

大尺寸聚合物光纤面板制造新技术的初步研究*

王金猛¹⁾²⁾ 孔德鹏¹⁾²⁾ 王丽莉^{1)†}

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011 年 4 月 29 日收到; 2011 年 5 月 30 日收到修改稿)

利用堆积-热融合工艺, 将商用聚甲基丙烯酸甲酯低损耗光纤以六方堆积的方式排列在自行设计的模具中, 制备光学聚合物光纤面板预制棒后, 对预制棒进行切割、拼接, 研究了一种制备超大尺寸光纤面板的新技术. 拼接面板样品的厚度 2 mm, 像素直径 500 μm , 总像素数 59052, 对大尺寸人或物的像具有很好的传递能力. 利用该技术制备的大尺寸拼接光纤面板, 对于液晶拼接屏中拼接缝的清除以及大屏幕的保护具有不可替代的作用.

关键词: 大尺寸, 聚合物光纤面板, 制造新工艺, 液晶拼接屏

PACS: 42.81.Qb

1 引言

光纤面板是指厚度小于横截面的板状图像传递元件, 由许多根光纤按一定的规则排列后, 经过加热融合形成. 光纤两端按一一对应的关系紧密排列, 使每根光导纤维输入和输出端在几何上一一对应, 每一根光导纤维传递一个像点, 从而起到像传导的作用. 每根光纤的直径在微米到数十微米量级, 对图像有很高的传递效率, 且畸变很小. 光纤面板具有集光效能高、传光效率高、传像真实的特点, 利用光纤面板加工成的各种曲面作输入、输出窗并与电子光学配合消除像差, 能获得大反差、高分辨率的像. 级间耦合用光纤面板可减少光损失, 也能保持高分辨率^[1].

液晶拼接屏时尚、辐射低、节能、节省空间, 画面稳定、清晰, 受到广大用户的喜爱. 因此采用液晶显示单元组成的显示墙, 开始被各行各业推广和应用. 但在液晶拼接屏的制作过程中, 由于拼接单元侧面有脆弱的电路板排布, 故无法直接以液晶面板互相接触拼接, 其四周必须有一定的包裹材料阻挡, 形成了很明显的拼接缝, 影响了液晶拼接屏的显示效果. 利用光纤面板传像并具有一定的放大

率的特点, 与液晶面板对接在一起, 可以实现液晶超大屏幕的高清无缝显示. 传统的光纤面板是由玻璃或石英材料制得, 一般尺寸比较小, 被广泛用于 CCD 耦合器件、图像转换器、摄像机影像管等光电成像系统. 现有制造技术是把数万根 5—6 μm 的玻璃光纤规则排列后加温、加压熔合, 工艺十分复杂, 成品率低. 所以国际上高质量光纤面板产品价格十分昂贵, 军用面板国外对我国封锁、禁卖. 由于玻璃的密度大, 质地较脆, 若用于制造大尺寸的光纤面板, 加工工艺难度大, 而且也给安装使用带来极大的不便. 2000 年美国 Nanoptics 公司在《Optics Letter》杂志上发表了用梯度折射率聚合物光纤制得超高分辨率渐变型塑料光纤 (GIPOF) 传像光纤面板的论文^[2]. 美国 Nanoptics 公司生产聚合物光纤高端产品, 为美国军方提供用以制造轻型头盔显示屏、步枪瞄准镜等^[3]. 另外还有美国的 Berkshire Photonics 公司生产各种高级的聚合物传像光纤器件, 为医学窥镜、军事遥感传感器提供关键技术^[4]. 2009 年 3 月, 美国 Arradance 公司宣布“已经研制出世界上第一个塑料微通道板, 主要用于空间科学、国家安全防卫、夜视技术以及生

* 国家自然科学基金 (批准号: 60437020) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2007AA032452) 资助的课题.

† E-mail: liliwang@opt.ac.cn

物技术和分析仪器”[5].

目前大尺寸聚合物光纤面板的规模化制作技术还未见报道. 本课题组近年开发了具有质量轻、柔性好、易弯曲、不易断丝、使用寿命长、制造价格低的聚合物传像光纤 [6-10]. 本文拟在此工作的基础上, 以商品化直径 $500\text{ }\mu\text{m}$ 低损耗聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 光纤为起始原料, 借鉴微结构光纤预制棒制造工艺, 探索研制大尺寸光纤面板的规模化制作方法, 并分析研制的聚合物光纤面板的传像特征参数. 利用该技术制备的大尺寸光纤面板用于大屏幕液晶显示屏的保护和显示屏拼接缝的消除, 具有很好的市场应用前景.

2 光学聚合物光纤面板的制造

2.1 聚合物传像光纤面板预制棒模具的设计

我们吸收毛细管堆积法制造微结构光纤工艺 [11] 的长处, 利用堆积融合的办法, 将商用低损耗 PMMA 光纤按照一定规则, 堆积在我们自行设计的模具中, 然后加热融合, 来制造 PMMA/氟塑料传像光纤面板预制棒. 图 1 为 PMMA 堆积模具示意图, 横截面如左图所示, 其中模具的外直径为 60 mm , 内部六边形的直径为 40 mm , 模具长度为 50 cm . 假设六边形模具内光纤之间紧密排列, 则六边形模具中光纤容量 n 的计算方法如 (1) 式所示:

$$\begin{aligned} n &= 2 \times (n_0 + n_0 + 1 + n_0 + 2 + \cdots + n_0 + n_0 - 2) \\ &\quad + 2n_0 - 1 \\ &= 2 \times [n_0 \times (n_0 - 1) + \sum_{i=1}^{n_0-2} i] \\ &\quad + 2n_0 - 1, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 n_0 为沿着六边形预制棒边长最外层的光纤像元数目, n_0 的值可由模具内部边长和光纤像元直径计算得到.

经计算, 像元直径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的 PMMA 光纤在六边形模具中最外层的排列数目 n_0 为 41, 将 n_0 代入 (1) 式中, 可得六边形模具的光纤容量 n 为 4921.

模具内部横截面设计成六边形, 使光纤以六方堆积排列在一起, 这样一方面可以使光纤之间以最紧密的方式排列, 有很强的结构稳定性, 比之于四方排列, 单位面积上将会有更多的像元数; 另一方

面, 面板预制棒的六边形端面将对制作结构稳定性好的大尺寸拼接面板有利.

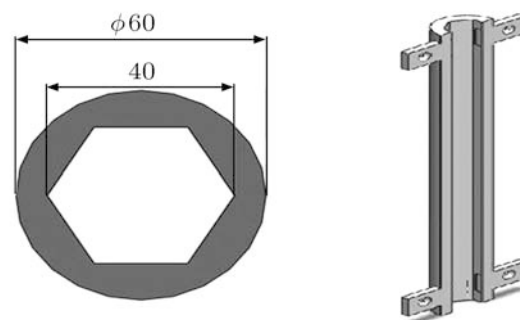


图 1 PMMA 堆积模具示意图 (单位 mm)

2.2 聚合物传像光纤预制棒的制作

聚合物传像光纤预制棒的制作流程如图 2 所示.

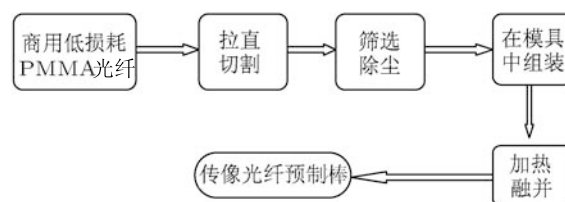


图 2 聚合物传像光纤预制棒制作流程图

为了保证在模具中组装时两端面光纤在几何上有一一对应的关系, 首先要把商用 PMMA 光纤进行拉直, 以避免由于光纤弯曲而导致的像元错位现象发生, 降低人为因素对传像质量的影响. 拉直在我们实验室专门设计并建造的光纤拉丝机上进行, 拉丝机高 12 m , 是国内目前规模最大的光纤拉丝机. 图 3 为我们自行设计的拉丝机的示意图. 在光纤拉直之前, 先对加热炉内进行彻底的打扫, 保持炉内洁净, 然后将炉内温度设定为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热 1 h , 使炉内彻底干燥, 以减少加热过程中水蒸气对光纤的污染. 光纤拉直时的温度设定由光纤材料的性能决定 [12]. 本文将温度设定为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 通过观察丝径仪直径的变化, 以及光纤拉直的情况, 不断地调节温度和牵引速度, 使光纤丝径均匀不弯曲. 剪切装置与牵引之间通过反馈电路相关联, 牵引的变化信息反馈于剪切装置, 使得剪切装置的剪切速率相应地发生变化, 从而得到所需的光纤长度 ($50 \pm 1\text{ cm}$). 拉直的光纤经静电消除装置消除静电后,

由接收装置自动接收.

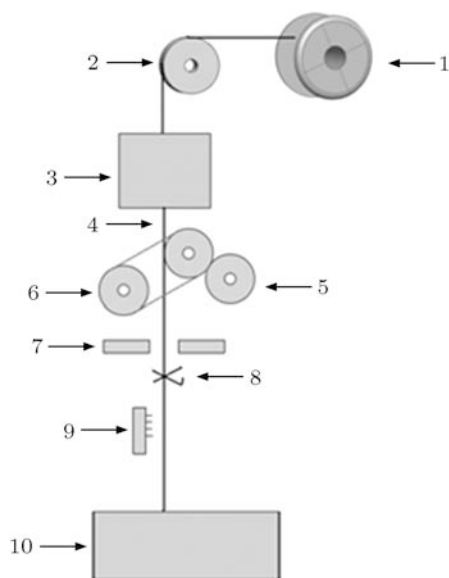


图3 拉丝机的主要部件示意图 1 PMMA 光纤; 2 固定变向轮; 3 电阻加热炉; 4 光纤; 5 减速器 (橡胶轮); 6 固定变向轮; 7 激光丝径仪; 8 剪切装置; 9 静电消除装置; 10 光纤接收

尽管进行了静电消除处理, 切割过程中产生的一部分碎屑及其他细小的杂质还是不可避免地粘结在光纤上, 并且存在漏剪或者剪切过快而造成光纤长度不均匀现象, 因而需要进行筛选、除尘处理. 筛选、除尘过程在超净的实验室内进行, 工作人员必须注意个人及环境的卫生, 身着洁净的工作服, 带洁净的手套, 防止手上的油污灰尘落在光纤表面,

并佩戴口罩防止唾液或者水蒸气吸附在光纤表面.

将筛选、除尘后的光纤整齐地排列在图 1 所示的模具中, 排列时要注意光纤两端的对应关系, 不要出现断丝和扭像的现象. 将光纤逐步填满模具, 最后要一根一根地插入模具中, 直到不能再将光纤插进模具为止, 以使光纤之间紧密接触, 整个过程也是在超净实验室中进行. 组装好的模具放在如图 4 所示的固定装置上.

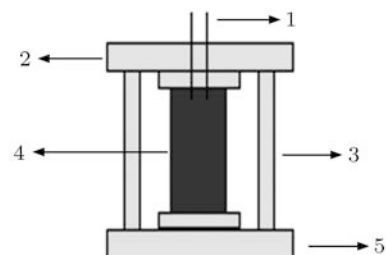


图4 模具固定装置示意图 1 通气管; 2 T型顶盖; 3 不锈钢管; 4 预制棒模具; 5 T型底座

固定装置的各个组成元件之间采用机械方式紧密连接, 使预制棒模具管内具有良好的气密性, 减少了模具外部环境对光纤的影响. 在由通气管 1 注入的氮气的保护下, 将固定装置放入加热炉中, 135°C 下加热 12 h, 自然冷却后, 形成传像光纤面板预制棒. 图 5 给出了在自然冷却后得到的一根长度约 33 cm, 直径 4 cm PMMA/氟塑料微结构传像光纤面板预制棒的照片.

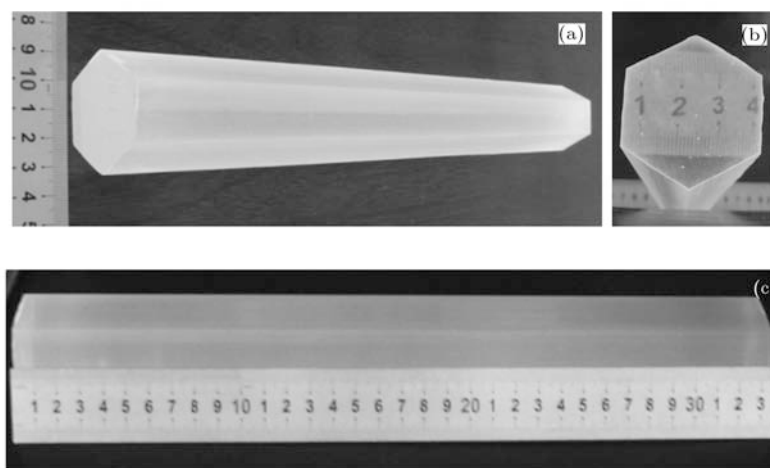


图5 PMMA/氟塑料微结构传像光纤预制棒 (33.5 cm, 直径 40 mm) (a) 六角结构; (b) 从预制棒一端到另一端的传像效果; (c) 预制棒的长度

2.3 大尺寸光学聚合物光纤面板制作方法研究

为了探索大尺寸光学聚合物光纤面板的制作方法, 我们借鉴液晶大屏幕拼接的方法, 将六边形小单元

面板通过拼接粘连在一起, 得到大面积的光纤面板. 由于预制棒端面是六边形, 我们可以利用六边形的规则形状, 通过有目的的切割拼接来制造规则的大尺寸面板. 图 6 为利用光纤面板预制棒进一步制作大尺寸光纤面板的流程示意图.

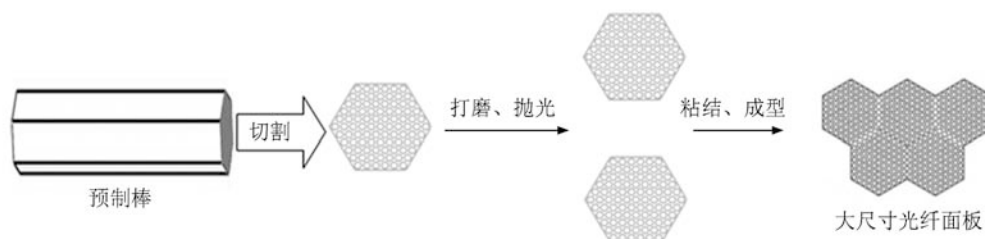


图 6 大尺寸光学聚合物光纤面板制作过程

首先, 将光纤预制棒进行精密切割, 得到厚度为 2 mm 的六边形小单元面板. 然后, 由欲制大尺寸光纤面板的形状, 对小单元光纤面板形状及组成进行分析, 并对得到的小单元光纤面板进行二次切割, 从中筛选出我们想要的小单元面板. 整个切割过程在本研究所的光学精密加工工厂中进行, 可以对六边形小单元光纤面板的厚度进行严格控制, 厚度范围控制在 (2 ± 0.01) mm. 将筛选出的小单元面板打磨、抛光之后, 进行拼接、粘结处理. 拼接、粘结处理在我们设计的木框内进行, 木框的内部面积与目标大尺寸光纤面板面积相对应, 且木框四个边之间采用活动连接, 可拆卸, 木框放置在操作平台上, 底部铺有氟塑料薄膜, 以便在粘结成型后将成型的光纤面板拿下. 在各小单元面板之间的接触面上, 涂上快速固化型环氧树脂胶黏剂, 60 °C 固化 15 min 后, 大尺寸的光纤面板即可成型. 图 7 为采用此方法制作的 59052 像素拼接光纤面板样品的局部照片 (图 7(a)) 和 59052 像素拼接光纤面板样品的照片 (图 7(b)).

3 聚合物光纤面板的主要特征参数

3.1 数值孔径

数值孔径 (numerical aperture, NA) 是表示光纤面板集光性能的一个重要参数, 决定着入射到面板端面上光线的入射角的范围. 只有当入射在光纤端

面上的光线的入射角小于一定角度 θ_m 时, 光线才能满足内全反射条件, 由光纤的一端传向另一端. 定义这个角度的正弦值为数值孔径 NA,

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_m, \quad (2)$$

利用折射定理和反射定律, 推导出数值孔径与制作光纤面板的塑料光纤材料之间的相互关系为

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为光纤芯和包层的折射率. 可知, 纤芯和包层的相对折射率差越大, NA 就越大, 光纤面板的集光性能越好. 本实验中采用的商用 PMMA 光纤, 纤芯和包层分别为 PMMA 和氟塑料, 折射率分别为 1.49 和 1.36. 由此可计算出该光纤面板的数值孔径为 0.61, θ_m 为 37.6°, 也就是说在 37.6° 角内的光线都能被光纤面板接收, 这对于光纤面板与液晶屏紧密接触的光学系统, 基本可以满足技术要求.

3.2 分辨率及光纤面板传像效果

分辨率是指光纤面板分辨图像细节的能力, 分辨率越高, 传递效果越好, 图像越清晰. 光学纤维面板的分辨率主要由构成面板的单根光纤的直径决定, 采用六边形排列的光纤面板的分辨率公式可表示为

$$R_{\text{hex}} = \frac{1}{\sqrt{3}d}, \quad (4)$$

R_{hex} 为六边形排列的光纤面板的极限分辨率, 单位为 lp/mm; d 为构成光纤面板的光纤的单丝直径,

单位为 mm. 本实验中采用的商用塑料光纤的直径为 0.50 mm, 经计算得到光纤面板的理论极限分辨率 R_{hex} 为 1.15 lp/mm.

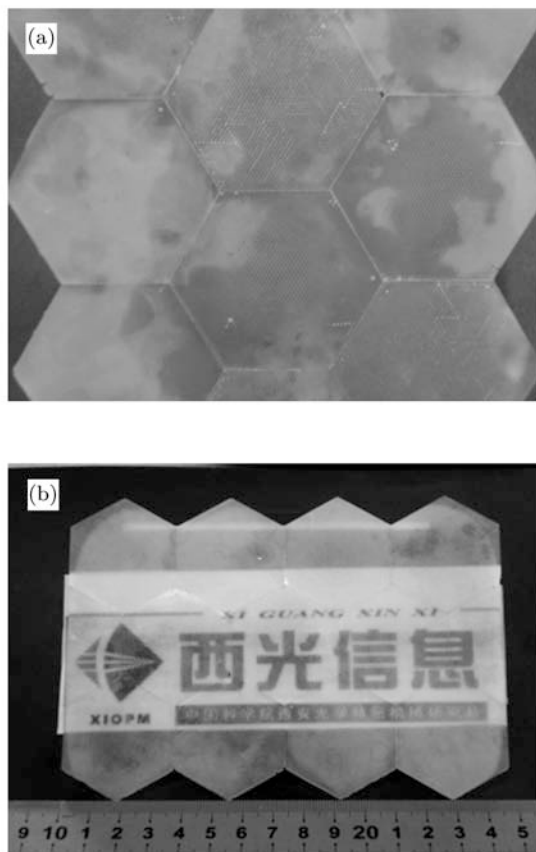


图 7 拟用于 LCD 拼接屏的 59052 像素拼接光纤面板样品照片 (a) 59052 像素拼接光纤面板样品局部照片; (b) 59052 像素拼接光纤面板样品照片; 像素直径 500 μm , 厚度 2 mm

光纤面板的传像效果如图 7 所示, 从中可以看到白纸上的字浮现在光纤面板上, 且没有任何畸变, 传像效果良好. 但由于所采用的商用光纤的直径仍然很大, 导致面板的分辨率受到限制, 对于小尺寸物体的分辨能力较弱. 本实验所制备的光纤面板主要用于大屏幕拼接屏的显示上, 观众在离显示屏较远的地方观看显示屏上的大幅图像, 1.15 lp/mm 的分辨率已经具有足够的清晰度. 本课题组将以此次探索研究为基础, 进一步改进生产工艺和方法, 突破规模化生产塑料光纤面板、光锥等传像光学元件的技术屏障, 进一步提高光线面板的分辨率, 拓展其应用范围.

4 锥形光纤面板的研制

在液晶显示拼接屏中, 因为有液晶显示器的电

路存在, 拼接缝隙较大, 影响图像的连续性. 我们也初步尝试了略带锥形的复合光纤面板的制造工艺. 用 631 根光纤排成六方预制棒, 融并后, 切割成短棒, 适当拉伸后, 再排列热熔并, 加热拉伸, 结果得到了如图 8 所示的具有放大或缩小图像的复合型光纤面板样品. 这种锥形的面板与适当形状的液晶屏组合, 有可能消除因拼接缝带来的显示图像不连续问题.

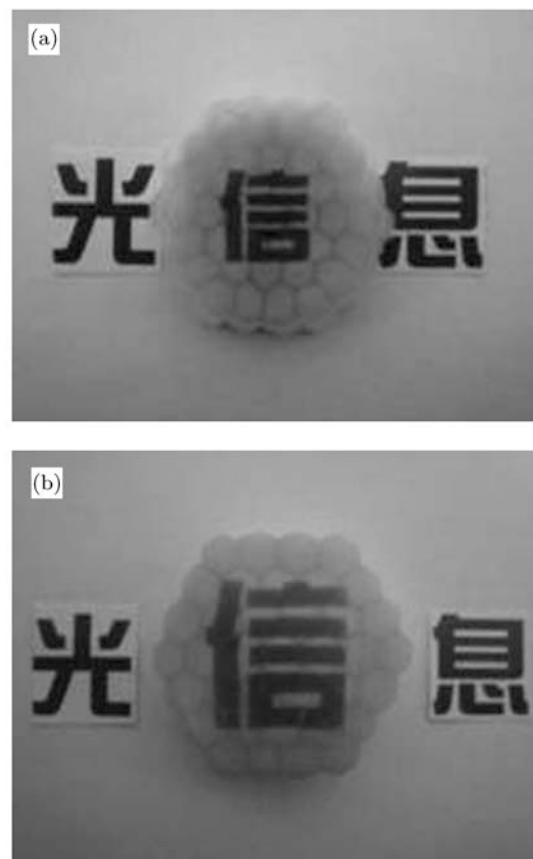


图 8 23347 (631 $\times$ 37) 像素塑料微结构光纤锥对图像的缩小 (a) 与放大 (b) 像素直径大头约 125 μm , 小头 75 μm

5 结论及应用展望

利用堆积 - 热融合工艺, 将商用 PMMA 低损耗光纤以六方堆积的方式排列在自行设计的模具中, 制备了光学聚合物光纤面板预制棒. 采用制备超大尺寸光纤面板的新技术对预制棒进行拉伸、切割、拼接, 制备了像素数为 59052, 像元直径为 500 μm , 极限分辨率为 1.15 lp/mm 的光纤面板样品. 该大尺寸面板对于大尺寸画面具有良好的传递能力. 由于构成光纤面板的光纤单丝直径仍然较

大, 分辨率较低, 对于小尺寸物体的分辨能力显得不足. 利用该技术制备的大尺寸光纤面板可用于大屏幕液晶显示屏的保护和显示屏拼接缝的消除. 应

用前景广阔. 本研究小组将继续探索更高分辨率聚合物光纤面板 (包括锥型面板) 的规模化制造工艺, 制造出高性能、低成本的新一代光纤面板产品.

-
- [1] Liu D S, Yin Z M, Zhu S L 1987 *Fibre Optics* (Beijing: Science Press) p102 (in Chinese) [刘德森, 殷宗敏, 祝颂来 1987 纤维光学 (北京: 科学出版社) 第 102 页]
 - [2] Lee B, Choi W Y, Walker J K 2000 *Opt. Lett.* **25** 719
 - [3] Fiber Optic Elements, Nanoptics Company, 2008 <http://www.nanoptics.com>
 - [4] Optical Fiber Products, Berkshire Photonics, 2009 <http://berkshirephotonics.com>
 - [5] Arradiance Company, 2009 <http://www.arradiance.com>
 - [6] Kong D P, Wang L L 2009 *Opt. Lett.* **34** 2435
 - [7] Kong D P, Wang L L 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 2913 (in Chinese) [孔德鹏, 王丽莉 2009 光子学报 **38** 2913]
 - [8] Wang J, Wang L L 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 1419 (in Chinese) [汪舰, 王丽莉 2009 光子学报 **38** 1419]
 - [9] Wang L L, Kang L J, Chen X H, Yang X H 2007 Patent 200710018133.1 (in Chinese) [王丽莉, 康利军, 陈兴华, 杨兴华 2007 中国发明专利 200710018133.1]
 - [10] Wang L L, Guo S L, Kong D P, Wang J 2008 Patent 200810017410.1 (in Chinese) [王丽莉, 郭昭龙, 孔德鹏, 汪舰 2008 中国发明专利 200810017410.1]
 - [11] Guo T Y, Lou S Q, Li H L, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4724 (in Chinese) [郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷, 简水生 2009 物理学报 **58** 4724]
 - [12] Zhou G Y, Hou Z Y, Pan P F, Hou L T, Li S G, Han Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1271 (in Chinese) [周桂耀, 侯峙云, 潘普丰, 侯蓝田, 李曙光, 韩颖 2006 物理学报 **55** 1271]

Preliminary research on large-size optical polymer image transmitting fiber faceplate*

Wang Jin-Meng¹⁾²⁾ Kong De-Peng¹⁾²⁾ Wang Li-Li^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

(Received 29 April 2011; revised manuscript received 30 May 2011)

Abstract

Preliminary research on large-size optical polymer image transmitting fiber faceplate is carried out by the stacking-heated fusing method with commercial low-loss optical PMMA fiber which is arranged in a home-made mold by hexagonal packing. A fiber faceplate sample with 2 mm in thickness, 500 μm in pixel diameter and 59052 in pixel number, is manufactured by cutting and stitching the preforms. The fiber faceplate sample has a good image transmission capacity. The resulting large-size optical polymer fiber mosaic faceplate screen has the role that cannot be replaced for large-screen LCD protection and elimination of display seam.

Keywords: large-size, polymer optical fiber faceplate, new manufacturing technology, LCD mosaic screen

PACS: 42.81.Qb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60437020) and the National Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA032452).

† E-mail: liliwang@opt.ac.cn