

## 柔软光纤传像束的传像特性

马养武

(浙江大学光科系,杭州,310027)

**摘要:** 研究了柔软光纤传像束的传像特性。界面交扰是柔软光纤传像束最重要的传像特性之一。迄今为止,有关这些方面的研究尚未完善。描述了一种采用光学视频系统定量测量柔软光纤传像束交扰率的新技术,并通过对柔软光纤传像束的静态 MTF 的测量和目视法观察,分析对比了交扰率对传像束传像特性的影响,比较了多种传像束样品的测量结果。

**关键词:** 传像特性 柔软光纤传像束 交扰率

## Image transmission performance of flexible fiber bundles

Ma Yangwu

(Dept. of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

**Abstract:** Utilizing an image fiber bundle to transmit images is a very useful technique. Here, one of the most important image transmission performances is the term crosstalk. Up to date, the study of flexible image bundles has not been quantified. We demonstrated the expression of the term crosstalk and use an optical video system to quantitatively measure the crosstalk ratio in flexible fiber bundle. Additionally, the static modulation transmission function (MTF) measurement together with visual inspection was used to analyze the effects of the term crosstalk to the image transmission performances of the image fiber bundle, such as image contrast, distinguish ability and image transmittivity. Finally, this paper introduced the experimental results of image transmission performances of the different kinds of image fiber bundles.

**Key words:** imaging performance flexible image bundles crosstalk ration

## 引 言

由于柔软光纤传像束优良的传像特性和可任意弯曲的特别性能,而使其被广泛地应用于医学、工业用显微镜等多种场合中。作为光纤显微镜的传像元件,光纤传像束可以深入到人体的各个部位,观察人体内极其微小的病灶,并使清晰的图像传出体外,医生可在荧光屏上作出诊断,进而与传统的技术相结合,实施没有外部创伤的精细外科手术。因此,光纤传像束的传像特性是表征光纤显微镜最重要的光学特性之一。

柔软光纤传像束是由六角形或正方形有序排列的双涂层的芯光纤集合束,并且各光纤之间按规范尺寸完全分隔。随着光纤显微镜应用的日益广泛<sup>[1]</sup>,要求光纤传像束在具有尽可能小的束径的同时,亦能传输高亮度和高清晰度的图像,即要求光纤传像束具有高的透射率、对比度和分辨率。柔软光纤传像束最显著的特点之一是:采用化学方法溶除去光纤的最外的涂层,而使得传像束具有可任意弯曲的柔软性。同时,涂层的溶薄,也使得芯光纤的中心距变小,而提高了传像束中芯光纤的排列密度,即增大了传像束的透射率和分辨率。然而,随着涂层的减薄,相邻芯光纤之间的光线漏泄,即“界面交扰”(或称窜像)变得严重,这种交扰将影响光纤

传像束的对比度和分辨率。因此,考虑到光纤的几何尺寸、材料和制造工艺等综合因素,评价光纤传像束传像特性的折衷考虑标准是:对比度、分辨率相对于透射率的相对重要性。我们报道了关于柔软光纤传像束的传像特性的研究结果。提出光纤传像束交扰率的实验测量式和测量方法,并由测量结果分析交扰率对透射率、对比度和分辨率的影响,以及交扰率与传像束的诸多的结构和材料等参量之间的关系。

### 1 实验测量式与测量方法

柔软光纤传像束是由六角形或正方形有序紧密排列的双涂层的芯光纤集合束。每毫米束径传像束中的光纤数超过 10000 根,单根芯光纤的直径在 4μm ~ 8μm 之间。每根单光纤都由一层芯玻璃和二层涂层所构成。通常光纤传像束的柔软部分的长度为 0.7m 到 1.5m,两端的耦合连接头的长度为 2mm 到 6mm。传像束两端头的芯光纤按序规划排列是至关重要的,两端头中的光纤必须是同配位排列,以确保光纤传像束的正确传像。图 1a 和 b 分别是按六角形和正方形序排列的光纤集合。图中所示的 *a* 是芯光纤的半径, *b* 是相邻两光纤的中心距, *t* 是涂层厚度。基于 Nyquist 模型理论<sup>[2]</sup>,传像光束的分辨率由相邻光纤的中心距 *b* 所决定:

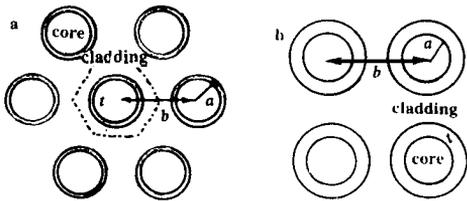


Fig. 1 Order-packing structure of an image fiber bundle  
a—hexagonal structure b—rectangular structure

式中,  $R_{rect}$  和  $R_{hex}$  分别是正方形和六角形序排列的光纤传像束的分辨率。光纤传像束的透射率和对比度是依赖于光纤的排列密度、光纤材料和制造工艺等因素的影响。光纤的排列密度是受光线透射面积与整个传像束的面积之比所限定,可表示为:

$$\begin{aligned} R_{rect} &= 1 / (2b) \\ R_{hex} &= 1 / (3b) \end{aligned} \tag{1}$$

示为:

$$\begin{cases} P_{rect} = (a/b)^2 \\ P_{hex} = 2(a/b)^2 / \sqrt{3} \end{cases} \tag{2}$$

式中,  $P_{rect}$  和  $P_{hex}$  分别是正方形和六角形序排列的传像束的光纤极限排列密度,比较 (1) 和 (2) 式,可见:

$$\begin{cases} (R_{hex} - R_{rect}) / R_{rect} = 15.5\% \\ (P_{hex} - P_{rect}) / P_{rect} = 15.5\% \end{cases} \tag{3}$$

(3) 式表明,六角形序排列的光纤传像束的极限分辨率和光纤排列密度均要高出正方形的序排列。

为了提高光纤传像束的分辨率、透射率和柔软性,除采用六角形的序排列外,还采用化学方法溶薄芯光纤的最外涂层。随着涂层的减薄,相邻芯光纤间的光线漏泄,即“界面交扰”变得严重,这种“界面交扰”现象,可以通过耦入亮锐的图像来照明单根光纤的方法加以观察。图 2 表示了传像束的“界面交扰”现象。在图 2a 中的光纤束的入射端面中央的芯光纤被激发,而在图 2b 所示的光纤束的出射端面上,被激芯光纤的周围相邻光纤产生漏泄的散射光。光纤传像束的交扰率定义为:从相邻光纤输出的光强与从被激光纤和相邻光纤两者输出的总光强之比。交扰率 *T* 的实验测量式为<sup>[3]</sup>:

$$T = P_i / (P_i + P_0) \tag{4}$$

式中,  $P_0$  和  $P_i$  分别是从小被激光纤出射的光强和从相邻芯光纤出射的光强;  $P_i$  是从相邻芯

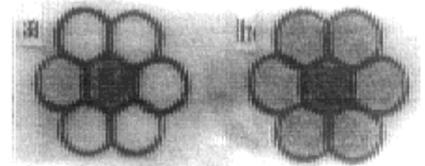


Fig. 2 Crosstalk phenomenon  
a—input fiber face the center fiber is illuminated b—output fiber face light is leaked into adjacent fibers

光纤和涂层中出射的光强，是测光元件的探测时间参量。

根据(4)式测量光纤传像束交扰率的方法和装置基本上相同于静态调制传递函数(MTF)的测量<sup>[4]</sup>。严格地说,光纤传像束虽是一个序排列的线性系统,但却不是一个等晕系统,即亦不完全满足空间不变性要求,要十分精确以 MTF 反映其所有的特性,存在一些困难。然而,在一定的近似条件下,即把一个单光纤列近似为等晕路径,特别是静态测量时,MTF 的方法仍可使我们获得关于交扰率的全面和精确的测量结果。

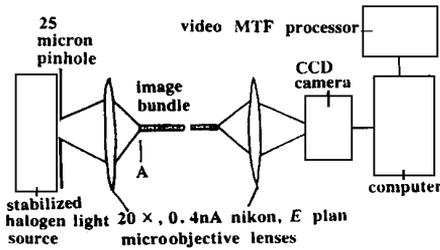


Fig. 3 Crosstalk measurement set up

波测试靶上。调制光的强度由 CCD 相机探测,并经计算机和 MTF 信息处理器处理,可获得各个测试样品的交扰率。

## 2 测量结果与讨论

对光纤传像束交扰率的测量,即 MTF 的测量,实质上是通过测量系统的线性扩展函数(LSF)的傅里叶变换来获得的。实验测量了 5 种具有不同的芯玻璃、涂层材料和结构尺寸的光纤传像束的交扰率。在表 1 中列出了测量结果。其中,样品“ A ”,“ B ”和“ C ”,具有不同的芯玻璃和涂层材料折射率;样品“ C ”“ C<sub>2</sub> ”和“ D ”具有相同的芯玻璃和涂层材料折射率。这 5 种光纤传像束,均具有六角形紧密序排列结构。

测量结果表明:

1. 传像束的交扰率随芯玻璃和涂层材料的不同而各异。样品 A, B, C 具有相同的结构尺寸,但其芯玻璃和涂层材料不同,而分别具有 A - 2.7%, B - 4% 和 C - 7% 的交扰率。

A—R = 2.7%      B—R = 4%



C—R = 7%      C<sub>2</sub>—R = 2.5%



Fig. 4 Crosstalk of A, B, C, C<sub>2</sub>

Table 1 The test samples of flexible image bundles

flexible image bundles	A	B	C	C <sub>2</sub>	D
bundle diameter(mm)	1	1	1	2	1
fiber center to center distance	8.7	8.6	8.6	16.4	8.6
crosstalk ratios( %)	2.7	4	7	2.5	15

2. 随着相邻光纤间的中心距的增大,传像束的交扰率减小。样品 C 和 C<sub>2</sub> 具有相同的芯光纤尺寸、芯玻璃和涂层材料,但样品 C<sub>2</sub> 中的相邻光纤中心距远大于样品 C,实验测得样品 C<sub>2</sub> 的交扰率远小于样品 C。图 4 表示所观察到的具有不同交扰率的样品 A, B, C 和 C<sub>2</sub> 传输的像点。虽然说,增大中心距可使交扰率下降,但同时也使分辨率和对比度下降,即 MTF 值也随之下降。图 5

表示,虽然样品 C<sub>2</sub> 具有小的交扰率,但由于其中心距的增大,而使 MTF 值,即分辨率和对比度也小于样品 C。

3. 实验比较了光纤传像束的交扰率与其所对应的 MTF 测量值和直接目视观察图像。图

4 比较了在四个具有不同交扰率的传像束的出射端面上的目视观察到的传像情况,显然交扰率和中心距较小的传像束具有最佳的传像质量。根据光学像质的评定准则,50%的 MTF 值通常被用作测量光学系统空间分辨率的中等尺度。图 6 比较了样品 A 和 D 的空间分辨率(50%MTF 值时的空间分辨率)和对比度(对应空间频率时的 MTF 值),交扰率是 2.7% 的样品 A 的可分辨率为 106(LP/mm) (每毫米线对),对比度为 53.2%;而交扰率是 15% 的样品 D 的可分辨率仅为 73(LP/mm),对比度为 37.2%(106LP/mm 空间频率时的 MTF 值)。

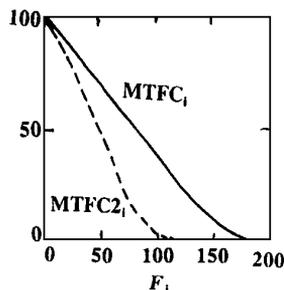
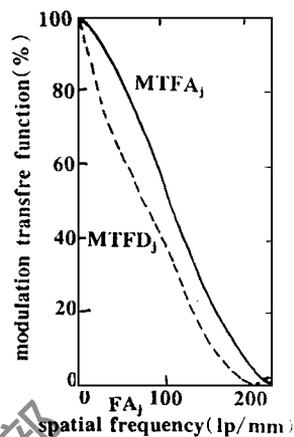
Fig. 5 Static MTF of C and C<sub>2</sub>

Fig. 6 Static MTF of A, D

我们采用按 106(LP/mm) 的空间分辨率水平,比较了所测的 A, B, C, C<sub>2</sub>, D 这 5 种具有不同交扰率的传像束样品的空间分辨率和对比度,除上述的样品 A 和 D 外,交扰率是 4% 的样品 B 的可分辨率为 98(LP/mm),对比度为 46.4%;交扰率是 7% 的样品 C 的可分辨率为 87(LP/mm),对比度为 32.8%;交扰率是 2.5% 的样品 C<sub>2</sub> 的可分辨率为 50(LP/mm),对比度为 4%。实验测量结果表明:交扰率是表征光纤传像束的传像特性的主要参量之一,在保持尽可能小的相邻光纤中心距的情况下,具有小的交扰率的光纤传像束对应着高的空间分辨率和对比度,因而也具备有优良的传像性能。

#### 参 考 文 献

- 1 Komiyama A, Hashimoto M. Opt Commun, 1994; 107: 49 ~ 53
- 2 Zou. Optik, 1993; (1): 43 ~ 47
- 3 Komiyama A, Hashimoto M. Electron Lett, 1989; 25(16): 1101 ~ 1103
- 4 Remijan. Appl Opt, 1972; 11(12): 2783 ~ 2789

作者简介:马养武,男,1946年7月出生。教授。现从事激光技术、光电子技术和激光器件光电子器件的研究工作。

收稿日期:1997-10-27 收到修改稿日期:1998-04-16

#### 简 讯 ·

### 控制系统补偿非线性晶体中的相位失配

据日本大阪大学和日本 Tsukuba R & D 实验室研究人员称,用温度分布补偿系统可减轻非线性光学晶体中的热致相位失配。该系统表明 CsLiB<sub>6</sub>O<sub>5</sub> (CLBO) 晶体能从固体激光发射重复频率 100Hz 的 532nm 脉冲波长产生 266nm 紫外输出。该补偿系统包括一个 PID 调节器,可控制加热器。当加热到 150 时便覆盖 CLBO 晶体,一个直接连接到晶体表面激光输出中心的冷气喷咀。据说,加热器可提高晶体长期稳定性,从室温到 200 都可保证恒定的 UV 输出。冷却气流还有一个附带好处,就是可使穿过激光束的侧面温度相同,在一根 10mm 的晶体中输入功率 20.3W,可获得 10.6W 的输出功率,高于没有冷却气流时该晶体达到的最大功率的二倍。

於祖兰 曹三松 供稿