

文章编号: 0253-2239(2010)05-1478-05

# 基于光锥耦合的 X 射线像增强器

闫晓梅<sup>1</sup> 王志社<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024; <sup>2</sup> 太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024)

**摘要** 利用光锥的无畸变传输特性, 将它作为光学中继元件, 以光敏胶为耦合介质, 把 X 射线像增强器和电荷耦合器件(CCD)耦合起来, 组成 X 射线成像器件。探讨了光锥与 CCD 的耦合工艺, 给出了耦合过程中的关键技术并通过实验分析了空气和光敏胶作为耦合介质对光锥与 CCD 耦合效率的影响。实验表明, X 射线成像器件的空间分辨率达到 3.5 lp/mm, 对人体的 X 射线透视成像效果好, 能够满足小幅面的医学成像和无损检测的要求。

**关键词** 光学器件; 光锥; X 射线像增强器; 电荷耦合器件; 耦合

**中图分类号** O434.12; R318.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1478

## X-Ray Image Device Based on Optical Fiber Taper Coupling

Yan Xiaomei<sup>1</sup> Wang Zhishe<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)  
(<sup>2</sup> School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract** Using the nondistortion transport property of optical fiber taper and taking it as the optical relay component, X-ray image intensifier and charge coupled device (CCD) are coupled into X-ray image device by photosensitive adhesive as the coupling medium. The influences on coupling efficiency of optical fiber taper and CCD coupled by the coupling medium of air and photosensitive adhesive are analyzed, the coupling crafts are discussed and the key coupling techniques are given out. Experiments show that the spatial resolution of X-ray image device can reach as high as 3.5 lp/mm, which has good perspective images of human body and can meet the demands of small medical imaging as well as nondestructive testing.

**Key words** optical device; optical fiber taper; X-ray generation image intensifier; charge coupled device; coupling

## 1 引 言

数字 X 射线成像系统以其在图象获取显示存储和传输等方面的优势, 被广泛用于医学影像和工业无损检测领域<sup>[1]</sup>。这种传统的医用影像和工业无损检测的 X 射线成像系统一般具有较大的工作面积, 但其图像分辨力不高, 通常不超过 3 lp/mm<sup>[2]</sup>。而在实际应用中, 诸如人手骨折、骨质增生等病变的医学成像; 观察和分析微小部件内部结构的工作; 集成电路的检查、工业部门用于材料与元器件的无损检测以及微小零件的探伤等, 并不要求有很大的工作面积, 却要求有较高的图像清晰度。

目前, 国内某些厂家已经开发研制成了以 X 射线像增强器作为主要成像器件<sup>[3]</sup>的便携式 X 光机。

其主要工作原理是利用碘化铯荧光粉将 X 射线转换成电子通过随后的电子倍增元件将电子加速, 后利用微通道板转换为可见光, 在之后的荧光屏近贴成像。

但是这种便携式 X 光机是直视型的, 不能输出视频信号, 不能直接与计算机连接进行定量测量和分析。要克服这些缺点, 就必须对这种便携式 X 光机引入数字化技术。目前, 引入数字化技术有两种方案: 1) 通过光学透镜, 将 X 射线像增强器荧光屏图像耦合到电荷耦合器件(CCD)上<sup>[4]</sup>。2) 缩小倍率型像增强器, 与 CCD 芯片直接耦合<sup>[5]</sup>。第 1 种方案由于采用光学透镜, 成像系统的体积、重量较大, 不利于系统小型轻量化, 并且光能损失较大, 得到的图

收稿日期: 2009-05-20; 收到修改稿日期: 2009-07-13

基金项目: 2008 年太原科技大学校青年基金(20083012)资助课题。

作者简介: 闫晓梅(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事信号与信息处理方面的研究。E-mail: yanxm7980@sina.com

像的信噪比也明显降低。第 2 种方案使用了缩小倍率型像增强器,但是缩小倍率型像增强器技术难度大,成本高,不易推广。

本文利用光锥的无畸变传输特性,将它作为光学中继元件,以光敏胶作为耦合介质,把 X 射线像增强器和 CCD 耦合起来,组成 X 射线成像器件,实现数字化成像。相比于前两种方案,具有光能损失小,图像的信噪比大,体积小、重量轻和携带方便等优点。

表 1 三个耦合器件的主要技术指标

Table 1 Principal characteristics of three coupling devices

Parts name	Principal characteristics	
X-ray image intensifier	Effective angular field /mm	$\Phi 50$
	Output brightness / $(\text{cd}/\text{m}^2)$	$\geq 35$
	Image resolution ratio / $(\text{lp}/\text{mm})$	$\geq 4.0$
	Contrast ratio /%	$\geq 4$
	Output screen	Optical fiber plate
Optical fiber taper	Big-side diameter /mm	$\Phi 48.2$
	Small-side area / $\text{mm}^2$	$6.4 \times 4.8$
	Image pantograph ratio	6:1
	Height /mm	66.5
	Diameter of single filament for big-side / $\mu\text{m}$	13
CCD	Diameter of single filament for small-side / $\mu\text{m}$	1.8
	CCD dimension /mm	12.7
	Sensing area / $\text{mm}^2$	$6.5 \times 4.9$
	Effective pixels	$752 \times 582$
	pixel size / $\mu\text{m}^2$	$8.6 \times 8.4$

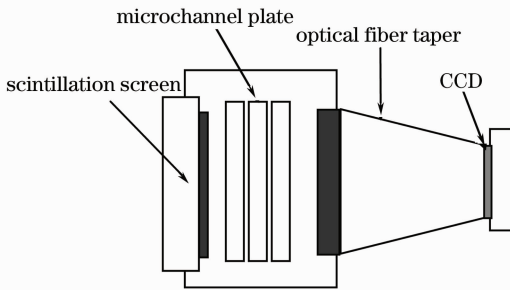


图 1 X 射线成像器件原理结构图

Fig. 1 Principle diagram of X-ray image sensor

## 2.1 光锥与 CCD 的耦合

光锥与 CCD 耦合实际上就是利用光学粘结剂把两个像素离散性的元器件(光锥和 CCD)串联装配起来,类似于光学玻璃与硅材料之间的耦合。

光锥的大端面面积是由 X 射线像增强器的输出面积决定,小端面面积对应 CCD 的有效工作面积,将光纤切成一个两端面相对应的光纤块,并将端面按照规定的要求抛光形成光锥。光锥的小端面边缘留有小倒角,主要是为了避免在光锥与 CCD 的耦合过程中损坏 CCD 的细线引脚。

## 2 X 射线成像器件的结构

X 射线成像器件主要是由 X 射线像增强器、光锥和 CCD 三个器件耦合而成。它有两个耦合面:一个是光锥的大端面与 X 射线像增强器的光纤面板之间,另一个是光锥小端面与 CCD 光敏面之间。表 1 为三个耦合器件的主要技术指标。图 1 是 X 射线成像器件的结构原理图。

光锥与 CCD 光敏面耦合之前,需要除去 CCD 的石英玻璃窗。CCD 的石英玻璃窗通常用机械的方法在超净室中去除,同时要保持 CCD 表面的清洁。然后将一个铝框粘接到 CCD 的石英玻璃边框上,用于封装光锥和 CCD,封装材料选择环氧树脂胶。

在耦合的过程中,首先把光敏胶涂在 CCD 的靶面上,然后一边调整,一边在光锥大端面观察,并轻轻挤压光锥,使光敏胶在 CCD 靶面上均匀涂开并无气泡产生,同时使光敏胶的厚度尽可能的小,因为光敏胶的厚度越小,成像的质量越好。耦合过程要避免损害 CCD 细丝引脚、涂胶的不均匀性、气泡和叠栅条纹的产生等问题。

## 2.2 耦合介质对光锥和 CCD 耦合效率的影响分析

光锥和 CCD 耦合效率( $\eta_{\text{FOT}}$ )是指 X 射线像增强器光纤面板荧光屏上发出的光经过光锥和耦合介质的损耗( $E_{\text{absorb}}$ )和 CCD 光敏面上的光束能量( $E_{\text{CCD}}$ )之和与 X 射线像增强器光纤面板荧光屏上发出的总光能( $E_{\text{all}}$ )之比,表示为<sup>[6,7]</sup>

$$\eta_{\text{FOT}} = (E_{\text{absorb}} + E_{\text{CCD}}) / E_{\text{all}} = (NA_{\text{Taper}})^2 T_{\text{R}} T_{\text{A}} K_{\text{C}} T_{\text{epoxy}}$$

式中  $NA_{\text{Taper}}$  为光锥的有效数值孔径,  $T_R$  为光线经光锥前后端面反射损耗后的透射率,  $T_A$  为光线经过光锥传输时, 光锥芯料吸收和内反射损耗后的透射率,  $K_C$  为光锥的有效填充率,  $T_{\text{epoxy}}$  为光线经过耦合介质的透射率。

从(1)式中可见, 光锥和 CCD 耦合的效率与光锥的有效数值孔径、光锥的有效填充率、光锥和耦合介质的吸收损耗相关。因此, 减少光锥端面的反射损耗和光线传输介质的吸收损耗, 可以有效地提高光锥和 CCD 的耦合效率。

光锥端面的反射损耗是由于光锥与耦合介质的折射率不同而产生的菲涅耳反射损耗<sup>[8]</sup>。文中光锥与 CCD 光敏面之间的耦合介质采用西安光机所生产的 AB 光敏胶, 它是低粘度的, 配用比例为 3:1, 固化后的折射率为 1.52 与 CCD 光敏面的折射率值较为接近光敏胶层和 CCD 光敏面之间的反射损耗可以忽略不计。但是光锥光纤芯的折射率高达 1.8,

因而光锥出射端面与耦合介质间会产生菲涅耳反射损耗。与空气相比光敏胶作为光锥与 CCD 的耦合介质, 光锥端面与耦合介质间、耦合介质和 CCD 光敏面间产生菲涅耳反射损耗都较小。

为了验证耦合介质对光锥与 CCD 耦合效率的影响, 分别对空(气)耦合和光敏胶耦合的光锥与 CCD 耦合器件进行了光学分辨率测试。实验选用平行光管作为光源, 测试结果如图 2(a), 图 3(a) 所示, 图 2(b), 图 3(b) 分别为图 2(a), 图 3(a) 中同一线对的行平均灰度曲线。从测试结果可知, 图 2(b) 的灰度曲线是陡峭变化的, 图 3(b) 的灰度曲线是缓慢变化的, 这说明图 3(a) 的图像清晰度高于图 2(a) 的。因此, 比较两种耦合方式, 后者明显好于前者, 因为光敏胶可以减少光锥端面的反射损耗, 提高光锥和耦合介质间的透过率; 同时光敏胶避免了光锥小端面与 CCD 光敏面直接接触而造成 CCD 表面损伤的可能, 也起到了对 CCD 和光锥的固定作用。

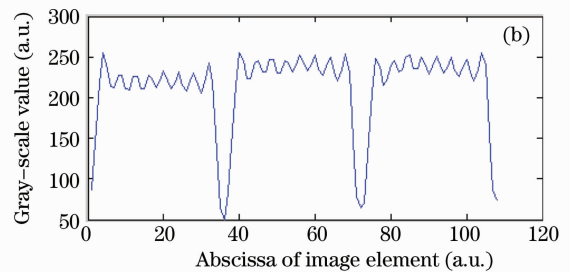
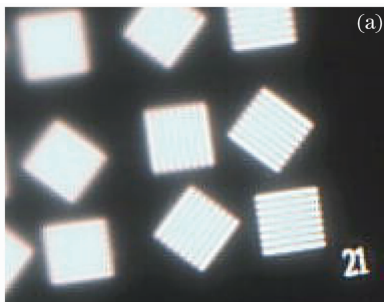


图 2 空(气)耦合器件的光学分辨率测试图像。(a) 图像; (b) 某一线对的行平均灰度曲线

Fig. 2 Optical resolution measurement image under air coupled condition. (a) image; (b) gray levels of average rows for some line pair

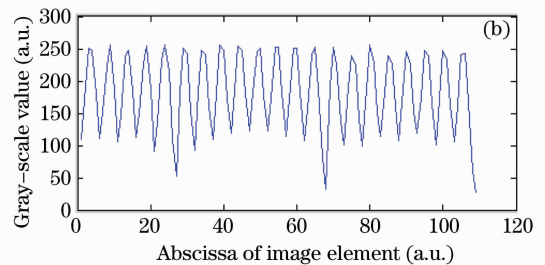
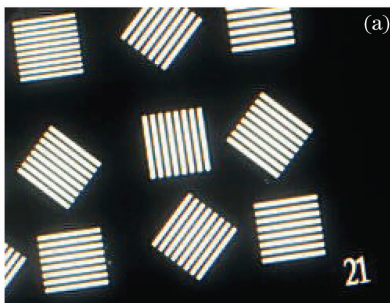


图 3 光敏胶耦合器件的光学分辨率测试图像。(a) 图像; (b) 同一线对的行平均灰度曲线

Fig. 3 Optical resolution measurement image under photosensitive adhesive coupled condition. (a) image; (b) gray levels of average rows for the same line pair

### 2.3 光锥和 X 射线像增强器的耦合

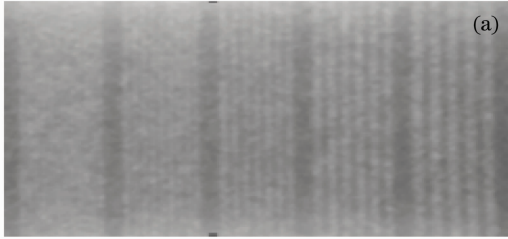
由于光锥是端面成像器件, X 射线像增强器的普通光学玻璃输出屏已不能满足要求, 因此可以换成光纤面板或者薄的透明云母片。选用光纤面板作为像增强器的输出屏, 光纤面板的纤维直径约为

$5 \mu\text{m}$ 。

光锥和 X 射线像增强器之间的耦合相当于两个平板玻璃之间的耦合。可以通过 CCD 将耦合过程的图像传到监视器上, 进行实时观察耦合过程要避免涂胶的不均匀性、气泡和叠栅条纹的产生等问题。

### 3 X 射线成像器件空间分辨率的测试

空间分辨率是 X 射线成像的重要技术指标<sup>[9]</sup>。实验选用的是低剂量的 X 射线机,焦点尺寸为  $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,射线分辨率板是  $10\text{ mm}$  厚均匀铝质分辨率板,其刻线的空间分辨率从左到右依次分别



4.0, 3.5, 2.8, 2.0 和  $1.6\text{ lp/mm}$ 。拍摄条件为 X 射线管工作电压为  $65\text{ kV}$ ,管工作电流为  $460\text{ }\mu\text{A}$ ,测得 X 射线成像器件的空间分辨率为  $3.5\text{ lp/mm}$ ,如图 4(a)所示,图 4(b)为 4(a)的行平均灰度曲线。

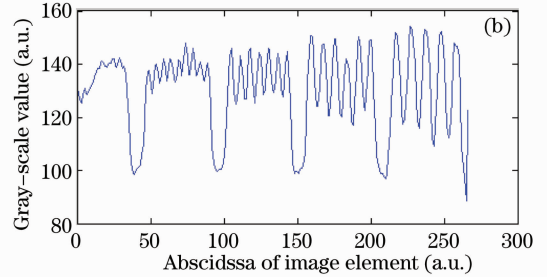


图 4 X 射线成像器件的分辨率测试图像。(a) 分辨率测试图像;(b) 行平均灰度曲线

Fig. 4 Resolution measurement image by X-ray image sensor. (a) resolution measurement image;  
(b) gray levels of average rows

X 射线成像器件的分辨率主要受限于 X 射线像增强器。在耦合 X 射线像增强器之前,通过光学分辨率测试,光锥和 CCD 耦合器件的光学分辨率能达到  $25\text{ lp/mm}$ ,耦合 X 射线像增强器后,X 射线成像器件的分辨率会有很大的下降。目前国内生产的 X 射线像增强器,虽然使用说明书注明的空间分辨率大于或等于  $4\text{ lp/mm}$ ,但是由于受到 X 射线分辨率卡与 CCD 像元尺寸匹配精度、X 射线源焦点尺寸<sup>[11]</sup>等因素的影响,实际测得的空间分辨率为  $3.5\text{ lp/mm}$ 。从图 4 的测试结果来看,X 射线成像器件空间分辨率也达到

了  $3.5\text{ lp/mm}$ ,这就说明了文中所选用的光敏胶能够较好地保持成像器件的分辨率。

### 4 X 射线成像器件的实际应用

通过对人体各个部位观察,图 5 是对人的手指骨、手掌、手腕的 X 光透视照片。从透视照片来看,各个部位的图像都比较清晰,能够对这些部位的骨折、骨质增生等病变作出准确的诊断。

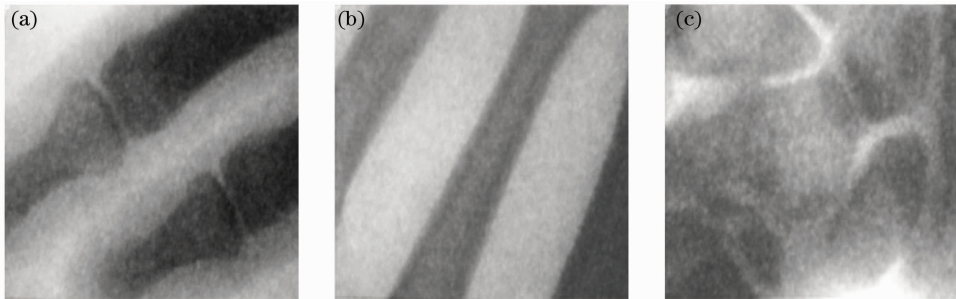


图 5 X 射线成像器件对人体的透视成像。(a) 手指骨成像;(b) 手掌骨成像;(c) 手腕骨成像

Fig. 5 Perspective images of human body by X-ray image sensor. (a) finger bone's imaging;  
(b) paw bone's imaging;  
(c) wrist bone's imaging

### 5 结 论

研究的 X 射线成像器件具有光能损失小,图像信噪比大,分辨率高的特点。通过实验分析比较了空气和光敏胶作为耦合介质对光锥与 CCD 耦合器件分辨率的影响。结果表明,利用光敏胶可以减少光锥端面的反射损耗,提高光锥和耦合介质间的透

射率,能够较好地保持成像器件的空间分辨率可达  $3.5\text{ lp/mm}$ ,对人体的透视成像效果比较好,能够满足小幅面的无损检测和医学成像的要求。

### 参 考 文 献

- 1 N. S. P. King, K. Albright, S. A. Jaramillo *et al.*. High frame rate CCD cameras with fast optics shutters for military and medical imaging application[C]. *SPIE*, 1994, **2273**: 56~60

- 2 Liu Dezhen. Modern Ray Inspection Technology [M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2002  
刘德振. 现代射线检测技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002
- 3 Zhou Zhenggan, Teng Shenghua. X-ray flat-panel-detector-based digital radiography and its image calibration [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, **30**(8): 698~701  
周正干, 滕升华. X射线平板探测器数字成像及其图像校准[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, **30**(8): 698~701
- 4 Liu Jikun, Zhao Baoyun. Intensified CCD image sensors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1998, **19**(1): 37~39  
刘继琨, 赵宝芸. 增强型 CCD 图像传感器[J]. 半导体光电, 1998, **19**(1): 37~39
- 5 I. N. Dalinenko, A. V. Malyarov, G. I. Vishnevsky *et al.*. Design and fabrication technology of thinned back side excited CCD imagers and the family of the intensified electron-bombarded CCD image tubes[C]. *SPIE*, 1995, **2551**: 197~205
- 6 Wang Yaoxiang, Tian Weijian, Huang Kun *et al.*. Theoretical analysis of the coupling efficient between fiber taper and CCD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 318~321  
王耀祥, 田维坚, 黄琨等. 光锥与 CCD 耦合效率的理论分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(3): 318~321
- 7 G. C. Holst. CCD Arrays, Camera and Displays [M]. Winter Park: SPIE Optical Engineer Press, 1998. 197
- 8 Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on fresnel reflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958  
徐平, 庞拂飞, 陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1955~1958
- 9 Zeng Xiangzhao. The definition and resolution of image in real-time radiographic testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2003, **25**(3): 133~139  
曾祥照. 射线实时成像检测中的图像清晰度与分辨率[J]. 无损检测, 2003, **25**(3): 133~139
- 10 Chen Shuyue, Lu Hongnian. Research of noise characteristic and noise depression in X-ray digital radiographic system [J]. *Nondestructive Testing*, 2001, **23**(1): 9~14  
陈树越, 路宏年. X射线数字成像噪声特性及噪声消除方法研究[J]. 无损检测, 2001, **23**(1): 9~14
- 11 Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104  
丁晓华, 李由, 于起峰等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 99~104