

# 光锥与 CCD 耦合效率的理论分析\*

王耀祥 田维坚 黄琨 张薇 汪丽

(中国科学院西安光学精密机械研究所光纤与集成光学研究室, 西安 710068)

**摘要** 光锥与 CCD 的耦合技术是研制 ICCD 图像传感器的关键技术, 本文主要从理论上分析并讨论了光锥与 CCD 耦合器件的耦合效率及其影响因素, 进一步分析讨论了耦合效率对耦合器件信噪比的影响. 证明了光锥与 CCD 的耦合效率不仅降低 ICCD 探测效率而且降低 ICCD 信噪比, 并提出了提高光锥与 CCD 耦合效率的方法和途径.

**关键词** 光锥; CCD; 耦合效率; 信噪比

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

ICCD 图像传感器已经广泛应用于微光夜视、目标识别及探测、激光制导、机器人视角以及 X 射线高分辨率医学成像等领域<sup>[1,2]</sup>. 利用光学中继元件, 将微光管光纤面板荧光屏(有效的直径通常为 18 mm, 25 mm, 30 mm)输出的增强图像耦合到 CCD 的光敏面上(对角线的尺寸通常为 12.7 mm, 16.9 mm), 从而实现微光摄像和高分辨率的成像, 是研制 ICCD 的关键技术. 在设计或者采用光学中继元件时, 必须考虑尽可能的收集从增强器输出的光子能量, 并且能够以最小的像差投影到 CCD 的光敏面上. 像增强器和 CCD 耦合的最常用的方法就是利用成像物镜或者是采用光锥作为中继元件. 与以成像物镜为光学中继元件的耦合方法相比, 光锥与 CCD 耦合具有耦合效率高、体积小、重量轻等优点.

本文主要从理论上分析并讨论了光锥与 CCD 耦合器件的耦合效率及其影响因素, 并进一步分析讨论了耦合效率对耦合器件的信噪比的影响.

## 1 光锥与 CCD 耦合效率的数学分析

ICCD 的结构如图 1. 光锥和 CCD 耦合其实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. 一般情况下, CCD 芯片封装时, 一般采用石英玻璃(也有采用光纤面板)作为窗口材料. 因此, 光锥和 CCD 耦合时存在三个界面: 1) 光锥小端输出面与光学粘结剂之间的界面; 2) 光学粘结剂与封装 CCD 表面的石英窗(或者光纤面板)之间的界面; 3) CCD 光敏面与封装 CCD 表面的石英窗(或者光纤面板)之间的非接触性界面.

在实际耦合时, 考虑到为了降低光能损耗, 提高耦合效率和分辨率, 去除 CCD 封装的石英玻璃(或光纤面板)窗口材料, 采用光锥与 CCD 光敏面直接的耦合.

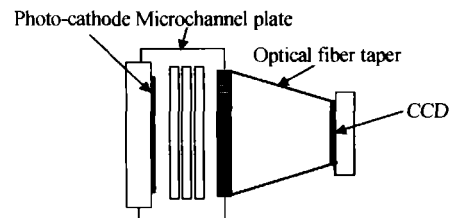


图 1 ICCD 结构图

Fig. 1 Illustration of the construction of intensifier CCD

### 1.1 光锥的集光效率

一般情况下, 像增强器荧光屏发射的光满足 Lambertian 光源的发光条件, 所以光纤的入射端所

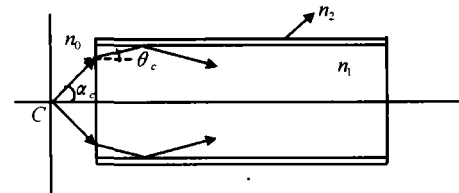


图 2 光纤与 Lambertian 光源间的耦合

Fig. 2 Coupling between optical fiber and a Lambertian source  
能接收的从光源 C 发出的光通量(能量)为<sup>[3]</sup>

$$\phi_F = \int_0^{\alpha_c} 2\pi I(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \int_0^{\alpha_c} 2\pi I_0 \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \pi I_0 \sin^2 \alpha_c \quad (1)$$

光源 C 发出的总光通量为

$$\phi_T = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi I_0 \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \pi I_0 \quad (2)$$

即圆柱光学纤维的集光效率 P

$$P = \phi_F / \phi_T = \sin^2 \alpha_c \quad (3)$$

在锥形光纤中, 当光线从大端向小端传播时, 光线在芯-皮界面上的反射角  $\phi$  随反射次数增加而逐渐减少(见图 3), 全反射条件易被破坏, 一部分入射光线会发生泄漏. 因此锥形光纤的集光效率决定于其大端的有效孔径角  $\alpha_c$ <sup>[4]</sup>.

\*所长基金资助项目(40001042)

Tel: 029-8484252 Email: materials@opt.ac.cn

收稿日期: 2003-04-30

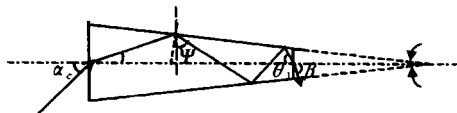


图3 子午光线在锥形光纤中的传播  
Fig.3 Propagation of the meridional ray in the conical fiber

$$\sin \alpha_c = \frac{d_1}{d_2} \frac{1}{n_{01}} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_c$  是大端孔径角,  $d_1$  和  $d_2$  分别是光纤出射端(小端)和入射端(大端)的半径;  $n_{01}$  为包围锥形光纤大端的介质折射率. 在空气介质中  $n_{01} = 1$ , 设  $N \cdot A_{\text{Taper}}$  为光锥的有效数值孔径, 所以锥形光纤的集光效率为

$$P = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = (N \cdot A_{\text{Taper}})^2 \quad (5)$$

### 1.2 光线在光锥中的传播

光线在光锥中传播时(见图3), 会产生的衰减损耗有下列三种:

1) 光锥入射和出射端面产生菲涅耳反射损耗. 设入射端面和出射端面的反射率分别为  $R$  和  $R'$ ,  $R$  和  $R'$  分别是光锥端面入射角  $\alpha$  (或出射角  $\theta_1$ ) 和折射角  $\theta$  (或  $\beta$ ) 的函数<sup>[4]</sup>, 光线经过光锥前后端面反射损耗后的剩余量为  $(1 - R)(1 - R')$ .

2) 光线在光锥中传播时, 光纤内部产生的吸收损耗有两种: ① 光纤中存在倏逝波穿透效应<sup>[5]</sup>, 会有一部分光能量泄漏进入皮层, 进一步泄漏出光锥或被黑吸收丝吸收, 产生损耗. 剩余的光量应为  $(1 - \bar{A})^\eta$ , 其中,  $\bar{A}$  为每次全反射的损耗率,  $\eta$  为光线在锥形光纤中经历的总反射次数<sup>[6]</sup>, 即

$$\eta = \frac{\theta - \theta_1}{\delta} \quad (6)$$

式中,  $\delta$  为锥角,  $\theta$  为光纤入射端面的折射角,  $\theta_1$  为光纤出射端面的出射角. ② 光纤芯对光线吸收引起的损耗  $\exp(-\varepsilon L)$ , 其中  $\varepsilon$  为光纤芯的光吸收系数,  $L$  为光线在光锥中传播的总光路长度<sup>[6]</sup>

$$L = \frac{\sin(\theta_1 - \theta)}{\sin \theta} \frac{d_1}{d_2 - d_1} \quad (7)$$

3) 纤维元件-光锥传光的有效面积仅为光纤纤芯的面积, 光锥中光纤单丝做六边最密堆积时, 它的有效填充率  $K_c$  最高<sup>[7]</sup>, 且  $K_c = 0.907(d_{\text{core}}/d_{\text{fiber}})^{[2]}$ .

对于确定的光锥, 根据图3的几何关系和折射定律可得参量  $\theta, \beta$  和  $\theta_1$  都是光纤端面入射角  $\alpha$  的函数, 所以反射损耗  $R(\alpha), R'(\alpha), \eta(\alpha)$  和  $L(\alpha)$  同样都是光纤端面入射角  $\alpha$  的函数. 考虑到上述损耗, Lambertian 光源入射的光束能量能从光锥射出的部分应为

$$E(\alpha)_{\text{taper}} = \int_0^{\alpha_c} 2\pi I_0 \cos \alpha \sin \alpha [1 - R][1 - R'] \cdot$$

$$[1 - \bar{A}]^\eta \exp[-\varepsilon L] K_c d\alpha = \phi_F K_c \int_0^{\alpha_c} [1 - R][1 - R'] \cdot [1 - \bar{A}]^\eta \exp[-\varepsilon L] d\alpha \quad (8)$$

令  $T_R = \int_0^{\alpha_c} (1 - R)(1 - R') d\alpha$ , 即为光线经过光锥前后端面反射损耗后的透过率; 令  $T_A = \int_0^{\alpha_c} (1 - \bar{A})^\eta \exp(-\varepsilon L) d\alpha$ , 即光线经过光锥传输时, 由于光锥芯料吸收和内反射损耗后产生的透过率, 将上式带入式(8), 可得

$$E(\alpha)_{\text{taper}} = \phi_F K_c T_R T_A \quad (9)$$

### 1.3 光线在耦合介质-光学环氧层中的传播

当光锥输出面与 CCD 光敏面直接耦合时, 在光锥输出面与 CCD 光敏面间存在一定厚度  $t$  的光学环氧胶层(见图4), 锥形光纤的出射端  $d_2$  (小端) 和入射端  $d_1$  (大端) 的孔径角存在下面的关系<sup>[4]</sup>

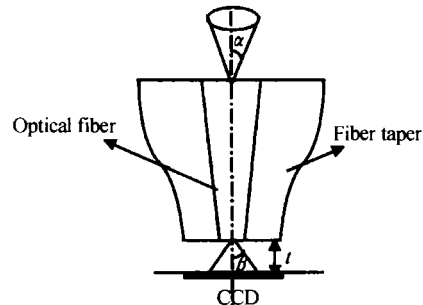


图4 光锥与 CCD 耦合结构图  
Fig.4 Illustration of the construction of CCD coupled with fiber taper

$$\sin \beta = \frac{d_1}{d_2} \frac{\sin \alpha}{n_{\text{epoxy}}} \quad (10)$$

$n_{\text{epoxy}}$  为环氧层折射率, 光线经过光锥进入环氧层中的传播到 CCD 光敏面的路程

$$L(\alpha)_{\text{epoxy}} = \frac{t}{\cos \beta} = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \frac{\sin \alpha}{n_{\text{epoxy}}}\right)^2}} \quad (11)$$

在光锥与 CCD 光敏面之间存在光学环氧介质层, 光线在环氧层中传播时, 存在两种损耗:

1) 由于光学环氧的折射率值一般为 1.52, 与 CCD 光敏面的折射率值较为接近, 而光纤芯的折射率高达 1.8, 因而光锥出射端面与环氧层间产生菲涅耳反射损耗  $R'$  (已经在上一节中分析光锥出射端面损耗时考虑到), 环氧层和 CCD 光敏面之间的反射损耗可以忽略不计.

2) 光学环氧层对光线的吸收引起的损耗  $\exp[-\varepsilon_{\text{epoxy}} L(\alpha)_{\text{epoxy}}]$ , 则光线经过环氧层的透过率为

$$T_{\text{epoxy}} = \int_0^{\alpha_c} [1 - \exp(-\varepsilon_{\text{epoxy}} L_{\text{epoxy}})] d\alpha \quad (12)$$

因此, 从像增强器荧光屏上发出的光, 经过光锥和光学环氧层的收集和传播到达 CCD 光敏面的光

束能量为

$$E(\alpha)_{\text{CCD}} = \int_0^{\alpha_c} 2\pi I_0 \cos \alpha \sin \alpha [1-R][1-R'] \cdot [1 - \bar{A}^{\eta} \exp[-\varepsilon L - \varepsilon_{\text{epoxy}} L(\alpha)_{\text{epoxy}}]] K_c d\alpha = \phi_F T_R T_A T_{\text{epoxy}} K_c \quad (13)$$

#### 1.4 光锥与 CCD 的耦合效率

根据以上分析,从像增强器荧光屏上发出的光,经过光锥和光学环氧层的收集和传播到达 CCD 光敏面的光束能量与像增强器荧光屏上发出的总的光能之比,即为光锥与 CCD 的耦合效率

$$\eta = \left\{ \int_0^{\alpha_c} 2\pi I_0 \cos \alpha \sin \alpha [1-R][1-R'] [1-\bar{A}]^{\eta} \cdot \exp[-\varepsilon L - \varepsilon_{\text{epoxy}} L(\alpha)_{\text{epoxy}}] K_c d\alpha \right\} / \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi I_0 \cdot \cos \alpha \sin \alpha d\alpha \right\} = p T_R T_A T_{\text{epoxy}} K_c = (NA_{\text{Taper}})^2 T_R T_A K_c T_{\text{epoxy}} \quad (14)$$

从式(14)可以看出,光锥与 CCD 的耦合效率与光锥的有效数值孔径、光锥的有效填充率、光锥和光学环氧层引起的损耗有关。提高光锥与 CCD 的耦合效率的有效手段就是采用大数值孔径的光锥、减小端面的反射损耗和光线传输介质的吸收损耗,提高光锥和光学环氧层的透过率。

## 2 光锥与 CCD 耦合效率对耦合器件信噪比的影响

在 ICCD 成像系统中,耦合器件最终可探测到的信号大小可以表示为<sup>[8]</sup>

$$n_{\text{ICCD}} = \eta_{\text{CCD}} \eta_{\text{FOT}} n_{\text{intensifier}} \quad (15)$$

式中,  $\eta_{\text{CCD}}$  为 CCD 的量子转化效率,  $\eta_{\text{FOT}}$  为光锥的耦合效率,  $n_{\text{intensifier}}$  是由像增强器放大输出的光子量。

在 ICCD 成像系统中,耦合器件探测到的信号噪声主要是由前置像增强器和 CCD 产生的,信号噪声可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\langle n_{\text{ICCD}}^2 \rangle = \eta_{\text{CCD}}^2 \eta_{\text{FOT}}^2 \langle n_{\text{intensifier-noise}}^2 \rangle + \langle n_{\text{CCD-noise}}^2 \rangle \quad (16)$$

式中,  $\langle n_{\text{CCD-noise}}^2 \rangle$  是 CCD 产生的信号噪声,  $\langle n_{\text{intensifier-noise}}^2 \rangle$  是由像增强器产生的信号噪声。因此 ICCD 的信噪比为

$$SNR = \frac{\eta_{\text{CCD}} \eta_{\text{FOT}} n_{\text{intensifier}}}{\sqrt{\eta_{\text{CCD}}^2 \eta_{\text{FOT}}^2 \langle n_{\text{intensifier-noise}}^2 \rangle + \langle n_{\text{CCD-noise}}^2 \rangle}} \quad (17)$$

由式(17)可以看出,当像增强器的增益特别高时,由 CCD 产生的噪声  $\langle n_{\text{CCD-noise}}^2 \rangle$  可以忽略,因此可

以认为信号噪声与光锥与 CCD 耦合器件的特性无关,当像增强器的增益比较低时,CCD 的噪声大于像增强器的噪声,这时候,ICCD 的信噪比为

$$SNR = \frac{n_{\text{intensifier}}}{\sqrt{\langle n_{\text{intensifier-noise}}^2 \rangle + \langle n_{\text{CCD-noise}}^2 \rangle} \frac{1}{\eta_{\text{CCD}} \eta_{\text{FOT}}}} \quad (18)$$

所以提高光锥与 CCD 间的耦合效率,又可以改善 ICCD 的信噪比。

## 3 结论

1) 光锥与 CCD 的耦合效率不仅影响 ICCD 探测效率而且影响 ICCD 信噪比。

2) 光锥与 CCD 的耦合效率与光锥的有效数值孔径、光锥的有效填充率、光锥和光学环氧层引起的损耗有关。

3) 提高光锥与 CCD 耦合效率的有效手段就是采用大数值孔径和高填充率的光锥、减小端面的反射损耗和光线传输介质的吸收损耗。这最终可以通过合理设计光锥的几何和光学参量(单丝直径、有效填充率、数值孔径等)加以改善。

### 参考文献

- Xin Fuxue. Optical fiber coupling technique of ICCD. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, **30**(3): 210 ~ 213
- King N S P, Albright K, Jaramillo S A, et al. High frame rate CCD cameras with fast optics shutters for military and medical imaging application. *Proc of SPIE*, 1994, **2273**: 56 ~ 60
- An Liangsheng. Applied optics. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. 112
- Liu Deseng, Yin Zongmin, Zhu Songlai, et al. Fiber optics. Beijing: Science Press, 1987. 46 ~ 68
- Zhao Jianlin. Advanced optics. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 42
- Kapany N S. Fiber optics, principles and applications. New York, Academic Press, 1967. 22
- Karellas A, Harris LJ, Liu H, et al. Charge-coupled device detector: performance considerations and potential for mammographic imaging. *Med Phys*, 1992, **19**(4): 1015
- Holst G C. CCD arrays, cameras and displays. SPIE Optical Engineering Press, 1998. 197

## Theoretical Analysis of the Coupling Efficient Between Fiber Taper and CCD

Wang Yaoxiang, Tian Weijian, Huang Kun, Zhang Wei, Wang Li

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

Received date: 2003-04-30

**Abstract** The coupling between fiber optical taper and CCD is the critical technique for the integrated taper assembly image intensified sensors. Compared to a lens-coupled CCD camera system, the CCD camera coupled with fiber optical taper has higher collection efficiency, and yields significant gains. In this paper, the integrated devices for the fiber optical taper and CCD are studied. Coupling efficient, signal-to-noise ratio. By the theoretical analysis, the influence of the coupling efficient on signal-to-noise ratio has also been showed. Finally some ways improved characteristics of the integrated devices are put forward.

**Keywords** Fiber optical taper; CCD; Coupling efficient; Signal-to-noise ratio



**Wang Yaoxiang** was born in 1972, in Shaanxi Province. He graduated from the Department of Materials Science and Engineering, Changchun College of Optics and Fine Mechanics in 1996. He received his M. S. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academy sinica in 2000, where presently he is a Ph. D. candidate. He is interested in photoelectronic material and image devices.