

# 低强度中子流电视摄像系统

李平辉 马维超\* 班显辅 李忠民\* 刘绍武

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

(\* 东北师范大学物理系, 长春 130022)

**摘要** 本文介绍了低强度( $3\sim 4\times 10^3\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$ )中子流电视摄像系统。它利用 SEC 摄像机独特的积累性能, 将一个用人眼直接观察什么也看不见的、不连续光点的低照度( $1\times 10^{-4}\text{Lx}$ ) 中子流像转换成一个能在监视器上观察的可视图像。

**关键词:** 中子照相; 电视系统; 低照度

## 1 引言

中子照相是利用中子束通过物体时, 不同物质对它的吸收能力不同来实现对物体内部结构的探测。由于氢等特殊材料与中子反应截面大, 而铁等重金属反应截面很小, 这就提供了用 X 射线探测难以完成的含氢物质内部结构, 尤其是重金属包壳内含氢物质的检测手段。如技术先进的国家已将它用于航空、航天、核工业、军火工业等领域的无损检测。

目前中子照相采用两种方式, 第一种方式是采用胶片感光。其结构示意图如图 1 所示。这种方式的特点是分辨率高, 但灵敏度低、速度慢, 一幅图像需曝光几十分钟, 曝光后还需进行显影、定影、冲洗、烘干等工序, 在实际中应用很不方便。第二种方式是用光电子学方法记录、显示, 即用电视摄像的方式, 其结构如图 2 所示。这种方式的特点是分辨率低于胶片, 但灵敏度高、时间快, 一幅图像只需一至二分钟, 甚至更短, 还能将图像数字化, 用计算机进行图像处理, 以提高像质。这种方式是中子照相中多被采用的方式。

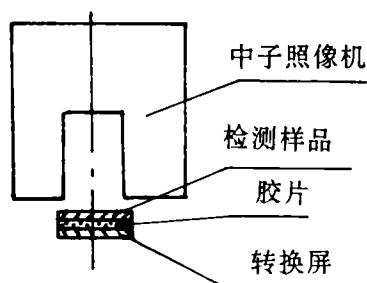


图 1 中子照相胶片感光系统结构示意图

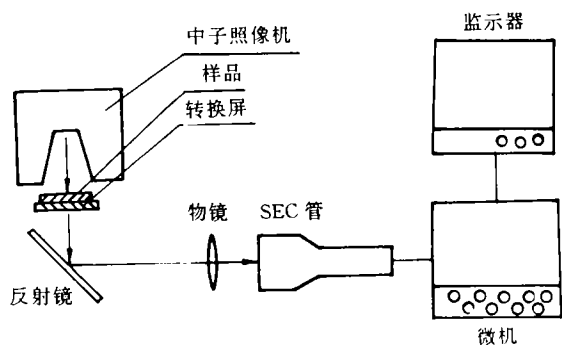


图 2 中子照相电视摄像系统结构示意图

我国中子照相技术开发较晚，八十年代初只有中国原子能科学院，清华大学等少数几个单位开展了反应堆中子照相技术的研究，其密度约  $1 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，1985 年东北师范大学开始了用密封中子发生器进行中子照相技术的研究。这些照相技术多采用胶片感光方式。由于我们的密封中子发生器中子流强度低，大约  $3 \sim 4 \times 10^3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，因而在荧光屏上产生的图像具有如下几个特点和问题：

(1) 中子与靶反应是以单个粒子形式出现的，每个粒子都能不丢失地被记录吗？

(2) 由于中子流强度低，因而图像光点不连续。

(3) 由于中子流强度低，因而图像平均照度低，约  $1 \times 10^{-4} \text{ lx}$ 。

(4) 摄像环境中，除光学图像外，还具有各种射线，如快中子、热中子、 $\gamma$  射线、X 射线等。

那么在上述条件下，怎样才能能在监视器上看到中子图像，是我们研究的中心问题。要解决这一问题，首先必需有一个发光效率高的中子转换屏，将中子像转换为光学像，然后要有一个与转换屏光谱匹配好的，灵敏度、分辨率高的微光摄像机，将人眼直接观察不到的中子转换屏上的中子像转换到监视器上，成为可视图像，详述如下。

## 2 中子转换屏

在小型中子照相装置的低强度中子流条件下提高中子—光信号—电信号的转输、转换效率，转换屏的选取是首当其冲的关键一环。标志转换屏性能的主要指标有两个，一个是分辨率，另一个是中子—光信号的转换效率。这两者是相互矛盾的，在低强度中子流下进行中子照相，转换效率是主要矛盾，为此我们选用速度最快的  ${}^6\text{LiF} \cdot \text{ZnS}(\text{Ag})$  屏为中子转换屏。

根据 S. J. Cocking<sup>[1]</sup> 等人的计算，每一个入射热中子在  ${}^6\text{LiF} \cdot \text{ZnS}(\text{Ag})$  屏上平均可产生  $2.1 \times 10^5$  个光子，这些光子被摄像机收集后能转换为 47 个光电子。由此，可以肯定每一个与屏反应的热中子都能可靠的被记录。

## 3 微光电视摄像系统

### 3.1 微光摄像器件的工作原理

#### 3.1.1 SEC—二次电子电导摄像管

SEC 微光摄像管的结构示意图如图 3 所示，目标通过物镜成像在光电阴极上，光电阴极各点发射与目标亮度成比例的光电子，这些光电子被锥阳极加速和聚焦，打到 SEC 靶上。SEC 靶由三层材料构成， $\text{Al}_2\text{O}_3$  支持膜，Al 导信号板和低密度 KCl 二次电子电导层。KCl 层是

SEC 靶的有效层, 它将来自光电阴极的电子像进行增强和积累, 当电子束扫描靶时, 形成增强了的视频信号输出给微机或监视器。SEC 靶的增益系数大约 100 倍。积累时间可达 1 小时以上。

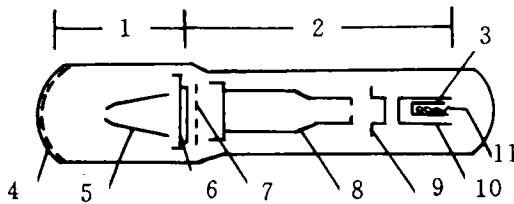


图 3 SEC 摄像管结构示意图

1—移像段；2—电子枪；3—阴极；4—光电阴极；5—锥阳极；6—SEC 靶；7—分离网；8—聚焦极；9—阳极；10—调制极；11—热子。

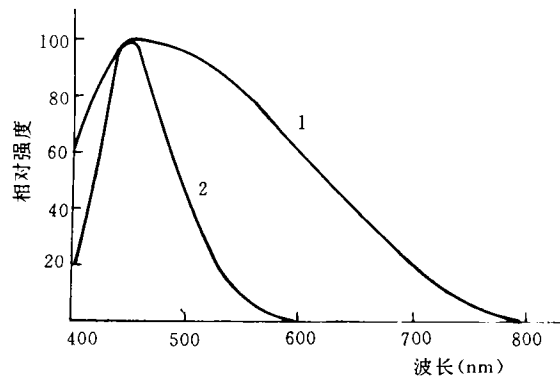


图 4 转换屏和光电阴极光谱特性

1—光电阴极；2—转换屏

### 3.1.2 SIT—硅靶增强摄像管

SIT 摄像管的结构与 SEC 完全相同。所不同的是用硅增强靶代替 SEC 靶。硅增强靶的增益系数约为 3000 倍, 但它积累性能差, 仅 1~2 秒。

### 3.2 荧光屏与光电阴极的光谱匹配问题

无论直接采用微光摄像机或是采用像增强器加微光摄像机, 都必须解决荧光屏的发光光谱与光电阴极的光谱特性相匹配的问题。如前所述, 我们的中子照相系统采用的是具有高发光效率的  $^6\text{LiF} \cdot \text{ZnS}(\text{Ag})$  屏, 其发射光谱峰值在 445nm 处, 为此我们研制的 SEC, SIT 摄像管以及选用的影像增强器均采用 S-20 光电阴极, 二者的光谱特性如图 4 所示, 互相匹配。

### 3.3 SEC, SIT 电视摄像机

为了能在监视器上看见中子像, 我们除用已研制成的高灵敏度的 SEC、SIT 微光摄像管外, 还研制了与它配套的低噪声电子学电路, 选用了 F/数为 0.95 的高质量电视物镜制成微光摄像机。我们研制的 SIT 微光摄像机<sup>[2]</sup>目标照度在  $1 \times 10^{-3}$  勒克斯下达 400 电视行/图像高的分辨率。SEC 摄像机在实时工作状态, 目标照度  $3 \times 10^{-2}$  勒克斯下达 400 电视行/图像高的分辨率, 若工作在积累状态, 则随着目标照度的降低积累时间增加, 积累像的分辨率为 300 电视行/图像高。

在实验中, 像增强器的增益系数, SIT、SEC 管移像段高压、靶电压、电子束强弱对摄像机信噪比都有影响, 工作中把它们调到了最佳值。对 SIT 我们用积累数帧的办法, 对 SEC 用积累数秒的办法来降低噪声, 提高灵敏度。为了实现 SIT 数帧积累和对 SEC 数秒积累时间的控制, 我们设计了有关硬件并编制了具有上述功能的计算机软件。

### 3.4 微光电视摄像方案的实验、分析、比较

低强度中子流像是一个低对比、低照度的不连续光点像, 即是使用高灵敏度的 SEC、SIT

摄像机，实时摄像显示时，灵敏度也不够，在监视器上仅呈现为暗背景，什么也看不见。为此，我们采用了以下几种提高灵敏度，累加不连续光点图像的方案，进行实验、分析、比较以选择最佳方案。

### 3.4.1 ISIT (像增强器+硅靶增强摄像机)

用 ISIT 摄像的结构示意图

如图 5 所示。将中子的荧光屏像通过物镜成像在像增强器的光电阴极上，再将增强后的像经耦和透镜耦和至 SIT 摄像管的光电阴极上。SIT 的视频输出接到装有图像卡的微型计算机上，通过微机处理后的视频数字信号接监视器。图像卡具有 8 个灰度等级为 256，容量为  $512 \times 512$  的存储器，并具有实时相加的功能。由于 ISIT 可摄低于  $10^{-4}$  勒克司的景物，所以对中子像来说灵敏度够用。由于 SIT 积累性能差，为使不连续的中子像变成连续像，我们采用了 SIT 若干帧积累，再由微机累加。

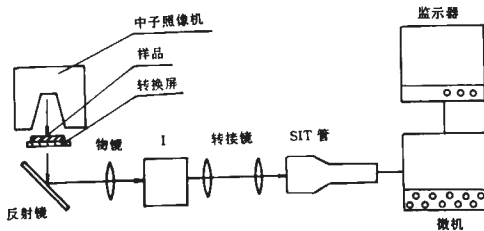


图 5 用 ISIT 摄像的结构示意图

实验条件：中子流强度为  $3 \sim 4 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，SIT 积累 40 帧，实时相加 75 次所得结果被具有同样实验条件，但不放样品的中子场本底相减，减后结果如图 6 所示，能看到一个粗糙的镅片十字叉像。

### 3.4.2 ICCD (像增强器+CCD 摄像机)

ICCD 摄像系统结构与 ISIT 相同，只不过用 CCD 摄像机代替 SIT 摄像机。ICCD 的灵敏度虽然低于 ISIT，但也能摄取低于  $10^{-4}$  勒克司的景物，所以对于摄取中子像来说灵敏度也够用了。我们仍然采用实时相加的办法来获得连续图像，累加 3000 帧，所得结果与 SIT 相近，但 CCD 摄像机经不起中子场中各种射线的损害，能看着监视器上白斑增多，像机受损伤，所以 CCD 摄像机不宜用于在这种照相装置上探测中子像。

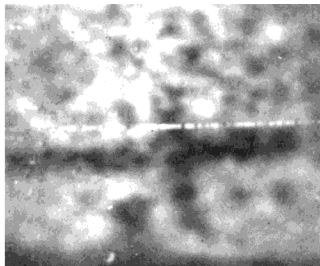


图 6 用 ISIT 系统拍摄的中子像照片

### 3.4.3 SEC (二次电子电导摄像机)

用 SEC 直接摄像的示意图如图 2 所示。SEC 摄像机实时摄像的灵敏度虽然仅有  $10^{-2}$  勒克司，看不见  $10^{-4}$  勒克司的中子像。但 SEC 具有独特的积累性能，它既可以提高灵敏度，又可以使不连续的中子像变得连续，因此只要积累时间适当，就能在监视器上看到中子像。

实时摄像时, SEC 靶的增益  $G_0$  等于 100, 若工作在积累方式, 由于我国电视扫描制式为 25 帧/秒, 所以 SEC 靶的增益

$$G = 25G_0t$$

式中  $t$  为积累时间(秒), 设  $t = 120$  秒, 则  $G$  等于  $3 \times 10^5$ , 比实时工作方式提高灵敏度 3000 倍。

实验条件: 中子流强度为  $3 \sim 4 \times 10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ , 积累时间为 90 秒。在监视上获得的镅片等图像的照片如图 7 所示, 图中最细的线条为 1mm 宽。

## 4 结 论

从几种方案的实验结果比较中, 我们不难作出结论, 用 SEC 的积累特性直接摄像所获得的图像效果最佳。我们终于在监视器上看到了  $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  的弱束中子流像, 系统在视场为  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  时总分辨率达 1 毫米。理论上, 在给定的空间频率下, 系统的总调制传递函数为各部份调制传递函数的乘积, 即:

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot M_4$$

式中:  $M_1$ —样品(镅条)中子像的调制传递函数;

$M_2$ —转换屏的调制传递函数;

$M_3$ —摄像系统的调制传递函数;

$M_4$ —显示系统的调制传递函数。



图 7 用 SEC 系统摄得的中子像照片

在镅条为 1mm 时,  $M_1 = 80\%$ ,  $M_2 = 40\%$ ,

$M_3 = 46\%$ ,  $M_4 = 68\%$ , 代入上式计算出系统总调制传递函数  $M = 10\%$ , 与实验所得相近。尽管现在图像质量还不够好, 离使用还有一定距离, 但我们的工作为我国小型中子照相技术进入使用阶段趟出了路子, 打下了基础。

## 参 考 文 献

- [1] S. J. Cocking, Robust Equipment for Dynamic Neutron Fluoroscopy. Proc. of the TWCNR, Japan 1989, (5): 527
- [2] Li Pinghui, Ban Xianfu, A TV System for Detection of Latent Fingerprint. SPIE, 1993, 1982: 356

## A TV System for Low Intensity Neutron Radiography

Li Pinghui, Ma Weichao\*, Ban Xianfu, Li Zhongmin\*, Liu Shaowu

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun130022)*

*(\*DePa. of Physics, Northeast Normal University, Changchun130022)*

### Abstract

A TV system for low intensity neutron ( $3\sim 4\times 10^3\text{n/cm}^2\text{s}$ ) radiography is described. The TV system uses unique integral characteristics of SEC TV camera, which converts a low illumination ( $7\times 10^{-4}\text{Lx}$ ) and discrete light point picture, that cannot be seen by human eyes, into a picture which can be observed on TV monitors.

**Key Words:** Neutron radiography, TV system, Low intensity