared these photocathodes on a same substrate and observed the brightness on the screen of image tube. The result obtained is coincided with that of measured.

The photoelectron energy distributions of CsI, and Au photocathodes had been measured with MICROLAB 5 surface analyser. The results show that the half width of photoelectron energy distribution of CsI photocathode is much smaller than that of Au so that the CsI photocathode is more suitable for the high speed photography.

**Keywords:** Soft X-ray photocathodes; Soft X-ray photocathode substrates; Quantum efficiency of soft X-ray photocathode.