

# 软X射线光导摄像管

余永正 杨晓文 丁义山

**摘要:** 在研究软X射线光电发射的基础上提出了用疏松的溴化铯靶对软X射线直接摄像的方法。描述了用非同步辐射软X射线光源实现软X射线准实时摄像的实验系统, 给出了软X射线光导摄像管的性能及一些初步应用例子

## 一、前 言

软X射线波段的成像探测器有多丝正比室、气体闪烁正比室、微通道板、负电子亲和势光阴极的光电成像器件及固体成像器件等<sup>[1]</sup>。对这些器件的要求是高灵敏度、高空间分辨率、高能量分辨率以及在某些应用上要求有高时间分辨率。多丝正比室有中等的能量分辨率和空间分辨率, 灵敏度较高(除窗透过率损耗外, 量子效率约1)。气体闪烁正比室有较高的能量分辨率和中等的空间分辨率, 灵敏度较高。微通道板在软X射线波段的量子效率较低, (约0.1), 无能量分辨率, 但可达到极高的空间分辨率, 原则上可以达到通道节距(10~20 $\mu\text{m}$ )。以III—V族化合物负电子亲和势光阴极为光电探测器的光电成像器件有高分辨率和高灵敏度, 并具有一定的能量分辨率<sup>[2]</sup>。固体成像器件有高分辨率和高灵敏度, 但对能量小于1keV的光子无响应。显然, 基于软X射线光电发射的探测方法在性能上是有吸引力的。但III—V族化合物负电子亲和势光阴极要求有极苛刻的环境条件, 难以在器件中实现。而正电子亲和势的常规光阴极在软X射线波段也有较高的量子效率, 对4.47nm辐射, 量子效率约0.5。利用这种软X射线光电发射可制备高性能的软X射线光电成像器件。

软X射线光电发射可用两种方式使其成像。一种是“光导”式, 一种是利用发射的自由光电子。本文叙述第一种运用方式。

## 二、碘化铯和溴化铯在软X射线波段的光电发射

B. L. Henke等<sup>[3]</sup>提出了软X射线波段绝缘体光电发射的简化理论。入射的高能软X射线光子在绝缘体内产生高能光电子和Auger电子并发射相应的荧光光子。高能初电子和Auger电子直接逸出几率极低<sup>[4]</sup>。大部分高能初电子在逸出过程中产生若干低能次级电子。对绝缘体, 产生的低能次级电子在体内输运时能量损耗的主要机制是多重声子散射, 与绝缘体中次级电子发射过程类似。因此可以定性判断, 次级电子发射性能良好的材料在软X射线波段将有良好的光电发射性能。

B. L. Henke等<sup>[5]</sup>测量了碘化铯在软X射线波段的光电响应。对不透明碘化铯层在6.44~0.834nm区域, 量子产额从0.30~2.50, 显著大于微通道板。作者指出, 从次级电子发射

性能看,溴化铯的次级电子发射系数峰值和在表面的逸出几率均优于碘化铯<sup>[6]</sup>,因此有可能是比碘化铯更灵敏的软X射线光阴极材料。作者测定在软X射线光电发射过程中溴化铯的次级电子平均逸出深度(对4.47nm辐射,为25.0nm)明显地高于碘化铯(17.0nm)<sup>[7]</sup>。作者研究了两种材料的软X射线透射式光电发射,这种方式更适用于光电成像器件。

在高真空中蒸发正常密度的碘化铯和溴化铯层。衬底是1μm的聚丙烯层和10nm的铝层作为导电极。对4.47nm的碳K<sub>α</sub>线辐射,衬底的透过率为42%。碘化铯和溴化铯层厚度为100nm。测试装置如图1所示。用Henke型软X射线光源。采用三种靶材料:碳、铜和铝,分别获得CK<sub>α</sub>, CuL<sub>α</sub>及AlK<sub>α</sub>特征辐射线,波长依次为4.47, 1.33及0.834nm。软X射线光源辐射的软X射线通过衬底入射于碘化铯及溴化铯层,发射的光电流用金属电极接收。

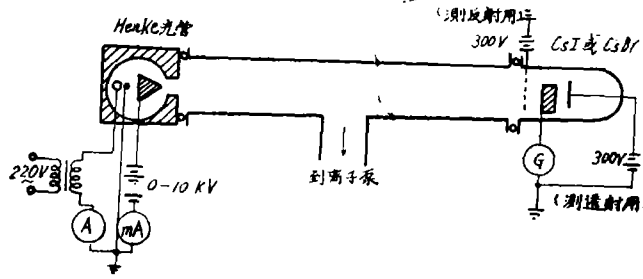


图1 软X射线光电发射实验测试装置

两种光阴极在三个波长下的相对透射光电发射如表1所示。各波长下的软X射线光子数用Henke等<sup>[8]</sup>的曲线归一化为4.47nm处的光子数。表1的结果证实了作者提出的推论。

表1 两种软X射线光阴极在三个波长下的相对透射光电发射

材料	相对光电发射	波 长(nm)		
碘 化 铯		4.47	1.33	0.834
溴 化 铯	0.5		1.4	2.2
	1.0		2.1	2.3

### 三、低密度溴化铯靶性能

溴化铯层在软X射线波段的光电发射提供了电视摄像靶所需的光电灵敏度。但密实层不能满足摄像靶电阻率 $\geq 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 的要求。作者制备了疏松的溴化铯层,使电阻率明显提高,不仅可以满足摄像靶电阻率应 $\geq 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 的要求,而且在室温下可积累图像信息达10分钟以上,由此推算电阻率 $\geq 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

在低气压惰性气体气氛中蒸发溴化铯于聚丙烯和铝导电极衬底上形成疏松层。疏松层厚度用显微镜测量,重量用感量为10μg的微量天平称量。溴化铯层厚度为2~10μm,密度为密实CsBr层的3~7%。在干燥气体保护下将疏松CsBr层放入真空测试系统。测试系统与图1相同,只是疏松溴化铯靶上的光电信号用标准的1in视像管电子枪拾取。测试系统如图2所示。

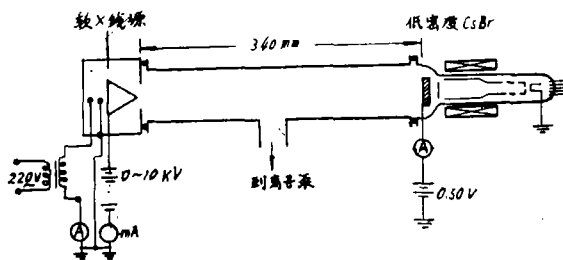


图2 测量疏松CsBr靶光导信号的实验装置

疏松溴化铯靶的光电灵敏度应远高于密实层。软X射线光电发射中绝大部分是低能次级电子。次级电子发射过程可近似地归结为三阶过程：材料吸收初级电子能量激发产生次级电子；产生的次级电子从体内输运渡越至表面；次级电子在表面渡越势垒逸出。疏松层与密实层只要面密度相同，吸收初电子能量产生次级电子的效率就相同。疏松层虽然密度较小但厚度大（ $\mu\text{m}$ 量级，而密实层厚度仅为 $0.05\mu\text{m}$ 左右），二者面密度相近。在疏松层中，材料形成纤维结构，对疏松KCl层，纤维的平均线度估计为 $10\text{nm}^{[9]}$ ，小于次级电子平均逸出深度，因此在疏松层中次级电子从纤维内至真空的输运效率极高。运用时，疏松层内有很高的场强，一般高达 $10^3\text{V/mm}$ ，从任何方向上逸出至层内真空区的次级电子都能高效地输运至导电电极。所以，从次级电子发射过程分析，疏松层效率远高于密实层。测量结果证实了上述推论。图3是在 $4.47\text{nm}$ 时密实与疏松CsBr层的光电响应随软X射线相对强度的变化。制备了两种密度和厚度的疏松CsBr靶。由图可见，疏松层的光电响应比密实层高5~14倍。在小信号情况下，无论密实或疏松CsBr层，光电流均与软X射线强度呈线性关系。

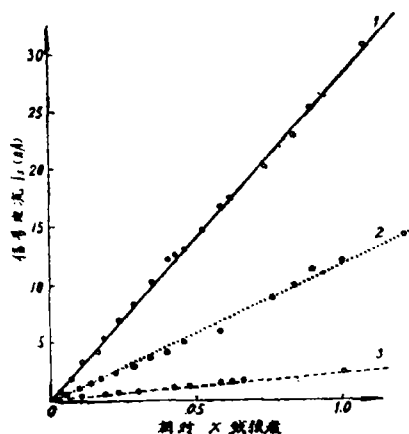


图3 4.47nm辐射下低密度和密实CsBr层光电流随软X射线相对强度的变化

- 1——密度为密实层6%的CsBr厚 $2\mu\text{m}$ 靶压 $10\text{V}$
- 2——密度为密实层3.2%的CsBr厚 $9\mu\text{m}$ 靶压 $12.5\text{V}$
- 3——密度CsBr厚 $100\text{nm}$

对两个疏松CsBr靶，信号电流与暗电流随靶压的变化如图4所示。较薄的靶电容较大，灵敏度较高，但暗电流也稍大。在实际使用的靶压 $15\sim 20\text{V}$ 下，暗电流仍小于 $1\text{nA}$ ，仍然可以在室温下长时间积累图像信息。

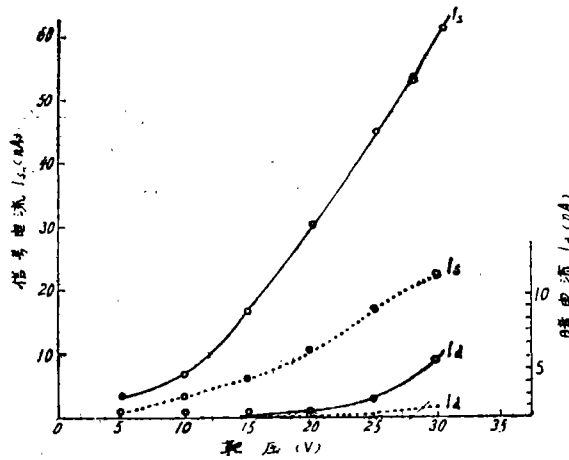


图4 两个疏松CsBr靶的信号电流和暗电流随靶压的变化  
实线—低密度CsBr, 正常密度的6%2 $\mu$ m厚  
虚线—正常密度的3.3%, 9 $\mu$ m厚

#### 四、软X射线光导摄像管性能及初步应用

作者研制的软X射线光导摄像管系标准的1 in电视摄像管, 疏松CsBr靶作为光导摄像靶。入射的软X射线在疏松CsBr层中产生的自由次级电子在层内高场强作用下高效地输运至导电极, 或发射至真空由场网电极接收, 在相应位置上产生正电荷图像, 电子束扫描产生相应的视频信号经放大后在监视器上显示。

测试摄像管成像分辨率时, 自制的镂空硅测试卡紧贴放置于靶的软X射线输入端。镂空测试卡上分别用光刻和腐蚀的方法在硅片上产生五组分辨率测试卡, 分别为5、10、15、20、25线对/mm, 每组分辨率卡上有四个不同方向的分辨率图像。镂空测试卡的软X射线图像投射于疏松溴化铯靶, 产生的视频图像在监视器上直接观测。观测到20线对/mm这组测试卡图像, 对1 in摄像管, 相当于可分辨400电视行。由于靶环结构使硅镂空测试卡与CsBr靶实际上有一定间距(约3mm), 同时光源与CsBr靶相距仅为340mm, 使投射的软X射线图像有一定的模糊, 影响观测到的极限分辨率。原则上, 这一摄像管的极限分辨率应取决于电子枪。对1 in电子枪, 极限分辨率可能达到35线对/mm。电视摄像靶上的图像在监视器上显示时约放大20倍, 从而可观测到样品的放大为20倍的软X射线图像。

对4.47nm辐射, 管子灵敏度约为10电子/光子, 远远高于软X射线抗蚀剂。入射的软X射线光子数系采用文献<sup>[3]</sup>的数据估算。在运用靶压下暗电流 $<1$ nA, 室温下积累图像信息的时间 $\geq 10$ min。积累特性良好对观测极微弱的软X射线图像有重要意义。在软X射线显微术中, 由于放大率大及采用非同步辐射光源, 光子通量甚低, 软X射线图像十分微弱是一个突出问题。而这种摄像管具有在室温下长时间积累图像信息的能力, 将可大大提高观测灵敏度, 对发展光电接触式软X射线显微术将有重要应用价值。

弱信号下(输出信号电流 $<100$ nA)管子 $\gamma$ 值为1。响应的波段范围实际取决于衬底。CsBr靶的响应波段较宽。

应用作者发展的软X射线光导摄像管进行了接触式光电成像实验。实验装置方框图如图

5 所示。生物试样近贴放置于光导靶一侧。用普通的Henke光源。光导靶输出的视频信号既可实时在监视器上观测,也可停止电子束扫描在靶上积累图像信息后输入存贮机,将存贮信号在监视器上长时间显示,这样可以大大提高系统的探测灵敏度。靶为1in标准摄像靶(扫描面积 $9.6 \times 12.8\text{mm}$ ),监视器上显示的图像放大20倍。

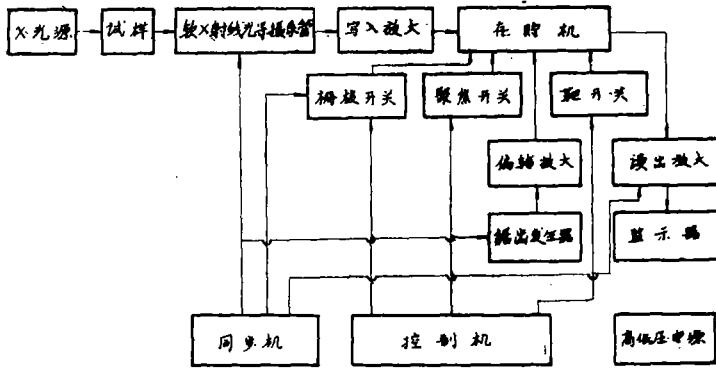


图5 软X射线光导摄像管进行接触式光电成像实验方框图

图6和图7是从监视器上拍摄的蜜蜂翅膀和人胚胎组织的软X射线放大图像。辐射波长为 $4.47\text{nm}$ ,积累时间约 $5\text{s}$ 。胚胎组织片厚约 $15\mu\text{m}$ ,未曾染色处理,在光学显微镜下无衬度,观察不到图像。这是第一次用软X射线光导摄像管用常规软X射线光源准实时地拍摄到软X射线辐射下的生物样品图像。这些图像显示出软X射线图像的一些固有特色。

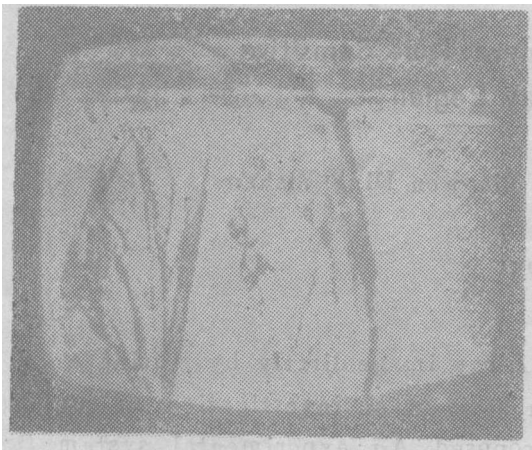


图6 用软X射线光导摄像管拍摄的蜜蜂翅膀的软X射线图像

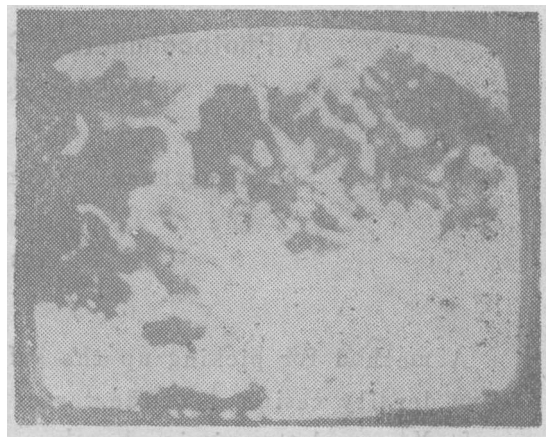


图7 人体胚胎的软X射线图像

用软X射线光导摄像管及针孔成像装置,拍摄了托卡马克装置放电产生的高温等离子体的软X射线辐射图像,可用于高温等离子体的诊断工作。

## 五、结 语

在研究软X射线光电发射的基础上,提出了用疏松溴化铯靶实现对软X射线直接摄像的方法。这种软X射线摄像管具有较高的空间分辨率和灵敏度,低暗电流,良好的信号积累和贮存能力,图像均匀性良好,在软X射线成像探测中有一定应用价值。但对显微观测,目前已达到的20线对/mm而嫌不够,进一步提高分辨率的限制主要来自电子枪,如利用软X射线光电发射,在电子束扫描前将图像放大15~20倍,则可能使分辨率达1~2 $\mu$ m,这样在生物、医学研究及应用中将会有较大的实用意义。

实验中应用的Henke光源由杨名格、崔松鹤同志提供,积累电视系统由贾欣志、刘绍武同志提供致此以示谢忱。

### 参 考 文 献

- [1] 余永正、杨晓文,物理,1984.13.230,
- [2] D. Bardes, Rev. Sci. Instr., 1978. 49, 1273,
- [3] B. L. Henke et al., Phys. Rev., 1979. B, 19, 3004,
- [4] R. E. Tyesaar et al., Sov Phys—Solid State(Engl. Transl), 1978. 20, 454
- [5] B. L. Henke et al., J. Appl. Phys., 1981. 52, 1509,
- [6] K. I. Grais et al., J. Appl. Phys., 1982. 53, 5239,
- [7] She Yongzheng, Yang Xiaowen, Ding. Yishan; Adv. E. E. P., 1985, 64, B 541,
- [8] B. L. Henke, M. A. Tester, Adv. X-ray Analysis, 1974. 18, 76,
- [9] G. W. Goetze, Adv. E. E. P., 1966. 22, 219,

## A Photoconductive Camera Tube Sensitive to Soft X-ray Region

She Yongzheng      Yang Xiaowen Ding Yishan

### Abstract

A method for picking up the soft X-ray image directly by using a low density cesium bromide target in basis on an investigation of the soft X-ray photoemission has been proposed. An experimental system for quasi-real time picking up of the soft X-ray image which uses a non-synchrotron radiation soft X-ray source has been described. The performances of this soft X-ray camera tube and some primary applications have been given.