

文章编号: 0258-7025(2010)03-0836-06

# 大截面柔性传像光纤光子材料的研制

周德春<sup>1</sup> 于凤霞<sup>1</sup> 谭芳<sup>2</sup> 卢敬娟<sup>1</sup> 杨军<sup>1</sup> 崔媛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022; <sup>2</sup> 长春大学理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 大截面柔性传像光纤光子材料具有单丝直径细、柔软性能好、成像清晰等优点,是目前光电功能材料研究领域最具活力的研究课题之一,其产品在各类高清晰度光纤成像仪器和工业自动化检测等领域有着广阔的应用前景。对物化性能相互匹配的高光学质量纤芯、包层和酸溶层玻璃的配方进行了设计和制备。对硬质传像光纤开展了单复丝拉制、热熔和酸溶实验。在端部强化和光学冷加工基础上,对柔性传像光纤进行了检测和评价。实验得到了传像光纤直径为 6.18 mm,单丝直径为  $8 \pm 1 \mu\text{m}$ ,分辨率为 55 线对/mm,可见光透过率大于 38%/m,芯/包同心度误差为 0.01%,数值孔径为 0.65 的大截面柔性传像光纤光子材料。

**关键词** 光纤光学;传像光纤光子材料;酸溶法;大截面;分辨率;透过率

中图分类号 TH703;TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0836

## Study and Synthesis of Large Section Soft Image Transfer Fiber Photonic Material

Zhou Dechun<sup>1</sup> Yu Fengxia<sup>1</sup> Tan Fang<sup>2</sup> Lu Jingjuan<sup>1</sup> Yang Jun<sup>1</sup> Cui Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China  
<sup>2</sup> College of Science, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Image transfer fiber photonic material is one of the most active research object in the photoelectric functional material field. This material has many virtues: fine single fiber diameter, best softness properties, imaging clearly and so on. This material has wide application perspective in all kinds of high image definition instruments and industrial automate detection fields. This article prepared high optical quality core and clad glasses with physicochemical matching properties. On the base of end strengthen and optical cold work, we tested and evaluated soft image transfer fiber. It gained large section image transfer fiber photonic material, of which the diameter is 6.18 mm, single fiber diameter is  $8 \pm 1 \mu\text{m}$ , resolution is 55 line pair /mm, visible light transmittance is more than 38%/m, core/clad glass concentricity error is 0.01% and numerical aperture is 0.65.

**Key words** fiber optics; image transfer fiber photonic material; acid-leaching method; large section; resolution; transmittance

## 1 引言

传像光纤光子材料是一种把柔性光纤的输入与输出端按照相同规律严格排列的二维阵列的光学纤维器件,是制造各类光纤成像仪器的关键部件。目前,国际上日本、俄罗斯等少数几个国家生产的传像

光纤器件开始向着细径化、高精度、多品种、性能优良的方向迅速迈进,而我国生产的传像光纤光子材料的性能与国际相比还有很大差距。这种性能优良的传像光纤光子材料是采用先进的“酸溶法工艺”制造的,用酸溶法制备的光纤传像束具有单丝直径细

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-08

基金项目: 吉林省教育厅重点项目(129519)资助课题。

作者简介: 周德春(1964—),男,博士研究生,副教授,主要从事光纤材料与器件等方面的研究。

E-mail: zhoudechun0912@cust.edu.cn

导师简介: 于凤霞(1950—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤材料与器件等方面的研究。

E-mail: fengxiayu2003@yahoo.com.cn

(8  $\mu\text{m}$  以下)、分辨率高(大于 50 线对/mm)、柔软性能好、图像清晰、数值孔径大等优点。因此,被广泛应用于光纤医疗成像仪器、工业探测、军事航天等重要领域<sup>[1,2]</sup>。本文在分析传像光纤光子材料传输条件的基础上,对材料的光性以及热力学、化学的匹配性进行了研究和设计,开展了拉丝、热熔以及冷加工实验,并对材料的主要性能指标进行了检测和评价。

## 2 材料的匹配性及配方设计

### 2.1 材料光性的设计

传像光纤光子材料是一种阶跃型折射率光纤,纤芯折射率是均匀分布的。因此,光线在阶跃型光纤纤芯内的传输是以直线传播的方式进行的,其传输条件如图 1 所示。

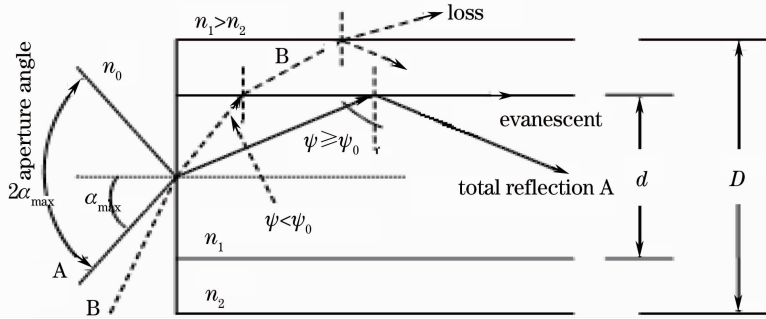


图 1 阶跃型折射率光纤的传输条件

Fig. 1 Transfer conditions of step index refractivity fiber

图 1 中  $n_1, n_2$  分别为纤芯和包层的折射率,  $n_0$  为光纤周围媒质的折射率, A 代表传输光线, B 代表漏射光线。要使光能完全限制在光纤内传输, A 光线必须在最大入射角  $\alpha_{\max}$  (亦称孔径角) 范围内入射, 才能在纤芯与包层分界面上产生全反射<sup>[3]</sup>。可表示为

$$\sin \psi_0 = n_2 / n_1, \quad (1)$$

$$\psi \geq \psi_0 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (2)$$

式中  $\psi$  为光线在纤芯-包层分界面上的入射角,  $\psi_0$  为临界角。

根据光纤传输的条件, 传像光纤光子材料的光性设计如下: 首先, 要求纤芯玻璃的折射率  $n_1$  大于包层玻璃的折射率  $n_2$ ; 其次, 为提高光纤的透光性能, 在制造纤芯和包层玻璃时应选择纯净度高的原材料, 以避免因带进过渡金属杂质(如:  $\text{Cr}^{3+}, \text{Co}^{3+}, \text{V}^{3+}$  等)而产生吸收损耗<sup>[4]</sup>。此外, 酸溶层玻璃经过酸溶工艺后要被溶解掉, 所以对酸溶玻璃的折射率不作要求。

### 2.2 热学性能的匹配

为满足光纤预制棒拉丝工艺的要求, 避免热应

力过大而引起光纤炸裂, 以及在纤芯和包层玻璃的界面因粘结不牢而使光纤包层局部脱落, 一般要求纤芯玻璃比包层玻璃的热膨胀系数大几个单位, 从而保证在拉丝时光纤的机械强度、柔软性能和几何结构。

### 2.3 化学稳定性匹配

纤芯和包层玻璃间的化学稳定性应有较好的匹配设计, 以防止在拉丝温度下出现析晶、离子扩散等现象。此外, 还要求这两种玻璃具有较好的耐酸、耐碱及耐水性能, 以保证在常规条件下具有稳定的使用性能。

### 2.4 传像光纤光子材料的配方设计

根据材料的光学性质设计以及热学、化学性质的匹配性分析, 通过玻璃成分的计算机辅助设计优化<sup>[5]</sup>, 纤芯玻璃采用  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  系统玻璃, 包层玻璃采用  $\text{R}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  系统玻璃, 酸溶玻璃采用  $\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  系统玻璃。其原料的基本配方见表 1。

表 1 纤芯、包层和酸溶玻璃原料配方(质量分数, %)

Table 1 Material components of core, clad and acid-leaching glasses(mass fraction, %)

Component	$\text{SiO}_2$	$\text{PbO}$	$\text{BaO}$	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{ZnO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{R}_2\text{O}$
Core glass	30	43	5	10	2	—	10
Clad glass	65	—	—	10	5	2	18
Acid-leaching	20	—	25	30	8	2	15

### 3 传像光纤光子材料的制备

#### 3.1 工艺流程

先制备出小截面硬质光纤传像束,再进一步采用热熔法和酸溶法制备出大截面柔性传像光纤光子材料,其工艺流程如图 2 所示。

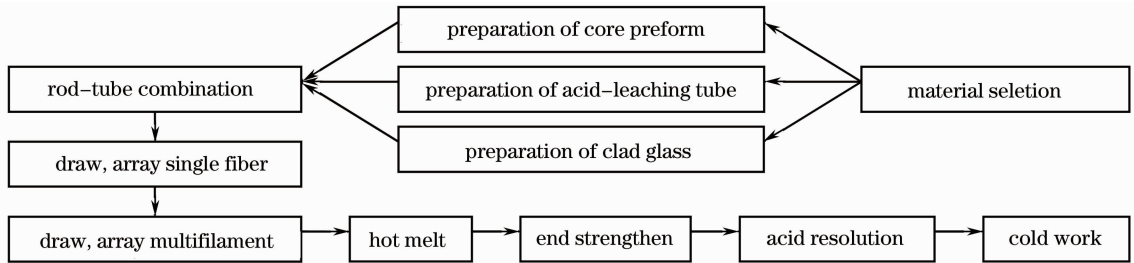


图 2 大截面柔性传像光纤制备工艺流程

Fig. 2 Preparation technique procedure of large section soft image transfer fiber

式中  $C_n$  为氧化物的计算系数,  $P_n$  为氧化物含量。

经(3)式计算和实验校正,熔化温度确定为 1400~1450 °C,熔化时间为 16~20 h。在熔化过程中,为消除气泡和条纹以保证玻璃的光学均匀性,对玻璃液搅拌和高温澄清。熔体在电炉内降温至 950~

#### 3.2 棒、管组合体的制备

按表 1 玻璃原料配方配制混合料,将配合料混合均匀后,放入铂金坩锅中,在硅碳棒加热下熔融。其熔化温度  $T_m$  计算式为<sup>[6]</sup>

$$T_m = C_n P_n + 1400, \quad (3)$$

1100 °C 后,将玻璃液浇注在预热后的钢模中退火(以消除棒、管中的残余应力)成型,再经过研磨、抛光使其具有一定表面光洁度的玻璃棒、管备用。

对所制备的玻璃棒、管材料主要物理性能指标进行检测,其测试结果如表 2 所示。

表 2 传像光纤玻璃棒、管的物理性能

Table 2 Glass rod and tube physical performances of image transfer fiber

Physical performance parameters	Core glass rod	Clad glass tube	Acid-leaching tube
Diameter×length /mm	φ20×280	φ27×300	φ30×300
Refractive index	1.6397	1.5050	1.5112
Transmittance /(% /m)(400~1000 nm)	93.6	91.9	90.5
Transmission temperature /°C	435	487	471
Soften temperature /°C	487	535	522
Expansion coefficient /( $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ )(20~300 °C)	94	91	87

从表 2 的测试结果得出如下结论:制备传像光纤光子材料所用的纤芯玻璃、包层玻璃和酸溶玻璃的光学、热学性能(软化温度、热膨胀系数)等具有较好的匹配性,满足了传像光纤光子材料制备工艺的要求。因此,表 1 玻璃原料配方设计合理,可以用于制备酸溶法传像光纤光子材料。

#### 3.3 单复丝控制及热熔、酸溶实验

用蒸馏水将制备的玻璃棒、管材料冲洗干净,彻底烘干后把棒、管组合体装卡在拉丝机的原料进给系统中,通过控制适当的熔化温度和进料速度,采用棒管法拉制单丝<sup>[7,8]</sup>。丝径的控制根据物料平衡原理

$$v_2 = \frac{v_1(\phi_1^2 - \phi_2^2 + \phi^2)}{D^2}, \quad (4)$$

式中  $\phi_1$  为玻璃管的外径; $\phi_2$  为玻璃管的内径; $\phi$  是玻

璃棒的直径; $D$  为所要拉制的光学纤维的直径; $v_1$  是棒、管组合体的送料速度; $v_2$  是所需要的拉丝速度。

根据(4)式,要拉制出 8 μm 的光纤单丝,就必须通过丝径控制仪将拉丝速度恒控在  $v_2 : v_1 = 10 : 1$ ,同时要精确控制加热温度,尽量减少拉丝时的温度变化,防止析晶和断丝产生。

复丝控制与单丝控制基本相同,整个操作过程要求在净化的环境下进行。通过控制拉丝速度和温度,就可拉制出直径为 1.0 mm 的小截面硬质传像束。此时,在硬质传像束内已经包含了像元素 16000 根,单丝直径  $8 \pm 1 \mu\text{m}$ ,而且单丝之间相互熔合,彼此间有很好的光学绝缘性能。

将一定长度的、经过六角形严格排列的 1.0 mm 的小截面硬质传像束捆绑固定后,将其垂直放在管式电炉里,下端 30 mm 处在高温区内,热熔温度为

580 ℃,保温 17 min,使端部熔合在一起。然后再经过退火降温使之定型,降温速率为 5 ℃/min,这样就制成了大截面硬质光纤传像束。

对硬质光纤传像束两端进行防酸保护处理,然后将其放置在质量浓度为 18.23 g/L 的 HCl 溶液中,加热到 35~40 ℃之间,酸溶 135 min 左右取出,最终得到了直径为 6.18 mm 的大截面柔软光纤传像束。实验检测结果表明,在此酸溶参数范围内,酸溶层被溶解掉,传像束内无硬芯和暗丝存在。

### 3.4 端部强化及光学冷加工实验

经过酸溶工艺后,除去酸溶层的单根光纤细而柔软,而包裹石蜡两端部分仍然坚硬,所以在传像束的硬端和软束之间的连接处是应力集中区(如图 3)。连接处极其脆弱,很容易断裂,需要端部强化加强连接,以达到使用要求。

在端部强化时,选择了流动性好的有机胶对应力集中区进行固化。经过固化后,传像束不仅具有很好的拉伸强度,而且其端部的机械强度大为增加。经过

端部强化的光纤传像束,装上保护管和金属端头后,要对其两个端面进行研磨和抛光。光纤传像束的研磨分 3 步,即:粗磨、细磨、精磨。经过 3 步研磨后再进行抛光,这时的传像束端面非常平整、光亮。在常温状态下,使用 GX93-1 型光纤检测仪作光源(卤素灯的工作电压 12 V,功率 50 W),采用 XSS-2A 型双目摄影显微镜(放大倍率 30 倍),对直径为 6.18 mm 大截面柔软光纤传像束的端面进行扫描检测,其拍摄的照片如图 4 所示。从图 4 可见,传像束的端部强化、研磨和抛光对图像质量至关重要。

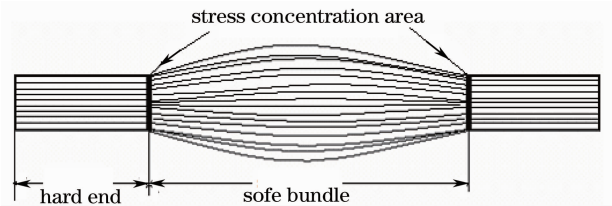


图 3 大截面传像束端部的应力集中区

Fig. 3 Stress concentration area of large section image fiber ends

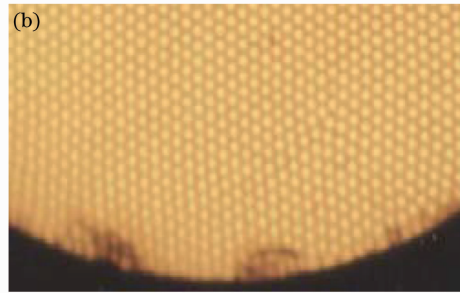
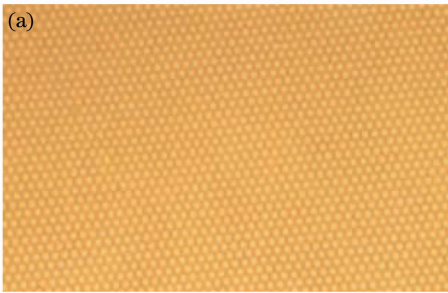


图 4 直径 6.18 mm 传像束的加工平整端面(a)和失败端面(b)

Fig. 4 Work planeness (a) and failed ends (b) of 6.18 mm diameter fiber

## 4 主要性能指标的检测与评价

### 4.1 数值孔径和同心度的检测与评价

传像光纤光子元件的数值孔径( $d_{NA}$ )表示光纤的集光能力, $d_{NA}$ 越大,光纤的集光能力就越强。分析图 1 得出: $d_{NA}$ 与光线最大入射角 $\alpha_{max}$ 有关,其关系式为

$$d_{NA} = n_0 \sin \alpha_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (5)$$

表 3 传像束的数值孔径和同心度误差测试结果( $n_0=1$ )

Table 3 Results of numerical aperture and glass concentricity error( $n_0=1$ )

Number	Beam diameter /mm	Length /m	Concentricity error /%	Aperture angle /( $^\circ$ )	$d_{NA}$
1 <sup>#</sup>	6.18	0.5	0.011	80.48	0.646
2 <sup>#</sup>	6.18	1.0	0.010	81.08	0.650
3 <sup>#</sup>	6.18	1.5	0.009	81.54	0.653
4 <sup>#</sup>	6.18	2.0	0.010	81.24	0.651

由表 3 得到该组传像束数值孔径的实测平均值 $d_{NA_{avg}}=0.650$ ,芯/包同心度误差仅为 0.01%,可见

由(5)式分析可知, $d_{NA}$ 与纤芯和包层材料的折射率有关。将被测传像光纤光子元件的纤芯材料折射率 $n_1=1.6397$ ,包层材料的折射率 $n_2=1.5050$ 代入(5)式,得到传像光纤光子元件的理论数值孔径为 0.651。

实验截取了 4 根不同长度、直径为 6.18 mm 的光纤传像束来进行数值孔径和芯/包同心度误差测试,其编号分别为 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>,它们的测试结果见表 3。

其理论数值孔径与实测值是非常接近的,只是实测值比理论值略低,这是因为在光纤制备过程中,存在



诸如光纤入射端面不平、芯/包同心度不均匀导致双折射等因素,从而引起光纤元件数值孔径的变化。

由表3的测试结果分析表明:数值孔径与光纤的长度和束径没有直接的关系,它主要受光纤材料和制作缺陷的影响。为了提高光纤的数值孔径,在材料配方的选择上,在保证光纤元件透过率的前提下,应尽可能提高纤芯玻璃的折射率,降低包层玻璃的折射率。同时在拉丝过程中,要始终保持恒定的拉丝速度和拉丝温度,从而减少芯/包同心度误差,避免光纤传输的损耗。

#### 4.2 分辨率的测试与分析

评价传像束传递图像质量的重要参数是分辨率。传像光纤光子元件的分辨率与单丝直径和排列方式等有关,其分辨率数值与光纤的单丝直径成反比。所以尽量选取单丝直径较小的纤维单丝进行排列,以增加单位面积的像元素,以此提高传像束的分辨率。在光学绝缘良好的情况下,基于尼奎斯(Nyquist)理论,紧密六角形排列的传像束分辨率值比正方形排列的分辨率值提高1.15倍<sup>[9]</sup>,所以在制备过程中采用了六角形排列方法。

实测传像光纤光子元件的分辨率时,采用3#分辨率板。其测量计算式为

$$R_N = \frac{60}{B} K_N, \quad (6)$$

式中 $B$ 为图案的基线长, $K_N$ 为与图案单元编号有关的系数。

对1#~4#中的4根大截面传像光纤光子材料进行分辨率测试,经测试有 $K_N = 4.4$ , $B = 4.8$ ;将其代入(6)式得到传像光纤光子元件的分辨率为55线对/mm。

#### 4.3 透过率的测试与理论验证

透过率是表征传像光纤光子元件透光性能好坏的重要指标。影响传像光束透过率的主要因素有:光纤端面的菲涅耳(Fresnel)反射损失、纤芯和包层界面内壁上的全反射损失、光纤芯材的吸收、集束加工工艺等<sup>[10,11]</sup>。

光纤端面的菲涅耳反射系数 $R$ 和透过系数 $t_1$ 表达式为

$$R = \left( \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2, \quad (7)$$

$$t_1 = (1 - R)^2. \quad (8)$$

由表2可知, $n_1 = 1.6397$ ,由(7)式得 $R = 0.0587$ , $t_1 = 0.886$ 。

考虑纤芯和包层界面内壁上的全反射损失以及

光纤芯材的吸收影响,在波长 $\lambda = 550$  nm时,对于多组分玻璃光纤,其透过系数 $t_2 = 0.96$ 。

光纤的有效填充系数也是影响光纤透过率的重要因素,传像光束端面的光纤排列一般是随机的,如果端面光纤为紧密六角形排列,填充系数 $K$ 的表达式为

$$K = \frac{\pi}{3.464} \left( \frac{d}{D} \right)^2, \quad (9)$$

式中 $d$ 为光纤纤芯直径; $D$ 为光纤直径。

由(9)式分析,在光纤材料和制作等因素不变的条件,光纤透过率随纤芯直径的增大而增大。本实验 $d = 6 \mu\text{m}$ , $D = 8 \mu\text{m}$ ,端面为六角形排列,由(9)式得 $K = 0.510$ 。

综合(7)~(9)式的理论分析,考虑端面集束加工和断丝等所影响的透过系数 $t_3 = 0.90 \sim 0.98$ ,光纤传像束的理论透过率值为

$$T = t_1 \cdot t_2 \cdot K \cdot t_3. \quad (10)$$

在波长 $\lambda = 550$  nm时,将分析数据代入(10)式,得到理论透过率验证值为39%~43%。

对编号为1#~4#的4根光纤传像束进行透过率测试,测试曲线如图5所示。

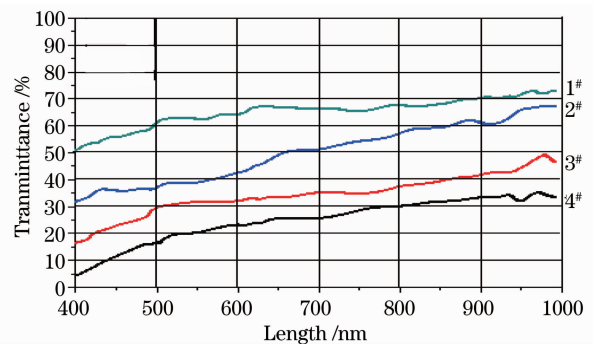


图5 直径6.18 mm光纤在不同长度下的透过率曲线  
Fig. 5 Transmittance curve of 6.18 mm diameter fiber of different lengths

图5表明,同一截面不同长度的传像光纤光子材料的透过率随着光纤长度的增加明显降低,而且衰减的数值不是线性关系,在400~550 nm的衰减幅度远高于红外光波段,在550~760 nm的可见光波段趋于平稳。值得指出的是,长度为1 m的2#光纤在550 nm传输光谱波段,对应的透过率值是38.6%,接近理论透过率验证值,只是比理论值略低,这是由于测量过程中的环境杂光以及耦合损耗所致。

## 5 结 论

在分析传像光纤光子材料传输条件的基础上,

对材料的光性以及热力学、化学的匹配性进行了研究和设计,确定了符合酸溶法传像光纤制备工艺要求的配方。研制出了具有自主知识产权的大截面、高分辨率、大数值孔径的柔性传像光纤光子材料。通过对所研制材料的检测和评价表明:该材料的应用有望提高我国光纤成像仪器的性能指标,同时对带动光纤成像技术和产品的科技创新具有一定的现实意义。

### 参 考 文 献

- 1 Zhou Dechun, Yu Fengxia, Tan Fang. Preparation and optical performance of high resolution optical fiber image bundle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 723~726  
周德春,于凤霞,谭芳. 高分辨率光纤传像束的制备及其光学性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 723~726
- 2 Fan Guangzhao, Li Ruijun, Song Xinming. An innovative micro-3D measurement system with fiber image transmission [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(4): 302~307  
范光照,李瑞君,宋欣明. 一种新型光纤传像微三维测量系统[J]. *纳米技术与精密工程*, 2004, **2**(4): 302~307
- 3 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 2~4  
郁道银,谈恒英. *工程光学*[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 2~4
- 4 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 54~55  
廖延彪. *光纤光学*[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 54~55
- 5 Wang Zebin. Optimum design for the glass component by computer[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2003, **4**: 81~85  
王泽斌. 计算机辅助玻璃配方优化设计[J]. *硅酸盐通报*, 2003, **4**: 81~85
- 6 Wang Chengyu, Tao Ying. Design and adjustment of glass component[J]. *Glass and Enamel*, 2002, **30**(5): 59~62  
王承遇,陶瑛. 玻璃成分设计与调整(五)[J]. *玻璃与搪瓷*, 2002, **30**(5): 59~62
- 7 Wang Zhongjian, Dai Hui, Hu Yichen *et al.*. Desinging principle of fiberizing system for flexible image bundle fabrication by using acid leaching process [J]. *Glass and Enamel*, 2008, **36**(2): 31~34  
王中俭,戴辉,胡一晨等. 酸溶法柔性光纤传像束成纤系统设计原理[J]. *玻璃与搪瓷*, 2008, **36**(2): 31~34
- 8 Faramarz E. Seraji, Mahnaz Rashidi, Maryam Karimi. Characteristics of holey fibers fabricated at different drawing speeds[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 131~134
- 9 Huang Tianzhi, Xue Jinsheng. Calculate method of angular resolving power of image fiber bundles in telescopic sight [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(1): 101~102  
黄天智,薛晋生. 传像束光纤在望远瞄准镜中角分辨率的计算方法[J]. *光学技术*, 2004, **30**(1): 101~102
- 10 Xu Mingquan, Zhang Zhenyuan. Research on transmissivity determination for optical fiber bundles [J]. *Fiber Glass*, 2007, (1): 10~14  
徐明泉,张振远. 光纤束透过率的测试研究[J]. *玻璃纤维*, 2007, (1): 10~14
- 11 Sui Kerong, Zhu Xiaosong, Tang Xiaoli *et al.*. Study on material dispersion of dielectric layer in hollow fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2062~2066  
隋可融,朱晓松,汤晓黎等. 空芯光纤中介质层材料色散的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2062~2066