

匹配型熊猫光纤的相衬法定轴技术的仿真分析

胡永明 陈 哲 廖延彪

(清华大学电子工程系 北京 100084)

常胜利 谭吉春 孟 洲

(国防科学技术大学应用物理系 长沙 410073)

提要 从匹配型熊猫光纤的结构及相衬显微技术物理图像出发,建立起仿真数学模型,计算机仿真了相衬法定轴技术。仿真数学模型考虑了匹配型熊猫光纤的应力折射率分布、相衬成像原理、光纤在物镜观察面上的相衬成像偏差等物理图像。计算机仿真分析得到了相衬法确定匹配型保偏光纤双折射光轴的光强特征图像。仿真结果与实验得到的光强图像相符合。此方法已成功地应用于定轴实验,定轴分辨率小于 2° 。

关键词 相衬法,熊猫光纤,定轴,仿真,特征图像

1 引 言

保偏光纤由于其偏振保持特性而广泛应用于相干光通信、光纤传感等领域,特别是在光纤陀螺等高精度的相干检测光纤传感器中,保偏光纤已成为基本器件。保偏光纤的结构类型很多,目前,常用的为熊猫光纤,其结构横截面如图 1 所示,●为高折射率的纤芯;两个熊猫眼是应力区,它在纤芯处产生较大应力双折射,应力区内折射率较低;外层为包层。

保偏光纤在使用中,都必须精确确定保偏光纤纤芯几微米的区域内双折射光轴的方向。对一般的高双折射保偏光纤,猫眼应力区内部折射率与包层折射率差值较大, $\Delta n \approx 0.006$, 形成非匹配折射率保偏光纤,可以应用普通显微镜对保偏光纤侧视成像进行定轴^[1],如图 1 所示。但是在制作保偏光纤耦合器时,为减小器件的损耗,需要应力区与包层折射率几乎一致(两者差值 $\Delta n < 0.001$)的匹配型保偏光纤^[2]。此时两应力区与包层在普通显微镜中的侧视成像模糊,定轴非常困难。由于保偏光纤耦合器是光纤相干系统中极为重要的器件之一,所以对匹配型保偏光纤进行精确定轴意义重大。为此,我们已发展了相衬法定轴技术^[3],在一定程度上解决了匹配型熊猫保偏光纤的定轴问题。

相衬法定轴是建立在匹配型保偏光纤侧视相衬图像特征基础上的,由于受到诸多因素的

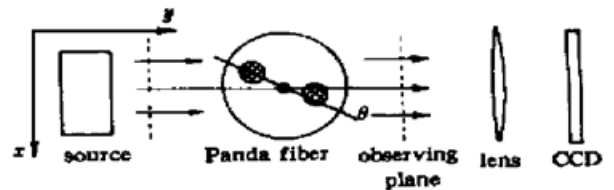


图 1 熊猫光纤结构的横截面及侧视成像示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the side-viewing image system and the cross-section of the panda fiber

影响,从实验上确定这些特征与光纤内部结构的对应关系是非常困难的。本文针对熊猫光纤,从相衬法的物理图像出发,建立起相应的数学模型,通过计算机仿真解决了一些实验上难以解决的问题,为相衬法定轴技术提供了一种新的分析手段,并为相衬图像的计算机处理奠定了基础。

2 相衬法定轴数学仿真模型的建立

进行相衬法定轴的计算机仿真基础是数学仿真模型,在我们的工作中,以相衬法定轴的物理实验为基础,主要考虑了匹配型熊猫光纤的应力折射率分布模型、匹配型保偏光纤的相衬成像原理、光纤在物镜观察面上的相衬成像偏差模型等。

2.1 匹配型熊猫光纤的应力折射率分布模型

根据实验数据分析^[3],给出匹配型熊猫光纤的横截面折射率分布数学模型为

$$n = \begin{cases} n_0 + n_1 & x^2 + y^2 \leq a^2 \\ n_0 + n_2 & (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \leq b^2 \text{ 或 } (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \leq b^2 \\ n_0 + n_3 \cdot b \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}} \right]; & (1) \\ b^2 \leq (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 & x^2 + y^2 \leq c^2 \\ \text{或 } b^2 \leq (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 & x^2 + y^2 \leq c \end{cases}$$

其中, a 为纤芯半径, b 为应力区半径, c 为光纤包层半径; $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 为两应力区中心坐标, n_0 为石英折射率; n_1, n_2 分别为纤芯、应力区折射率与石英折射率之差; n_3 是由应力产生的包层折射率变化,对于非匹配型保偏光纤, $n_2 - n_3$ 差别较大,含 n_3 的项可以不考虑,但对于匹配型保偏光纤, $n_2 - n_3$ 差别很小,必须加以考虑。

2.2 匹配型保偏光纤的相衬成像原理

用相衬法使匹配型保偏光纤成像时,在相衬显微镜中,光纤是一个透明的物体,即“相物体”,因光纤浸在匹配油中,可减小入射光线在光纤包层与空气界面上的折射;同时,由于应力区与包层的折射率差极小,这类光纤的应力区与包层之间没有反衬,所以可认为匹配型保偏光纤不改变侧视平行光波的方向,只改变位相。被侧视成像的匹配型保偏光纤的光学厚度 $L(x)$ 通常是逐点变化的,当认为物体的实际几何厚度 l 不变时,光学厚度 $L(x)$ 的改变只是各点折射率 $n(x, y)$ 的变化引起的,沿光线方向的光学厚度则表示为

$$L(x) = \int_l n(x, y) dy \quad (2)$$

其中 x, y 为光纤横截面内的坐标。当光波通过光纤这个“相物体”时,此光学厚度 $L(x)$ 使该光波产生 $\Phi(x)$ 的位相变化。相衬法中,像平面上的光强正比于此相位变化^[4],即有

$$I(x) \propto \Phi(x) \propto \int_l n(x, y) \cdot dy \quad (3)$$

对于正相衬,相物体的光学厚度较大的区域,在视场中看起来较暗。

2.3 光纤在物镜观察面上的相衬成像偏差模型

当侧向通过熊猫光纤的光线聚在显微物镜的观察面上时(见图1),成像于 CCD 上的图像受限于显微物镜的景深。如果景深大于光纤包层直径,则相衬光强的分布应是以纤芯为中心对称分布;但是,一般情况下,显微物镜的景深都小于光纤包层直径,这导致产生光纤在物镜观察

面上成像偏差, 相衬成像偏差对光纤相衬光强的影响是, 使聚于观察面近物镜方的点像对相衬光强贡献较大, 聚于观察面远物镜方的点像对相衬光强的贡献较小, 由此可设相衬光强的成像偏差函数 R 为

$$R(y) = \frac{1}{(y_{\max} - y_{\min})} \cdot [R_2 \cdot (y - y_{\min}) + R_1 \cdot (y_{\max} - y)] \quad (4)$$

其中, y_{\min}, y_{\max} 分别为光纤像的最小、最大坐标, R_1, R_2 为与光纤种类、观察面位置、显微物镜景深等有关的常数。

当考虑到相衬成像偏差后, 相衬光强为

$$I(x) \propto \int R(y) \cdot n(x, y) \cdot dy \quad (5)$$

3 仿真光强特征图像的分析

根据实际的实验数据, 取 $n_1 = 0.01, n_2 = 0.001, n_3 = 0.001; a = 4 \mu\text{m}, b = 10 \mu\text{m}$, 两应力区中心间距 $d = 40 \mu\text{m}$, 光纤包层直径 $D = 125 \mu\text{m}; c = D/2, R_1 = 0.5, R_2 = 1.5$ 。

设双折射光轴转角 θ 为两应力区中心连线与 y 轴的夹角, 见图 1。计算机仿真过程计算了不同 θ 角时沿 x 方向的相衬光强分布形貌。

将图 2 与图 3 比较, 图 4 与图 5 比较, 图 6 与图 7 比较可知, 计算机仿真与实验结果两者在纤芯及应力区附近的光强分布形貌特征非常相似, 吻合较好。对比仿真与实验两条曲线, 可以发现相衬光强的形貌特征: (1) 两者都在纤芯中部有

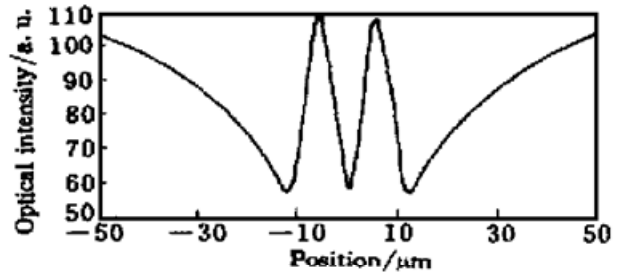


图 2 $\theta = 0^\circ$ 时, 沿 x 方向的相衬光强分布形貌的仿真曲线。横轴是 x 方向, 以纤芯中心为零点, 单位是 μm

Fig. 2 At $\theta = 0^\circ$, computer simulation distribution of phase contrast intensity of PMF. The zero point is the core center

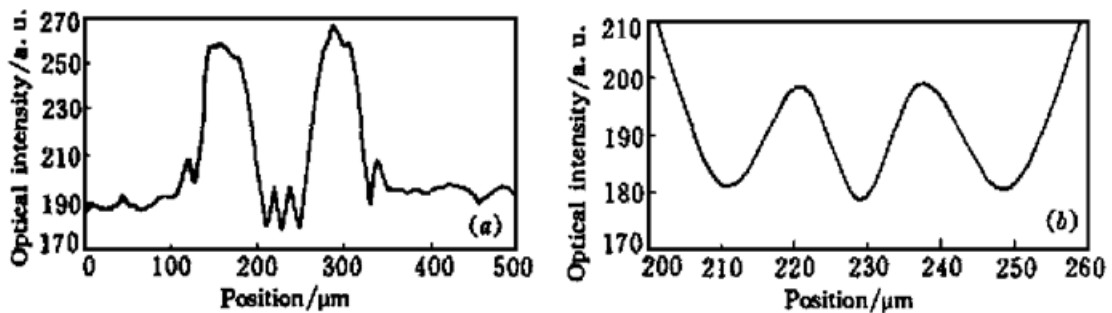


图 3 $\theta = 0^\circ$ 时, 用线阵 CCD 得到的沿 x 方向的相衬光强分布形貌的实验曲线

(a) CCD 的整个信号记录; (b) 光纤中部范围内的光强分布。横轴是 CCD 的 x 方向, 单位约 $2 \mu\text{m}$

Fig. 3 At $\theta = 0^\circ$, experimental distribution of phase contrast intensity of PMF

(a) the full data recorded through CCD; (b) the middle part of full data

一个低谷, 以纤芯中心对称的两旁各有一个尖峰及另两个低谷; (2) 在 $\theta = 0^\circ$ 时, 两尖峰的高度一致, 两低谷的深度也一致, 但当光纤绕纤芯转过 θ 角度后, 纤芯两侧的峰高或谷深将不对称地变化, 这个不对称不仅反映了转角的方向, 而且两峰高之差及两谷深之差也反映了转角的

大小; (3) 在光纤绕纤芯转过 θ 角度时, 在某一固定光强值上, 两峰的各自宽度将发生变化。

原则上, 以上由计算机仿真及实际实验得到的三个形貌特征都可作为定轴的依据, 但进一步的仿真分析表明, 由于在不同实验条件下, 上述各特征的显著程度不完全一样, 所以有必要根据实验条件进行取舍。

例如, 实验中发现两峰值的宽度不仅与转角有关, 还与光纤纤芯中心离显微物镜观察面的距离有关, 由于定轴实验中有时需要垂直于光纤横向调校光纤, 从而使纤芯中心离开物镜观察面, 这就使得依据峰值宽度特征定轴有时会有较大误差。上述特征(1)可以应用于两根保偏光纤的对接中, 它可以与图像处理、图像相关等技术结合起来, 得到很好的对接结果, 但是, 对于需要单根保偏光纤定轴的场所, 其特征较不明显, 使用起来不方便。

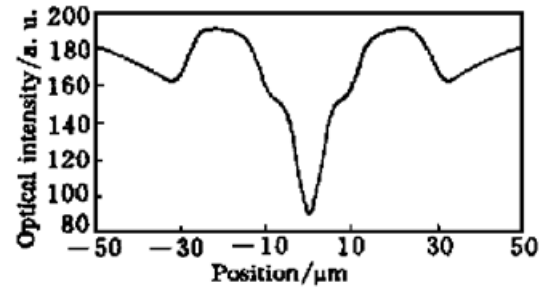


图4 $\theta = 90^\circ$ 时, 沿 x 方向的相衬光强分布形貌的仿真曲线。横轴是 x 方向, 以纤芯中心为零点, 单位是 μm

Fig. 4 At $\theta = 90^\circ$, computer simulation distribution of phase contrast intensity of PMF. The zero point is the core center

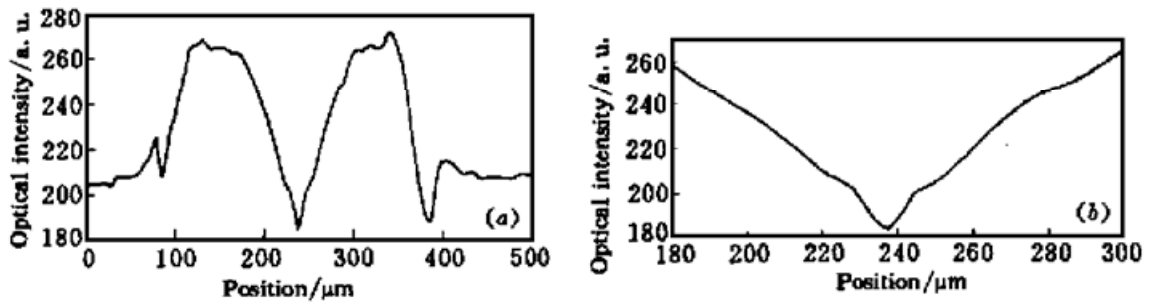


图5 $\theta \approx 90^\circ$ 时, 用线阵 CCD 得到的沿 x 方向的相衬光强分布形貌的实验曲线

(a) CCD 的整个信号记录; (b) 光纤中部范围内的光强分布。横轴是 CCD 的 x 方向, 单位约 $2 \mu\text{m}$

Fig. 5 At $\theta \approx 90^\circ$, experimental distribution of phase contrast intensity of PMF

(a) the full data recorded through CCD; (b) the middle part of full data

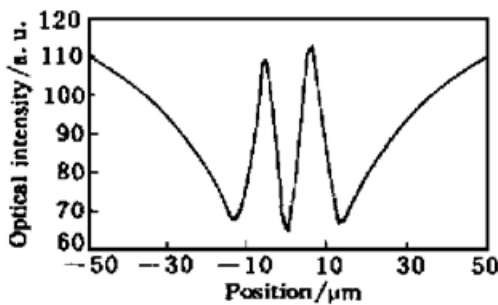


图6 $\theta = 5^\circ$ 时, 沿 x 方向的相衬光强分布形貌的仿真曲线。横轴是 x 方向, 以纤芯中心为零点, 单位是 μm

Fig. 6 At $\theta = 5^\circ$, computer simulation distribution of phase contrast intensity of PMF. The zero point is the core center

当光纤绕纤芯转过 θ 角度后, 纤芯两侧的峰高或谷深的不对称变化, 经计算机仿真可得到, 它实际上是光纤在物镜观察面上的相衬成像偏差造成的, 见公式(5)及图6; 当物镜景深较大, 无相衬成像偏差时, 变化应是对称的, 见图8。可见要使这种不对称变化光强特征显著, 要采用小景深的显微物镜。

由图9, 图10可看出, 峰高与谷深的不对称变化程度也不一样, 图9中峰高之差虽然只有1.1个单位, 但可明显看出, 谷深之差只有0.2个单位, 肉眼已很难识别。在图10中, 虽只转过 $\theta = 0.2^\circ$, 肉眼还可识别峰差, 此峰高差特征较明显。因为通常所用的显微物镜的景深都较小, 所以上述光强的形

貌特征中,最显著的是峰高之差,在保偏光纤定轴中选其为定轴特征可有较高精度。

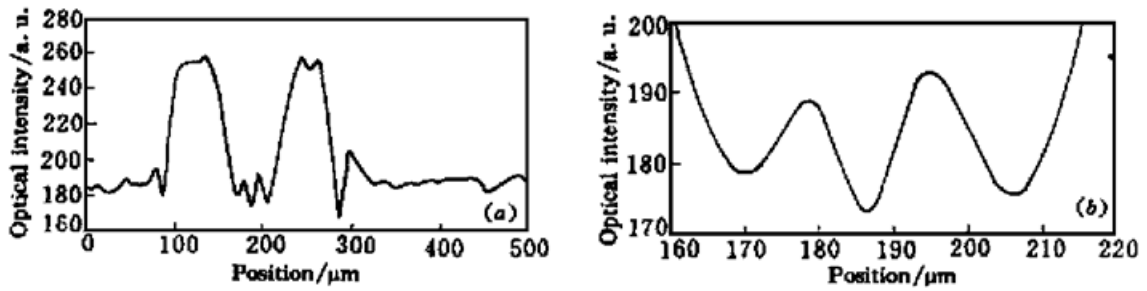


图 7 $\theta \approx 5^\circ$ 时,用线阵 CCD 得到的沿 x 方向的相衬光强分布形貌的实验曲线

(a) CCD 的整个信号记录; (b) 光纤中部范围内的光强分布。横轴是 CCD 的 x 方向,单位约 $2 \mu\text{m}$

Fig. 7 At $\theta \approx 5^\circ$, experimental distribution of phase contrast intensity of PMF

(a) the full data recorded through CCD; (b) the middle part of full data

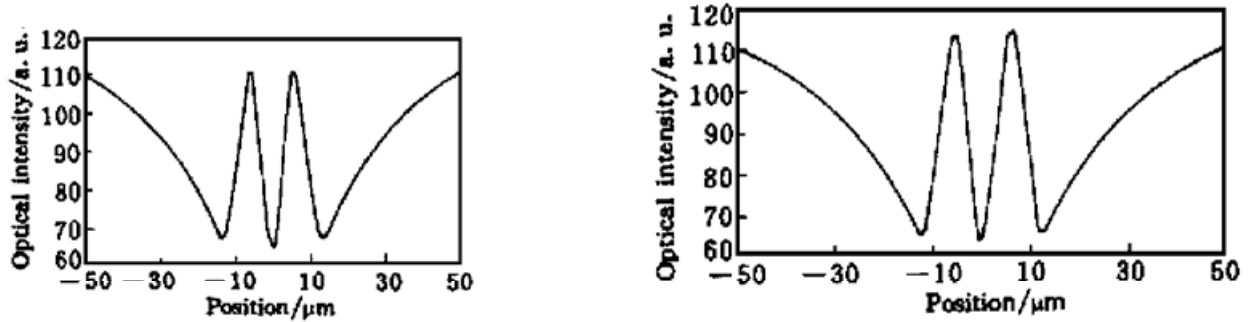


图 8 $\theta = 5^\circ$ 时,物镜景深较大,光纤在物镜观察面上无相衬成像偏差时, x 方向的相衬光强分布形貌的仿真曲线。横轴是 x 方向,以纤心中心为零点,单位是 μm

Fig. 8 At $\theta = 5^\circ$, computer simulation distribution of phase contrast intensity of PMF. The zero point is the core center

图 9 $\theta = 1^\circ$ 时,沿 x 方向的相衬光强分布形貌的仿真曲线。横轴是 x 方向,以纤心中心为零点,单位是 μm

Fig. 9 At $\theta = 1^\circ$, computer simulation distribution of phase contrast intensity of PMF. The zero point is the core center

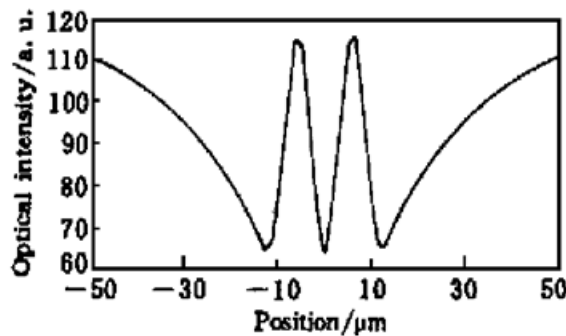


图 10 $\theta = 0.2^\circ$ 时,沿 x 方向的相衬光强分布形貌的仿真曲线。横轴是 x 方向,以纤心中心为零点,单位是 μm

Fig. 10 At $\theta = 0.2^\circ$, computer simulation distribution of phase contrast intensity of PMF. The zero point is the core center

4 相衬法定轴与仿真分析的精度问题

相衬法的关键指标是定轴的精度,在这方面它存在两个根本的问题,一是相衬法确定的是应力区的几何轴,当光纤内部结构不是理想对称时,几何轴与应力双折射光轴间有偏差,最终限制了定轴的精度。事实上,所有侧视法定轴都存在这一问题,只是由于侧视法定轴的方便性,所以目前在许多场合被广泛采用。另外一个问题是,相衬定轴仍是建立在应力区与包层仍有微小折射率差的基础上,理论上讲,折射率差消失,任何侧视定轴方法都将失效。相衬法最突出的

特点是它解决了普通显微镜难以对具有很小折射率差的匹配保偏光纤侧视成像定轴的问题。

对于一般匹配型光纤, $\Delta n/n$ 约为 0.1% 左右, 在实际的光纤制作工艺中, 进一步严格控制此差值的大小十分困难, 总有一定的匹配起伏, 这也决定了相衬法定轴的实际精度。实验中发现, 对不同的光纤样品, 定轴分辨率是不同的, 对一些样品的测试分析表明, 平均定轴分辨率约为 2° [3] 必须指出的是, 对此类匹配型保偏光纤, 用普通显微镜侧视成像定轴的精度已经很差。对于不匹配型光纤, 应力区与包层的折射率差较大, 相衬成像中容易分辨此两区域, 不匹配值越大, 则越易分辨, 当不匹配值差大到一定程度时, 采用普通显微镜也已经能满足侧视定轴的精度要求了。

相衬法定轴最终是通过光纤的侧视相衬图像特征分析进行的, 由于受到光纤内部折射率分布、成像位置、成像系统误差等因素的影响, 从实验上完全确定相衬特征与光纤内部结构的对应关系是比较困难的, 借助计算机仿真分析, 可以方便地将各种因素的影响分离开来分析, 这将有助于正确掌握双折射轴取向的相衬图像特征, 提高定轴精度。对相衬光强图像进行计算机定量分析时, 必须有一个能够正确反映光纤内部结构与相衬光强图像特征的数学模型。由以上数学模型得出的仿真结果与实验相符, 该数学模型已在高精度定轴的相衬光强图像的计算机处理方法上发挥重要作用 [3]。

5 结 论

建立在相衬法定轴数学仿真模型上的计算机仿真结果与实验结果吻合较好 [3], 这表明确定的匹配型熊猫光纤的应力折射率分布、光纤在物镜观察面上的相衬成像偏差等物理模型都是正确的。

计算机仿真分析表明相衬法可用于确定匹配型保偏光纤双折射光轴, 其基础是存在相衬光强形貌特征图像; 用于相衬法定轴技术的显著光强形貌特征是在纤芯两侧的光强尖峰高度的不对称变化及两尖峰高度之差, 此方法已成功地应用于定轴实验, 定轴分辨率小于 2° 。

进一步的定轴技术仿真的定量化可以建立起相衬光强形貌特征图像库。

参 考 文 献

- 1 Wenxin Zheng, Ola Hulten, Mats Bengtsson *et al.*. Fully Automated Splicing of All Types of PM-fiber. *Proceedings of 7th National Conference on Optical Fiber Communication, Guilin* (全国第七次光纤通信学术会议论文集, 桂林). 1995, 860~ 869 (in Chinese)
- 2 Chen Zhe, Hu Yongming, Zeng Chun *et al.*. A study on panda optical fiber used for polarization-maintaining fiber coupler. *Acta Optica Sinica*(光子学报), 1996, **25**(Z1): 401~ 403 (in Chinese)
- 3 Hu Yongming, Tan Jichun, Chen Zhe *et al.*. Phase contrast method for measurement of birefringent axes orientation of polarization-maintaining fiber. *Proc. SPIE*, 1996, **2895**: 350~ 354
- 4 E. Hecht, A. Zahac. *Optics*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., U.S.A., 1974. 474~ 478

Computer Simulation of Phase Contrast Alignment of Birefringent Axes in Panda Fiber of Matching Refractive-index

Hu Yongming Chen Zhe Liao Yanbiao

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Chang Shengli Tan Jichun Meng Zhou

(Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract In this paper, the simulated mathematical models of the panda fiber of matching refractive-index (MRI) were given through the structure of the fiber and the physics principles of phase contrast. Computer simulation of phase contrast alignment of birefringent axes (BA) in the panda fiber was done. Simulated mathematical models include several physics principles, e. g., distribution of stress-induced refractive index in the panda fiber of MRI, phase contrast, and image error of optical fiber around the observation plane of the objective lens. Computer simulation gave the optical intensity distinguishing profile in phase contrast to align BA in the panda fiber of MRI. The simulated profiles fit well with experimental ones. The technique has been used in experiments and the resolving power was less than two degrees.

Key words phase contrast, panda fiber, alignment of birefringent axes, simulation, distinguishing profile