

文章编号: 1002-2082(2006)01-0062-04

改善光纤倒像器的对比度传递特性

潘京生

(北方夜视技术股份有限公司 南京分公司, 江苏 南京 210006)

摘要: 光纤倒像器是一种特殊类型的光纤板, 可将传递图像直接倒转 180° 并应用于像增强器。由于光纤倒像器的特殊结构, 造成光纤随着距扭转轴心的距离增加, 数值孔径和光通量逐渐下降。相对于光纤板, 光纤倒像器在透过率 and 对比度传递特性上均有一定程度的下降。通过改进玻璃系统, 在一定程度上降低芯皮玻璃间离子扩散和相互渗透的程度, 可提高光纤倒像器的实际数值孔径; 通过调节 EMA 吸收量, 既能满足像增强器对光纤倒像器荧光屏透过率的要求, 又能保证最大程度地吸收光纤中逸出的杂散光, 提高对比度。选择合理的芯皮比, 不仅可弥补因扭转拉伸造成的皮层厚度减薄, 还可进一步增加皮层厚度, 抑制光从光纤中逸出。通过以上改进, 可改善光纤倒像器的对比度传递特性。

关键词: 光纤倒像器; 数值孔径; 芯皮比; 对比度传递函数

中图分类号: TN253

文献标识码: A

Improvement of image inverters contrast transfer performance

PAN Jing-sheng

(Nanjing Branch, North Night Vision Tech. Ltd. Company, Nanjing 210006, China)

Abstract: Image inverter is a special type of fiber-optic plate, which can directly invert an image by 180° to an image intensifier. The device is making the night vision goggle more compact by integrating the image transfer and image invert function into a phosphor substrate. But due to the image inverter's special structure, the numerical aperture and luminous flux decrease gradually with the increase of the radial distance from torsion axle centre. Compared with the fiber-optic plate, the image inverter has lower contrast transfer function and lower transmissivity. By improving the glass system to reduce the ion diffusion and inter-permeation which may occur to the core-cladding interface, the actual numerical aperture of the fiber image inverters can be improved. By means of adjusting EMA absorption, not only the needs of image intensifiers can be reached for the transmissivity of fiber image inverter screens, but also the stray light escaping from the optical fiber can be absorbed to the full extent to improve the contrast. With the selection for a reasonable core-cladding ratio, the cladding thickness reduction caused by torsion stretch can be remedied and also the cladding thickness can be increased further more to restrain the light to escape from fibers. The result shows that the innovation mentioned above can improve the contrast transfer characteristics of fiber image inverters.

Key words: fiber image inverter; numerical aperture; core-cladding ratio; contrast transfer function

收稿日期: 2005-03-20; 修回日期: 2005-07-12

作者简介: 潘京生 (1965—), 男, 四川人, 北方夜视技术股份有限公司南京分公司高级工程师, 主要从事微光夜视元器件研制工作。

引言

熔合光纤元件是将相干排列的光纤经热压熔合而成的刚性光纤元件,厚度不大于 25 mm 的熔合光纤元件通常被称为光纤板或光纤面板。熔合光纤元件的最基本传输单元就是每根光纤,光纤的数值孔径决定光通量的大小,光通量在数值上等于该光纤数值孔径的平方。影响熔合光纤元件透过率和对比度的因素主要有数值孔径、填充系数和 EMA (extramural-absorption)。其中 EMA 就是在光纤间的隙缝处填充的光吸收玻璃纤维丝,可吸收非相干传输的杂散光。由于在光纤制造过程中芯皮玻璃间存在的离子扩散和相互渗透以及芯皮界面上存在的非理想状态,如反射面与光纤子午线不平行和界面沟槽等玻璃缺陷,因此光纤的实际数值孔径都或多或少地低于其理论数值孔径,以接近全反射临界角入射的光基本上都被泄漏了,而且“串话”将降低熔合光纤元件图像传递的对比度。通常利用 EMA 吸收“串话”光来提高对比度。但 EMA 中的着色离子在光纤加工过程中存在着扩散渗透,过多的 EMA 不仅会增加光吸收,而且还将在一定程度上降低数值孔径。

像增强器采用光纤板作为荧光屏基板,要求光纤板有尽可能大的数值孔径和良好的图像对比度传递特性。光纤倒像器属于一种特殊类型的光纤板,它集荧光屏基板、图像传递及倒转于一体,可缩短像增强器后继光路的距离,使微光夜视仪结构更加紧凑。

刀口响应用于评价光纤板的对比度。其测试方法通常是用 $5\ \mu\text{m}$ 宽的隙缝扫描通过光纤板传递的标准测量刀口遮蔽光形成阴影区的边缘部分,同时用 1.25 数值孔径的集光器来收集测量垂直于刀口方向的“串话”光强度分布。刀口响应测试还可以用于推导调制传递函数(MTF)。这里的 MTF 是以不同密度的明暗线条图案代表在亮度上呈方形波变化的不同空间频率的信号,调制度就是明暗线条图案的亮差对比度,空间频率就是线条密度。在不同空间频率状态下的调制度传递特性就是指 MTF。这里的 MTF 也就是对比度传递函数。MTF 通常用于评价低数值孔径的传递系统的图像传递质量。

像增强器的 MTF 决定于阴极窗口、阴极与微通道板间的近贴聚焦系统、微通道板、微通道板与荧光屏间的近贴聚焦系统及荧光屏等各分系统的 MTF 的积,因此要求光纤倒像器具有良好的对比度传递特性。

1 光纤倒像器的光纤结构与特性

光纤倒像器是将光纤板毛坯热扭转 180° 而成,如图 1 所示。扭转后的光纤结构发生了不同程度的变化。从理论上讲,仅轴心处的光纤没有被扭转拉伸,其余光纤均被扭转拉伸成以不同螺旋角盘绕 180° 的双锥光纤(Mae West double taper)。距轴心越远,螺旋升角越小;弯曲度越大,盘绕距离越长;拉伸程度越大,形成的锥度也越大。

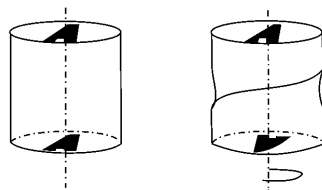


图 1 光纤倒像器的热扭转加工

Fig. 1 Twist process of fiber image inverter

锥状光纤的光传输与直光纤有所不同,锥状光纤的数值孔径不仅决定于芯皮玻璃的折射率,还与其锥度和光的入射方向有关。如图 2 所示,当光线从大直径端向小直径端传输时,由于锥度的关系,反射面与子午线存在一个角度,光线发生全反射后与子午线的角度随全反射发生次数增加而递增,其中一部份光随着角度的增加,其入射角小于光纤全反射临界角的部分将从光纤中泄漏出去。虽然最终光的最大掠出角还是等于光纤的数值孔径角,但光

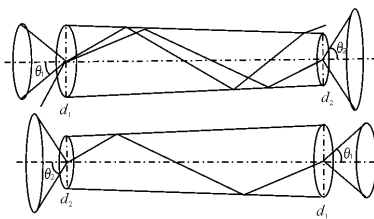


图 2 锥状光纤的光传输

Fig. 2 Luminous transmission of tapered fiber

纤的光通量减少了。当光从锥状光纤的小直径端向大直径端传输时,情况正好相反,即光线发生全反射后与子午线的角度随全反射发生次数增加而递减,最终光出射时的掠出角减小。因此,锥状光纤光传输与锥度的关系如下:

$$d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_2$$

如图 3 所示,由于双锥光纤的 2 个锥体互相对称,因此光在双锥光纤的数值孔径 $\sin \theta_1$ 为

$$\sin \theta_1 = \sin \theta \times \frac{d_2}{d_1}$$

式中, $\sin\theta$ 为未被拉伸光纤,即直光纤的数值孔径, $\sin\theta = \sqrt{N_1^2 - N_2^2}$; d_1 为双锥光纤未被拉伸处的最大纤维直径; d_2 为双锥光纤细颈部分的最小纤维直径。

以上分析可见,光在双锥光纤中传输时,大于双锥光纤数值孔径角 θ_1 入射的光将从光纤中泄漏出去,光的最大掠出角即为双锥光纤的数值孔径角 θ_1 。与直光纤相比,双锥光纤在光传输上表现为数值孔径、光通量和光掠出角减小,而数值孔径、光通量和光掠出角的降低程度与双锥光纤的锥度成正比。



图3 双锥光纤的光传输

Fig. 3 Luminous transmission of Mae West double-tapered fiber

在光纤倒像器中,随着光纤轴心径向距离的增加,扭转程度加重,形成的双锥光纤锥度也逐渐增大,其数值孔径逐渐降低,光纤的光通量和光掠出角随之减少,光纤间的“串话”程度也随之加重,因此光纤倒像器的数值孔径、光通量和对对比度沿轴心径向逐渐降低。

光纤倒像器毛坏在加热扭转时的受热区很短,受热区外的温度可陡降至玻璃的软化温度以下。光纤扭转拉伸形成的双锥光纤的锥度主要是在受热区外的温度渐变区形成的,受热区内的光纤近似于等温拉伸,形成的锥度很小。因此,双锥光纤的锥度与其扭转时受热区温度场的分布状态有关。对受热区的等温区与渐变区进行合理的长度分配设计,可以使光纤扭转拉伸后形成的双锥光纤锥度小,光纤的数值孔径降低程度也相对较小。

热扭转过程中普通光纤板过多的EMA引发的着色离子扩散,不仅造成光纤数值孔径降低,光泄漏增加,还会扩散渗透进入纤芯,严重增加光吸收,并且扭转时的拉伸使皮层厚度减薄,特别是边缘区域皮层减薄程度更大,加重了光泄漏。另外,光纤扭转拉伸使光纤盘绕弯曲,也加重了全反射损失的程度。

2 改善光纤倒像器对比度传递特性

光纤熔合元件的透过率实际上由其传递输出的相干传输光和非相干传输光 2 部份组成,EMA

用于部分吸收传递过程中的非相干传输。

由于光纤倒像器特殊的纤维结构,光纤的数值孔径和光通量随光纤径向距离增加而逐渐下降,因此非相干传输的杂散光增加。因为数值孔径的降低,光纤倒像器的透过率和对对比度均有不同程度的下降,并且透过率与对比度呈不均匀分布,边缘区域的透过率和对对比度低于中心区域。

通过提高光纤倒像器的实际数值孔径,选择合适的EMA,以及调整芯皮比,适当增加皮层厚度,可以在一定程度上改善光纤倒像器的对比度传递特性。

同时我们也要认识到,扭转设备温度场中等温区与渐变区合理地分配长度设计,可在一定程度上使光纤扭转拉伸后形成的双锥光纤锥度变小,提高扭转后光纤的数值孔径。

我们拟从改进玻璃系统、选择适量的EMA和合适的芯皮比 3 方面着手来改善光纤倒像器的对比度传递特性,在扭转设备上暂不做任何改进,只与其它厂家生产的样品和引用标准作对比。利用测试像增强器 MTF 的方法以及采用 OPTIKOS ISITE和Photometric Camera-DT2851 测试仪器来测试光纤倒像器中心区域的 MTF。

2.1 改进玻璃系统

由于光纤玻璃系统中高折射率的芯玻璃与低折射率的皮玻璃在组分上的固有浓度差,使其在热加工过程中不可避免地存在着不同程度的离子扩散及相互渗透,并且由于光纤倒像器还增加了一次热扭转加工过程,因此其芯皮上 2 种组份的离子扩散及相互渗透程度较光纤板更为严重。

属于硼硅酸盐系统的皮玻璃通常都含有一定量的碱金属离子组分,而低原子序数的碱金属离子最活泼,最易发生离子置换。在光纤热加工过程中,皮玻璃的碱金属离子与芯玻璃成份发生离子置换,使光纤上皮玻璃折射率增加,芯玻璃的折射率降低,实际数值孔径下降。改进的玻璃系统在一定程度上限制了低原子序数碱金属氧化物的使用量,还降低了皮玻璃的折射率,同时对芯玻璃折射率的要求也相应降低。改进的玻璃系统可在一定程度上降低芯皮组份间的离子扩散和相互渗透程度,提高光纤倒像器的实际数值孔径。

2.2 适量的EMA

光纤倒像器与光纤板相比,增加了一次热扭转加工,其EMA扩散渗透程度较光纤板严重得多。EMA扩散不仅造成数值孔径的进一步降低,而且

进入纤芯还会严重增加光吸收。在扭转过程中,边缘区域光纤受热和受挤压程度较重,边缘区域的EMA扩散渗透较中心区域也要严重得多,使本来就比中心区域低的边缘区域光纤的数值孔径和光通量更低。

选取适量的EMA可避免中心区域与边缘区域间透过率相差太大,做到既可满足标准要求,又能最大限度地吸收杂散光,改善光纤倒像器的对比度传递特性。

EMA通常采用填隙法填插在光纤间的隙缝里,通过增减EMA的填充数量来控制EMA的吸收量。

2.3 合适的芯皮比

光波在光纤的芯皮界面发生全反射时,光波会渗入纤皮一定深度后再反射回纤芯,如果皮层厚度小于光波的渗透深度,就有部份光穿透光纤皮层而泄漏。光波的渗入深度 y 决定于入射光波长 λ 、入射角 θ 以及光纤芯皮折射率 n_1 和 n_2 ,即

$$E = E_0 \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} y \frac{n_1}{n_2} \sin\theta)$$

由于光纤芯皮玻璃2种组份间存在离子扩散和相互渗透,使阶跃光纤的芯皮界面的实际折射率分布呈一定程度的渐变式分布,因此设计的光纤皮层厚度都要远远大于光波的渗入深度。虽然增加皮层厚度可以提高光纤的实际数值孔径,抑制光从光纤中逸出,但增加皮层厚度也增加了直接进入光纤皮层的杂散光,这将在一定程度上会降低对比度和透过率。

通常光纤板的皮层厚度设计在 $0.25 \sim 0.30 \mu\text{m}$ 之间,则 $6 \mu\text{m}$ 纤维直径的光纤板的芯皮比一般在 $80:20 \sim 85:15$ 内。根据扭转后 $\Phi 18 \text{ mm}$ 光纤倒像器有效区域边缘处的双锥光纤理论数值孔径不小于 0.66 ,最小处直径约 $4 \mu\text{m}$ 计算(仅是为了弥补因扭转拉伸造成的光纤皮层厚度减薄)光纤倒像器的芯皮比应在 $71.5:28.5 \sim 76:24$ 之间。由于光纤倒像器与光纤板相比增加了一次热加工过程,使其扩散渗透程度较光纤板有所增加,因此皮层厚度还须进一步增加。

在改进的玻璃系统和确定适量EMA的基础上,我们选择的芯皮比在 $68:32 \sim 74:26$ 范围内。采用芯皮比分别为 $68:32$ 、 $70:30$ 、 $72:28$ 和 $74:26$ 的I、II、III、IV 4种不同芯皮比组和,并进行对比度传递函数的测试,其结果如图4和表1所示。图4和表1中使用其它厂家生产的光纤倒像器样品V(芯皮比未知)以及俄罗斯生产的光纤倒像器作为标准来进行对比。

从图4可以看出,I、II、III、IV 4个样品随着皮层厚度的增加,对比度传递函数随之逐步改善,特别是对 25 lp/mm 以上部分的对比度传递函数改善效果尤为明显。

表1 不同样品比较结果

空间分辨率/ (lp/mm)	对比度传递函数/%					标准要求
	I	II	III	IV	V	
5	99.9	99.8	99.5	99.5	99.1	>98
12.5	99.8	98.9	97.2	97.3	95.2	>96
25	92.8	89.7	84.2	83.0	79.3	>85

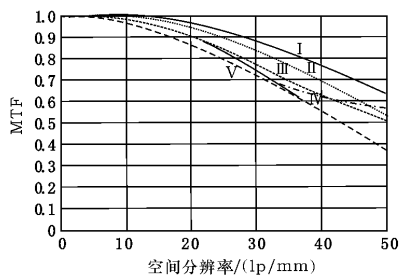


图4 光纤倒像器的对比度传递函数曲线对比

Fig. 4 Contrast-transfer-function curves of different samples

从I、II、III、IV这4个样品与V样品相比结果来看,改进玻璃系统后的光纤倒像器在 25 lp/mm 以下部分其对比度传递函数有明显优势。如果排除皮层厚度的影响因素,应该说采用改进的玻璃系统,光纤倒像器的对比度传递特性有明显改善。

但是,对比度传递函数曲线在 35 lp/mm 以上部分下降斜率明显趋缓,这个现象值得作进一步研究。

参考俄罗斯光纤倒像器标准,要求光纤倒像器透过率在 550 nm 漫射光下, $\Phi 15 \text{ mm}$ 区域内不小于 34% , $\Phi 5 \text{ mm}$ 区域内不小于 45% 。我们对样品I、II和III的透过率进行了测试,3个样品的透过率均可满足标准要求。

3 结论

光纤倒像器是一种特殊类型的光纤板,由于它具有特殊的光纤结构,其透过率和对比度传递特性较光纤板有不同程度的降低。通过改进玻璃系统,适量调节EMA,增加皮层厚度,可在一定程度上改善光纤倒像器的对比度传递特性。

参考文献:

- [1] 刘德森,殷宗敏. 纤维光学[M]. 北京:科学出版社, 1987.