

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0012 - 04

用于红外图像传输的柔性空芯光纤束

石艺尉¹, 朱晓松¹, 松浦祐司², 宫城光信³

(1. 复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433; 2. 东北大学电气通信系, 仙台 980-8579, 日本;
3. 仙台电波工业高等专门学校, 仙台 989-3128, 日本)

摘要:采用聚碳酸酯毛细管作为红外空芯光纤的基管材料, 制作了内直径为 320 微米的细径红外空芯光纤. 内面镀有光滑银膜的聚碳酸酯毛细管, 在近红外和中远红外波段获得了平坦的损耗 - 波长响应特性. 用 224 根镀银聚碳酸酯空芯光纤, 制作了长度 40mm, 截面积约 50mm² 的红外图像光纤束. 利用该红外光纤束成功进行了加热电阻丝的红外热图像传输实验. 红外聚碳酸酯空芯光纤束具有柔韧性强、无毒等特点, 在医疗及工业领域有广阔的应用前景.

关键词:光波导; 红外图像传输; 空芯光纤束; 聚碳酸酯; 镀银

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

FLEXIBLE BUNDLED HOLLOW FIBER USED IN THE TRANSMISSION OF THERMAL INFRARED IMAGE

SHI Yi-Wei¹, ZHU Xiao-Song¹, Yuji Matsuura², Mitsunobu Miyagi³

(1. School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Department of Electrical Communications, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan;
3. Sendai National College of Technology, Sendai 989-3128, Japan)

Abstract: Hollow polycarbonate (PC) fiber with a small bore-size of 0.32 mm was fabricated by using PC capillary as a supporting tube for infrared hollow fiber. The flat low-loss spectrum was attained from the near infrared to the far infrared wavelength regions by using hollow PC fiber inner-coated with a smooth silver film. Infrared fiber bundle was made by using 224 pieces of silver-coated hollow PC fiber with 0.32 mm bore-size. The length of the bundle is 40 cm and the cross sectional area is around 50 square centimeters. Thermal infrared image of a heated wire was successfully transmitted through the bundle. The flexible and non-toxic infrared fiber bundle is a promising transmission medium for applications in medical and industrial field.

Key words: optical waveguide; infrared image delivery; hollow fiber bundle; polycarbonate; silver plating

引言

通过光导纤维的红外成像技术在工业、医疗和军事领域都有着重要的意义. 在微创、无创伤诊断及医疗中, 光纤红外成像技术可根据人体内表面的发热情况, 为诊断和实时优化治疗提供重要的判断依据. 红外光纤束的图像传输研究, 几乎与红外玻璃光纤的研究同步进行^[1,2]. 红外玻璃光纤具有纤径细、损耗低的特点, 光纤束的分辨率和传输距离可以得到一定提高. 但大部分红外玻璃, 如硫卤玻璃和氟化物玻璃等, 有柔韧性差、易潮解或有毒等缺点, 使

红外玻璃光纤在医疗领域的应用受到很大限制.

空芯光纤^[3,4]是一种有发展前景的红外传能光纤. 尤其是它在中远红外波段的低损耗特性使人体内部的低温检测成为可能. 空芯光纤采用均匀的基管作为支撑物. 在基管内面镀银等高反射膜, 成为低损耗激光传输介质后, 称为空芯光纤. 玻璃毛细管是红外空芯光纤最常用的基管之一. 因为玻璃毛细管具有内面平滑, 截面形状稳定且有弹性等优点. 到目前为止, 特性指标较好的红外空芯光纤几乎没有例外均采用玻璃毛细管作为基管. 但玻璃毛细管有一个的缺点: 在实际应用中如不慎被损坏, 会有玻璃碎

收稿日期: 2007 - 04 - 21, 修回日期: 2007 - 12 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助 (60608013)

作者简介: 石艺尉 (1963-), 男, 江苏扬州人, 教授, 主要从事光波导及其在医疗、工业领域应用的研究.

Received date: 2007 - 04 - 21, revised date: 2007 - 12 - 18

片溅出. 这种事故在医疗、半导体加工等某些敏感场所会造成极为严重的后果. 另外, 玻璃毛细管的管壁一般比较厚, 这样也会降低图像光纤束的有效面积. 利用碘化银-银结构的红外空芯玻璃光纤制成的红外光纤阵列^[5]验证了空芯光纤束用于红外图像传输的可行性, 但长度为 2.5cm 的光纤阵列与实用的图像传输要求还相差很远.

利用已商品化的聚碳酸酯管材拉制出的毛细管已经成功用作空芯光纤的基管^[6]. 聚碳酸酯毛细管具有柔性好、管壁薄、安全等特点. 是代替玻璃毛细管的有力候选材料. 我们采用聚碳酸酯毛细管为管材制作了空芯光纤, 进而制备了长度为 40cm 柔性红外空芯光纤束. 用空芯光纤束进行了红外热图像的传输实验. 对加热电阻丝的红外热图像传输试验表明, 红外空芯光纤束无论在直线还是在弯曲的状态下, 热电阻丝的红外图像都可以通过红外热像仪确认.

1 空芯光纤的制作和特性

在波长大于 $2\mu\text{m}$ 的中远红外波段, 石英光纤有很强的红外吸收而无法用于红外光的传输. 空芯光纤采用内面镀金属和介质膜的方法可以在红外特定波长获得低损耗. 在空芯光纤束的制作中, 我们采用镀银膜的方法降低全体中远红外波段的损耗, 因为镀银红外空芯光纤在中红外和远红外有平坦的损耗-波长响应曲线. 为了提高红外光纤束的分辨率, 应该采用细径、壁厚小的空芯光纤. 但空芯光纤的损耗与内径的 3 次方成反比^[7], 芯径过细会增加传输损耗. 壁厚过小会降低光纤的机械强度. 综合以上因素, 我们采用内外径为 320/380 微米的毛细管.

空芯光纤镀银的方法采用液相化学镀膜法, 制作系统如图 1 所示. 硝酸银溶液和葡萄糖溶液分别用作反应液和还原液. 由真空泵吸引, 反应液和还原液在混合器中充分混合后通过聚碳酸酯毛细管束. 被还原的银逐渐沉积在毛细管内壁, 形成光滑的银膜. 图 1 制作系统中所示的聚碳酸酯毛细管束的毛细管数量直接影响镀膜效果, 因为溶液的流量受到通道截面积的影响. 对于内径为 $320\mu\text{m}$ 的毛细管, 没有一定数量的并列很难实现足够的液体流量. 而流量不足则反应液和还原液得不到充分混合. 经过多次试验, 我们采用 40 根毛细管并列制作, 保证了在毛细管内面银的高质量成膜.

我们分两次制作了 80 根镀银聚碳酸酯毛细管. 其内径为 $320\mu\text{m}$, 长度为 1.3 m. 图 2 为镀银聚碳酸

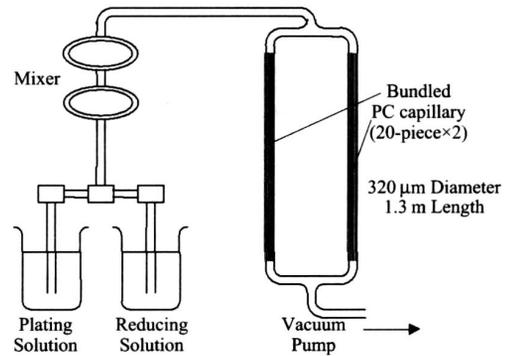


图 1 聚碳酸酯毛细管内壁镀银的实验装置图

Fig 1 Experimental setup for silver film plating on the inner surface of polycarbonate capillary

酯毛细管在可见光到近红外波长范围的损耗谱特性. 测试光源是半高全宽 (FWHM-full width at half maximum) 为 10.5 的高斯分布光源. 在短波长带, 光纤的损耗有明显的增加. 这是因为银膜表面的粗糙度对短波长光有较大的附加损耗. 图 3 为镀银聚碳酸酯毛细管在中红外到远红外波长范围的损耗谱特性. 测试光源是半高全宽 (FWHM) 为 12 的高斯分布光源. 损耗谱中 $2.7\mu\text{m}$ 波长带和 $5\sim 7\mu\text{m}$ 波长带的吸收是空气中水分的特征吸收. 波长 $4.3\mu\text{m}$ 处的吸收峰为空气中二氧化碳的特征吸收. 如果在测试前使氮气流过空芯内径对空芯光纤干燥, 则测试结果中, 这些吸收峰会有明显的减小.

比较图 2 和图 3 中损耗特性, 光纤的损耗特性在 $2\mu\text{m}$ 波长处有一定的差. 这是因为测试评价时所采用的光源特性不同所致. 半高全宽较大的中远红外光源在空芯光纤中激励了更多的高次模式, 因而具有较大的损耗.

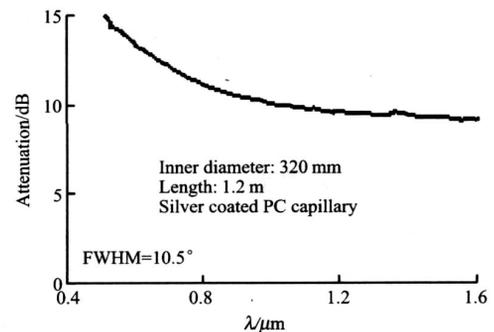


图 2 镀银空芯聚碳酸酯光纤在可见光和近红外波长的损耗谱

Fig 2 Loss spectrum of a silver-coated hollow PC fiber in the visible and the near infrared regions

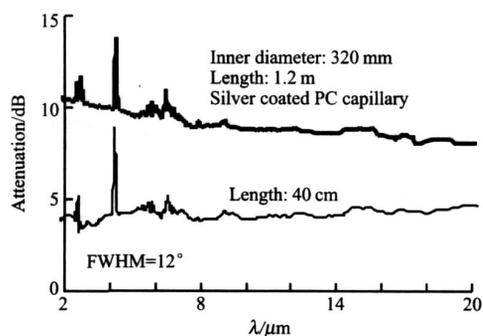


图 3 镀银空芯聚碳酸酯光纤在中远红外波长带的损耗谱
Fig 3 Loss spectra of silver-coated hollow PC fiber in the mid- and the far- infrared regions

2 空芯光纤束的制备

用上述镀银方法制作的 80 根空芯光纤中,对每一根光纤除去两端约 5 厘米长度.因为两端的银膜由于反应液的流速变化,膜表面比较粗糙容易产生较大的附加损耗.然后将长度为 1.2m 的光纤平均分割为长度为 40 厘米的 3 段.在所得到的 240 根长度为 40 厘米的光纤中,会有一些损耗特性较差的光纤.这是由于镀银制作准备时,毛细管束的制备中有可能管束的端面不够整齐.从而造成各个毛细管中溶液流量的不均匀.对于个别反应液流量非常低,甚至因为断面堵塞几乎没有溶液流过的光纤.经过简单测试舍弃不用,因为光纤束中损耗太大的光纤会造成红外图像像素的盲点.

光纤束的制作分两步进行.首先,制备断面为一系列的光纤束.因为是用于图像传输,光纤束两端一一对应.16 根排成一行制作一束平板状光纤束.根据最后性能较好光纤的数量,我们选用 224 根光纤,制作了 14 个平板光纤束.然后,用 14 个平板光纤束,顺次叠加在一起制成截面为矩形的红外光纤束.图 4(a) 为空芯红外光纤束的外形照片.图 4(b) 是光纤束的截面照片.由于采用了细径的聚碳酸酯毛细管,该光纤束具有良好的柔韧性.

3 红外图像传输实验

红外图像传输的实验系统见图 5 所示.由于光纤束的衰减较大,所以我们没有在光纤束两端采用成像元件.同时也因为成像元件会存在非均匀损耗谱,给均衡补偿带来困难.实验测试中,我们仔细调节电阻丝、光纤束和红外热像仪的相对距离,以获得最强的信号输出.线度的标定,利用附加成像点的距离恒定(见图像中的白色方框)来粗略保证.电阻丝

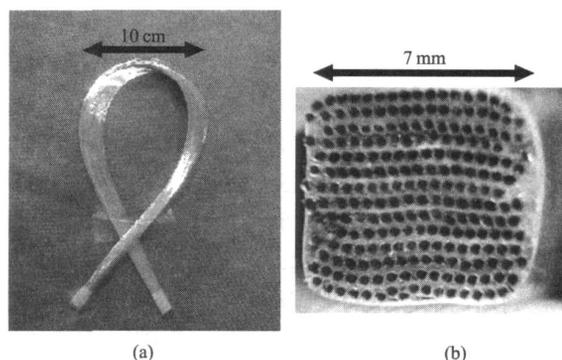


图 4 空芯红外光纤束 (a) 及其截面照片 (b)
Fig 4 Photo of the hollow PC fiber bundle (a) and its cross sectional image (b)

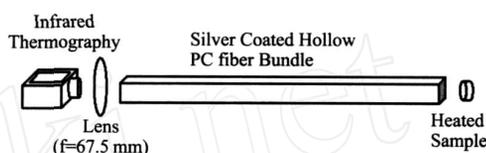


图 5 空芯光纤束的红外图像传输实验装置系统
Fig 5 Experimental setup for the thermal infrared image transmission through hollow PC fiber bundle

用恒流源通电加热后作为红外热像源.其红外图像如图 6(a) 所示,绕成环状的电阻丝清晰可见,其温度约为 140 摄氏度.作为红外热像源的电阻丝置于红外光纤束的输入端.红外热像仪(日本 Avionics 公司产品)在光纤束的输出端探测经过传输的红外图像.图 6(b) 为光纤束保持直线状态下,红外热像仪所摄的输出端红外图像.图 6(c) 为光纤束弯曲状态下的输出端红外图像.光纤束的弯曲角度为 30 度,曲率半径为 30 厘米.尽管红外图像已有失真,但绕成环状的电阻丝的红外图像仍然可以辨认.造成图像失真的原因有两方面:其一是光纤的损耗较大,导致输出端红外光能量变弱;其二是空芯光纤束的分辨率还不够高.弯曲会增加非掠射角反射,增加损耗.当弯曲半径过小时,光纤束中有些光纤会因为输出小,低于红外热像仪的灵敏度.这样的像素会成为盲点而降低分辨率.

红外热像仪是根据物体的放射能量检测物体温度的.黑体放射的能量由其绝对温度决定.根据斯忒藩-波耳茨曼的黑体表面辐射定律,辐射能量与绝对温度的 4 次方成正比.对于温度为 140 摄氏度的电阻丝,经过直线状态的光纤束传输后,显示温度为 50 摄氏度.简单计算(换算为绝对温度后其比值的 4 次方)可以得到,光纤的传输效率约为

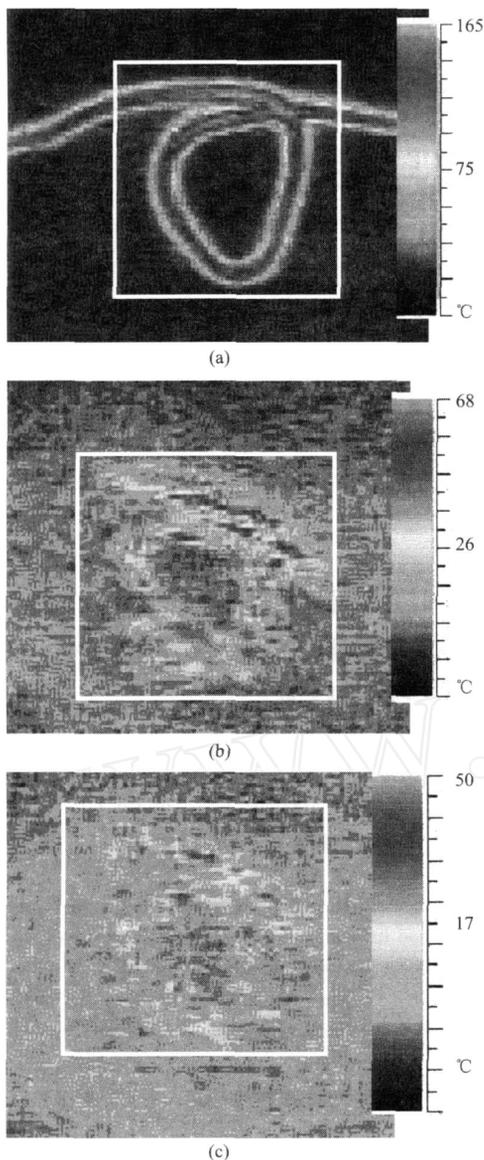


图 6 加热电阻丝的红外图像 (a),电阻丝经过红外光纤束传输的红外图像:红外光纤束直线状态 (b),红外光纤束弯曲状态 (c)

Fig 6 Thermal infrared image of a heated wire (a), thermal infrared image of the wire transmitted through straight hollow fiber bundle (b), and through bent bundle (c)

37%. 与图 3 中长度 40 厘米的空芯光纤在中远红外损耗谱中约 4dB 的损耗值相仿. 经过光纤束传输后,测量温度与实际温度的差值可以根据光纤束的损耗矫正. 传输后的图像失真等也可以用图像信号处理的方法进行纠正^[8]. 根据图 6 (b)和 (c)中的图像可以基本判断电阻丝的弯曲形状,说明该方案是可行的.

针对目前存在的问题,通过加镀介质膜的方法可以大幅度改善光纤的损耗特性. 对于低温物体的测量,红外热像仪通常采用 8 ~ 14 μm 作为测量波段. 膜厚约为 1 微米的透明介质膜可以大幅降低该波段的损耗^[7],从而实现对该测量波段的增敏. 这样可以针对发光物体的温度带或发光波长领域,研制灵活有针对性地图像传输系统. 为了提高光纤束的图像分辨率可以采用细径光纤,但同时也会给光纤束的制作增加一定难度. 该红外成像系统把光纤束中的一根光纤作为一个像素,可以认为分辨率为 16 \times 14. 所以减小内径、减小内外径的差是提高分辨率的手段. 但该手段受到光纤衰减和机械强度的限制.

4 结论

利用镀银空芯聚碳酸酯光纤,制作了长度为 40 厘米的柔性红外空芯光纤束. 红外图像的传输结果证明实验方案可行. 红外图像在输出端因为损耗较大,分辨率不足等原因,有一定程度的失真. 通过加镀介质膜对测量波段增敏,和采用细径光纤的方法有望得到质量更高的红外传输图像.

REFERENCES

- [1] Rave E, Katzir A. Ordered bundles of infrared transmitting silver halide fibers: attenuation, resolution and crosstalk in long and flexible bundles [J]. *Opt Eng* 2002, **41**: 1467—1468
- [2] YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, HUANG Hua-Guo, *et al* Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26** (1): 15—21.
- [3] Nubling R K, Harrington J A. Hollow waveguide delivery system for high-power, industrial CO₂ lasers [J]. *Appl Opt*, 1996, **35**: 372—380.
- [4] Shi YW, Ito K, Ma L, *et al* Fabrication of a polymer-coated silver hollow optical fiber with high performance [J]. *Appl Opt*, 2006, **45**: 6736—6740.
- [5] Gopal V, Harrington J A, Goren A, *et al* Coherent hollow-core waveguide bundles for infrared imaging [J]. *Opt Eng*, 2004, **43**: 1195—1199.
- [6] Nakazawa M, Shi YW, Matsuura Y, *et al* Hollow polycarbonate fiber for Er: YAG laser light delivery [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**: 1373—1375.
- [7] Miyagi M, Kawakami S. Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission [J]. *J. Lightwave Technol*, 1984, **LT-2**: 116—126.
- [8] WANG Chao, YE Zhong-Fu. Variational enhancement for infrared images [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王超, 叶中付. 红外图像的变分增强算法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25** (4): 306—310.