

纤维光锥有效透过率的理论分析*

王耀祥 田维坚 章兴龙 于慧霞 王佑权 刘晓峰

(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 光锥的有效透过率不仅影响光锥与 CCD 的耦合效率, 而且会影响到耦合器件的信噪比. 本文主要从理论上讨论了影响光锥有效透过率性能的因素, 从纤维光学元件的实际内部结构推导出了其实际有效填充率, 从光线在光锥中的传输特征推导出了光线在光锥中传播时产生的衰减损耗, 最后提出了提高光锥有效透过率的方法和途径.

关键词 光锥; 有效填充率; 衰减损耗; 有效透过率

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. 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)输出的增强的图像, 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. 与以透镜为光学中继元件的耦合方法相比, 光锥与 CCD 耦合技术不仅具有较高的耦合效率, 提高了 CCD 的光信号增益, 而且可以大大减小成像相机的体积和重量^[1].

光锥与 CCD 的耦合效率主要取决于光锥的有效透过率, 而且光锥的耦合效率又影响到光锥与 CCD 耦合器件的信噪比^[2], 因此, 提高光锥的有效透过率不仅有利于光锥与 CCD 的耦合效率的提高, 而且可以改善耦合器件的信噪比. 本文主要从理论上分析了影响光锥有效透过率的因素, 并提出了改善光锥有效透过率的方法和途径.

1 光锥有效透过率的理论分析

透过率是表示纤维光学元件传光性能的一个重要参数. 影响光锥有效透过率的主要因素有:

1) 有效填充率: 即纤维内芯所占光锥端面总横截面积之比, 它是纤维中用以决定有效透射截面积百分数的参数.

2) 光纤的透过性质: 芯玻璃引起的吸收损耗、结石、条纹引起的光散射损耗, 以及纤维芯料与涂层界面的缺陷(空隙、析晶、乳化)引起的光漏损.

3) 光锥的锥度比: 光锥小端直径与光锥大端直

径之比.

4) 入射和出射面的反射损耗.

1.1 有效填充率

纤维光学元件的有效填充率与光纤的形状和单丝的排列方式密切相关.

1.1.1 圆形光纤单丝采用正方形排列时纤维光学元件的有效填充率

n 根圆形单丝做正方形排列时, 设光纤的直径为 D , 纤芯的直径为 d , 其有效传光总截面积 $S_{\text{effective}}$ 为 $n\pi(\frac{d}{2})^2$, 其总截面积 S_{total} 为 nD^2 .

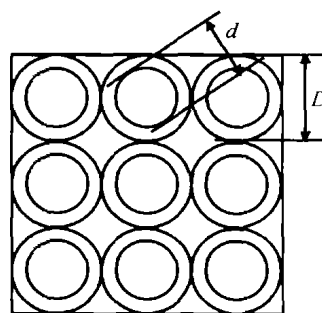


图1 圆形单丝作正方形排列的纤维光学元件端面结构
Fig. 1 Cross-section of fiber optic element formed by circular fiber arranged in square order

所以, 圆形光纤单丝采用正方形排列时, 形成的一次复丝有效填充率为

$$K_{\text{effective}} = \frac{S_{\text{effective}}}{S_{\text{total}}} = 0.785 \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (1)$$

当一次复丝进一步排列形成二次复丝时, 实际就是填充系数为 $0.785\left(\frac{d}{D}\right)^2$ 的正方形一次复丝作正方形密堆排列, 因此二次的填充系数仍为 $0.785\left(\frac{d}{D}\right)^2$. 最终, 通过二次复丝的正方形排列通过加工工艺得到的纤维光学元件的有效填充率为 $0.785\left(\frac{d}{D}\right)^2$.

所以对于圆形单丝做正方形排列时, 形成的纤维光学元件, 无论单丝数量 n 为多少, 其填充率仅与

*国家 863 计划(2002AA716021)资助项目

Tel: 029-88472090 Email: materials@opt.ac.cn

收稿日期: 2004-02-17

单丝的单丝芯、皮的几何尺寸有关。

1.1.2 圆形光纤采用六边形排列时纤维光学元件的有效填充率

纤维光学元件不是理想的纯圆形光纤之间的排列,①首先是由圆形光纤六角排列形成六边形一次复丝棒;②六边形的一次复丝棒拉制后,再经过六角排列形成二次复丝棒;③二次复丝棒拉制后,再经过六角排列经过热熔压工艺形成纤维光学元件。

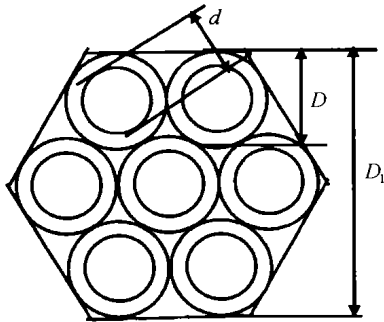


图2 六边形一次复丝预制棒端面
Fig.2 Cross-section of the initial multifiber formed by circular fiber arranged in hexagonal order

1)一次复丝的有效填充率

表1 圆形光纤六角排列形成六边形一次复丝棒有效填充率

每边对应根数 n_1	3	5	10	∞
光纤总根数	19	61	271	-
光纤截面面积	$19\pi(\frac{d}{2k_1})^2$	$61\pi(\frac{d}{2k_1})^2$	$271\pi(\frac{d}{2k_1})^2$	-
六边形面积	$\frac{\sqrt{3}(2\sqrt{3}+1)^2}{2}(\frac{D}{k_1})^2$	$\frac{\sqrt{3}(4\sqrt{3}+1)^2}{2}(\frac{D}{k_1})^2$	$\frac{\sqrt{3}(9\sqrt{3}+1)^2}{2}(\frac{D}{k_1})^2$	-
有效填充率	$0.865(\frac{d}{D})^2$	$0.88(\frac{d}{D})^2$	$0.893(\frac{d}{D})^2$	$0.907(\frac{d}{D})^2$

2)二次复丝的填充率

由圆形单丝做六角排列得到的一次复丝成六角形,由六角形一次复丝排列得到的二次复丝预制棒形状见下图3。

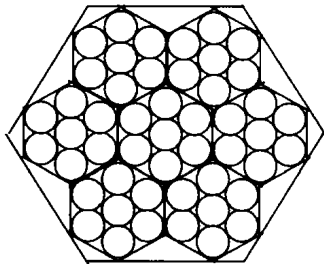


图3 由六角形一次复丝排列得到的二次复丝预制棒端面
Fig.3 Cross-section of the second multifiber formed by hexagonal initial multifiber

由图3可以看出,一次复丝排列得到的二次复丝的有效填充率又不同于一次复丝,把对边距为 $\frac{D_1}{k_1}$ 的一次复丝组合成每边 n_2 根一次复丝的正六边形

把直径为 D 的单丝组合成每边 n_1 根单丝的正六边形一次复丝预制棒.见图2.这根一次复丝棒的对边距为

$$D_1 = [\sqrt{3}(n_1 - 1) + 1]D \quad (2)$$

且此时,六方形内纤维的总根数为: $m = 3n_1(n_1 - 1) + 1$

将一次复丝棒按一定比例 k_1 拉制成一次复丝,这时光纤的有效截面积为

$$S_{\text{effective}} = m\pi\left(\frac{d}{2k_1}\right)^2 \quad (3)$$

六边形的总面积为

$$S_{\text{total}} = 6 \times \frac{D_1}{2k_1} \frac{D_1}{2\sqrt{3}k_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{D_1}{k_1}\right)^2 \quad (4)$$

所以,在一次复丝排列中,一次复丝有效填充率为

$$K_{\text{effective}} = \frac{S_{\text{effective}}}{S_{\text{total}}} \quad (5)$$

从以上理论推导及分析结果可以看出,圆形光纤六角排列形成六边形一次复丝棒有效填充率不仅与与单丝的单丝芯、皮的几何尺寸有关,还与正六边形每边对应的光纤数 n_1 有关,随 n_1 增大,有效填充率增大(见表1)。

二次复丝,二次复丝棒的对边距为

$$D_2 = \frac{(3n_2 - 1)}{\sqrt{3}} \left(\frac{D_1}{k_1}\right) = \frac{(3n_2 - 1)[\sqrt{3}(n_1 - 1) + 1]}{\sqrt{3}} \left(\frac{D_1}{k_1}\right) \quad (6)$$

且此时,六方形的二次复丝内一次复丝的总根数为

$$m_2 = 3n_2(n_2 - 1) + 1 \quad (7)$$

因此,二次复丝中的单丝总根数为

$$m_2 = [3n_2(n_2 - 1) + 1]m_1 = [3n_2(n_2 - 1) + 1] \cdot [3n_1(n_1 - 1) + 1] \quad (8)$$

按一定比例 k_2 拉制成二次复丝的有效截面为

$$S'_{\text{effective}} = m_2\pi\left(\frac{d}{2k_1k_2}\right)^2 = [3n_2(n_2 - 1) + 1] \cdot [3n_1(n_1 - 1) + 1]\pi\left(\frac{d}{2k_1k_2}\right)^2 \quad (9)$$

六方形二次复丝的总面积为

$$S'_{\text{total}} = 6 \times \frac{D_2}{2k_2} \frac{D_2}{2\sqrt{3}k_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{D_2}{k_2}\right)^2 = \frac{(3n_2 - 1)^2 [\sqrt{3}(n_1 - 1) + 1]^2}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D}{k_1 k_2}\right)^2 \quad (10)$$

所以,在二次复丝中有效填充率为

$$K'_{\text{effective}} = \frac{S'_{\text{effective}}}{S'_{\text{total}}} \quad (11)$$

表 2 六角形排列的二次复丝有效填充率

每边对应一次复丝的根数 n_2	3	5	10	∞
光纤总根数 m_2	$19m_1$	$61m_1$	$271m_1$	-
光纤截面面积	$19m_1 \pi \left(\frac{d}{2k_1 k_2}\right)^2$	$61m_1 \pi \left(\frac{d}{2k_1 k_2}\right)^2$	$271m_1 \pi \left(\frac{d}{2k_1 k_2}\right)^2$	-
六边形面积	$\frac{64[\sqrt{3}(n_1 - 1) + 1]^2}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D}{k_1 k_2}\right)^2$	$\frac{196[\sqrt{3}(n_1 - 1) + 1]^2}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D}{k_1 k_2}\right)^2$	$\frac{841[\sqrt{3}(n_1 - 1) + 1]^2}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D}{k_1 k_2}\right)^2$	-
有效填充率 ($n_1 = 5$)	$0.784 \left(\frac{d}{D}\right)^2$	$0.822 \left(\frac{d}{D}\right)^2$	$0.851 \left(\frac{d}{D}\right)^2$	$0.88 \left(\frac{d}{D}\right)^2$
有效填充率 ($n_1 = 3$)	$0.77 \left(\frac{d}{D}\right)^2$	$0.807 \left(\frac{d}{D}\right)^2$	$0.836 \left(\frac{d}{D}\right)^2$	$0.865 \left(\frac{d}{D}\right)^2$

从理论推导及分析结果可以看出,六边形一次复丝棒排列形成的二次复丝有效填充率与一次复丝有效填充率一样,不仅与单丝的单丝芯、皮的几何尺寸有关,还与正六边形每边对应的一次复丝数 n_2 有关,随 n_2 增大,有效填充率增大。

3) 纤维光学元件

最终由二次复丝六方排列,经过热熔压后得到的纤维光学元件的有效填充率也就是二次复丝的有效填充率。

1.2 光线在光锥中传播时产生的衰减损耗

纤维光学元件的透过率除了与填充率有关,还取决于纤维光学元件的光损耗,光线在光锥中的传播时,会产生的衰减损耗主要有二种:

1) 由于入射和出射端面上空气(或环绕纤维的媒质)与纤维芯料的折射率不同而产生的菲涅耳反射损耗. 入射端面的反射率为

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\tan^2(\alpha - \theta)}{\tan^2(\alpha + \theta)} + \frac{\sin^2(\alpha - \theta)}{\sin^2(\alpha + \theta)} \right] \quad (13)$$

式中, α 为光纤的端面入射角, θ 为折射角.

出射端面上反射率 R' 为

$$R' = \frac{1}{2} \left[\frac{\tan^2(\theta_1 - \beta)}{\tan^2(\theta_1 + \beta)} + \frac{\sin^2(\theta_1 - \beta)}{\sin^2(\theta_1 + \beta)} \right] \quad (14)$$

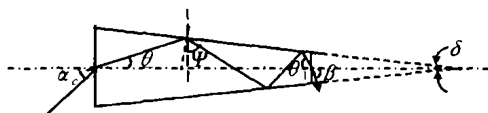


图 4 子午光线在锥形光纤中的传播

Fig. 4 Propagation of the meridional ray in the conical fiber

2) 光线在光锥中传播时,光纤内部产生的损耗有两种:

① 光纤中单丝的直径小到波长数量级时,由于存在倏逝波穿透效应^[3],会有一部分光能量泄漏进入皮层,另外,纤维的芯与涂层界面杂质引起的光散

射会进一步泄漏出光锥或被黑吸收丝吸收,产生损耗. 设每次全反射的损耗率为 \bar{A} , 如果考虑到反射次数 η , 则剩余的光量应为 $(1 - \bar{A}) \eta$.

光线在锥形光纤中传播时,经历的总反射次数为^[4]

$$\eta = \frac{\theta - \theta_1}{\delta} \quad (15)$$

式中, δ 为锥角, θ 为光纤入射端面的折射角, θ_1 为光纤出射端面的出射角.

② 由于光纤芯料存在光吸收,设光纤芯料的光吸收系数为 ϵ , 光线在光锥中传播的总光路长度为 L , 光纤芯料吸收损耗 $\exp(-\epsilon L)$.

光线在锥形光纤中传播时,光路总长度为^[4]

$$L = \frac{\sin(\theta_1 - \theta)}{\sin \theta} \frac{d_{\text{小端}}}{d_{\text{大端}} - d_{\text{小端}}} \quad (16)$$

1.3 锥度比对有效透过率的影响

由锥形光纤中模式传播理论可知,光锥有效的传播模式取决于其小端的光纤特征参数 R . 因此,当光线从光锥的大端向小端传播时,大端可接受的传播模式数为

$$M_1 = \frac{R_1^2}{2} = \frac{(\pi D_{\text{大端}} NA)^2}{2\lambda^2} \quad (17)$$

由于光线在传播过程中,模式逐渐增大,有些传播模式就会泄露出光锥,因此到达光锥末端(即小端)的模式数为

$$M_2 = \frac{R_2^2}{2} = \frac{(\pi D_{\text{小端}} NA)^2}{2\lambda^2} \quad (18)$$

因此传播模式数的损耗率为

$$\frac{\Delta M}{M_1} = 1 - \left(\frac{D_{\text{小端}}}{D_{\text{大端}}}\right)^2 \quad (19)$$

从式(19)可以看出,随光锥的锥度比的增大,

传播模式数的损耗率增大.

1.4 光锥的有效透过率

光锥的有效透过率为光锥的输出光通量 ϕ 和输入光通量 ϕ_0 之比

$$T = \frac{\phi}{\phi_0} \quad (20)$$

如图 5, 光纤的入射端所能接收的从光源 C 发出的光通量(能量)为^[5]

$$\phi_0 = \int_0^{\alpha_c} 2\pi I(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \int_0^{\alpha_c} 2\pi I_0 \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \pi I_0 \sin^2 \alpha_c \quad (21)$$

对于确定的光锥, 根据图 4 的几何关系和折射定律可得参数 θ 、 β 和 θ_1 都是光纤端面入射角 α 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 α 的函数. 考虑到光线在光锥中传播时产生的衰减损耗和光锥的有效填充率因素, Lambertian 光源入射的光束能量能从光锥射出的部分应为

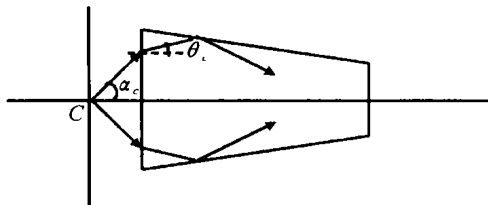


图 5 光纤与 Lambertian 光源间的耦合
Fig. 5 Coupling between optical fiber and a lambertian source

$$\phi(\alpha)_{\text{taper}} = \int_0^{\alpha_c} 2\pi I_0 \cos \alpha \sin \alpha [1 - R][1 - R'] \cdot [1 - \bar{A}]^\eta \exp[-\varepsilon L] K_c \left[1 - \frac{\Delta M}{M_1}\right] d\alpha = \phi_0 K_c \left(\frac{D_{\text{小端}}}{D_{\text{大端}}}\right)^2 \int_0^{\alpha_c} [1 - R][1 - R'] [1 - \bar{A}]^\eta \exp[-\varepsilon L] d\alpha$$

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, 上式可表示为

$$\phi(\alpha)_{\text{taper}} = \phi_0 K_c T_R T_A \left(\frac{D_{\text{小端}}}{D_{\text{大端}}}\right)^2 \quad (22)$$

将式(21)和(22)代入式(20)可得光锥的有效透过率为

$$T = \left(\frac{D_{\text{小端}}}{D_{\text{大端}}}\right)^2 T_R T_A K_c \quad (23)$$

在像增强器中, 光锥和像增强器的荧光屏紧密相接, 荧光屏上涂覆许多粉末颗粒, 倍增电子激发粉末颗粒产生光子, 荧光屏实际就是由许多点光源组成的. 光锥的有效透过率理论模型就是光锥在实际使用中有效透过率的真实反映. 建立图 6 的测试装

置, 利用毛玻璃板产生类似荧光屏的散射光, 对不同锥度比的光锥的有效透过率进行测试, 光锥的有效透过率实际测试值与计算值见表 3.

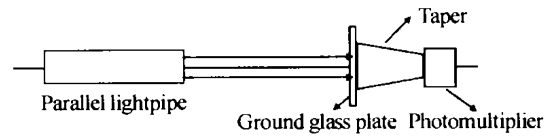


图 6 光锥透过率测试装置示意图
Fig. 6 The structure schematic of experimental equipment
表 3 光锥的有效透过率计算值与实际测试值比较

	1# (无黑吸收丝)	2# (无黑吸收丝)	3# (无黑吸收丝)
锥度比($\frac{D_{\text{小端}}}{D_{\text{大端}}}$)	1:2.8	1:2.6	1:2
芯皮比($\frac{d_{\text{芯}}}{D_{\text{光纤}}}$)	6:7	6:7	6:7
排列方式	六角排列	六角排列	六角排列
有效填充率	0.65	0.65	0.65
理论计算透过率*	7.2%	8.3%	14.1%
实际测试透过率	16.7%	20%	24.6%

* 计算时, 设光锥两端面的菲涅耳反射损耗各为 4%; 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为 90%.

实验测试结果验证了随光锥锥度比增大, 光锥的有效透过率减小. 从实际测试值和计算值比较可以看出, 实际测试值较理论计算值大, 这主要是因为理论计算时, 有效填充率计算得到的是纤芯所占光锥端面总横截面积之比. 实际测量时, 由于皮层也会传播一些入射到端面的杂散光或者从其它光纤中泄露出的杂散光, 在被测试的光锥中没有插入黑吸收丝, 这些杂散光不能被黑吸收丝吸收, 就有一部分会传播到出射端. 因此实际测得的透过关锥的光能量较理论值大, 最后得到的测试结果也大.

2 结论

1) 光锥的有效透过率取决于光锥的有效填充率 K_c 、光锥的锥度比($\frac{D_{\text{小端}}}{D_{\text{大端}}}$)、光锥前后端面菲涅耳反射损耗以及光锥芯料吸收和内反射损耗大小.

2) 光锥的有效填充率 K_c 不仅取决于单丝芯、皮的几何尺寸, 而且单丝及复丝的排列工艺也会对其有效填充率产生影响. 对于确定的单丝芯、皮的几何尺寸, 六角排列得到的光锥有效填充率大于正方排列的光锥有效填充率. 采用六角形排列工艺(无论一次复丝或者二次复丝)时, 应尽量增大六角形每边排列的光纤数 n_1 、 n_2 , 有利于增大有效填充率, 最终改善光锥透过率.

3) 对于确定的光锥材料, 在其芯料吸收和内反射损耗大小一定的条件下, 随光锥锥度比的增大, 光

锥的透过率降低. 减小光锥锥度比, 有利于改善光锥透过率.

参考文献

- 1 Xin Fuxue. Optical fiber coupling technique of ICCD. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, **30**(3): 210 ~ 213
- 2 Wang Yaoxiang, Tian Weijian, Huang Kun, *et al.* Theoretical analysis of the coupling efficient between fiber taper and CCD. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 318 ~

321

- 3 Zhao Jianlin. *Advanced optics*. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 41 ~ 42
- 4 Kapany N S. *Fiber optics, Principles and Applications*. New York, Academic Press, 1967. 21 ~ 22
- 5 An Liansheng. *Applied optics*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. 112 ~ 113

Theoretical Analysis of the Effective Transmission About Fiber Taper

Wang Yaoxiang, Tian Weijian, Zhang XinLong, Yu HuiXia, Wang YouQuan, Liu XiaoFeng
Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2004-02-17

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. So fiber optical taper plays an important role in the integrated devices. The coupling efficient between fiber optical taper and CCD exerts an influence on the signal-to-noise ratio of the integrated devices, but the effective transmission of taper has influence upon the coupling efficient. In this paper, the core-packing fraction of taper has been calculated precisely according to the virtual structure of fiber optical element, the attenuation and losses of the light energy transmitted through fiber taper have also been analyzed and deduced according to the ray mode transmission characteristics in the taper. Finally the effective transmission of taper was deduced, and an objective measurement of the effective transmission about taper was also built. Some ways improved the transmission characteristics of the fiber taper were put forward.

Keywords Fiber optical taper; The core-packing fraction; The losses of the light energy; The effective transmission



Wang Yaoxiang was born in 1972, 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, Academia Sinica in 2000, where presently he is a Ph. D. candidate. He is interested in photoelectronic material and image devices.