

文章编号:1004-4213(2010)08-1418-6

# 一种基于激光直写的水浊度传感结构\*

李书,方可嘉,吴兴坤

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室光及电磁波研究中心,杭州 310027)

**摘要:**提出并制作了一种基于激光照射改变折射率方法的光度比浊度传感单元,综合了导波光学及检测相关知识原理.以 UV 光敏树脂为基底材料,采用“气体干法”除胶及分步固化的方法获得了该芯片化结构.传感器整个制作过程仅仅需要 7~8 min 因而使本方法具有很高的效率.由直写成型的单元组建传感系统对标准悬浊液样品进行了实验测试,所得的相关数据在 SISO 算法神经网络系统中进行处理,获得了传感器浊度与对应散射系数的关系曲线.通过试剂检验的方法得知实际相对误差在 5% 左右.

**关键词:**激光直写;高聚物;浊度分析;神经网络

**中图分类号:**TN256

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103908.1418

## 0 引言

浑浊度(Turbidity)是衡量饮用水质量的一个重要指标,国内目前的标准是低于 1NTU,而发达国家如美国的标准是低于 0.3NTU,实际值甚至已达到 0.1NTU.人们对此标准的努力追求的突出原因是:浑浊度直接体现水中肉眼不可见的浮游植物(Phytoplankton)等悬浮体的密度,而此类悬浮体目前被认为是水中各种细菌,病毒等有害物的载体;进一步,与浮游植物相关的微粒成为各种细菌,病毒的包裹层,有效降低了氯离子或 UV 对水的消毒能力.因而,实现饮用水浑浊度的高准确度及实时测量对人健康具有重大的实际应用意义.现有的一些浊度检测仪器存在着结构复杂,体积偏大等缺点<sup>[1,2]</sup>,特别是进口检测仪器价格昂贵.为实现浑浊度检测装置微型化,芯片化的发展更新,国际各研究机构对此进行了探索.常见的途径是利用红外光的散射或者透射方法来进行液体浑浊度的测量,此种途径能够极大的提高检测的灵敏度,并明显缩小装置体积,而同时该类检测装置的制作以及光路校准上对准确度的要求高,不易于控制实现,并且由于结构较为复杂,使得制作周期偏长.本文通过光学波导结构设计确定了一种小型化测试单元的基本结构,并借助于激光直写技术制作出该结构样品,利用实际测量对浊度准液测试组进行了对比,在数据处理过程中采用神经网络算法中进行个体芯片的自整定定标,获得了较好的实验结果.用本文中所述方法制成的

浑浊度传感元件制作周期极短,并且由于材料普通能够使得造价甚为低廉.

## 1 器件结构设计及测试原理

生物检测芯片<sup>[3-4]</sup>的特征是在固体芯片表面构建微流体分析单元和系统,从而使系统尽可能精细化,最终实现整个实验或测试装置在小区域的高度集成.本文遵循 ISO7027 标准中关于水浊度测试方法中相应的规定要求进行所有设计.借鉴生物检测芯片的基本思想,并结合波导光学技术,对浑浊度传感单元的新型设计制作方式进行了探索.

浑浊度表现于液体中的固体悬浮颗粒(Suspended solids)对传输光束的散射及吸收能力,能够影响穿过浊液的透射及散射光线的强度.因此,上述两种光线的强度数值可以用来衡量液体样品的浑浊度.目前较多采用双光源四光束浊度检测法<sup>[5]</sup>,具体原理就是使用入射方向相互垂直的两个检测光束对样品进行分别照射,每个检测光在样品中传输将分为透射光、散射光两部分,从特定的角度上采集并获取这两个检测光束的 2 组透射、散射光线(共 4 束)的强度值,就可以经过一定的计算处理来体现样品的浊度大小.图 1 为应用该检测方法的器件及其结构原理图:图 1(a)(以竖直方向的入射光为例)表明,当检测光线进入悬浊试剂,在悬浊液颗粒的作用下会产生散射来削弱透射光,获取相互垂直的透射光和散射光信号强度以便来衡量浊度大小;图 1(b)中对实验测量单元做了进一步描述:为了便于加工和制作,将容纳限制待测样品的波导结构设定为圆环形,并与各通光波导处于同一水平高度上.图中 1、2 为分别为导入两检测光束的普通光纤,3、4 为采

\* 国家自然科学基金(60577025)资助

Tel:0571-87933816

Email:liysue@163.com

收稿日期:2009-12-28

修回日期:2010-03-10

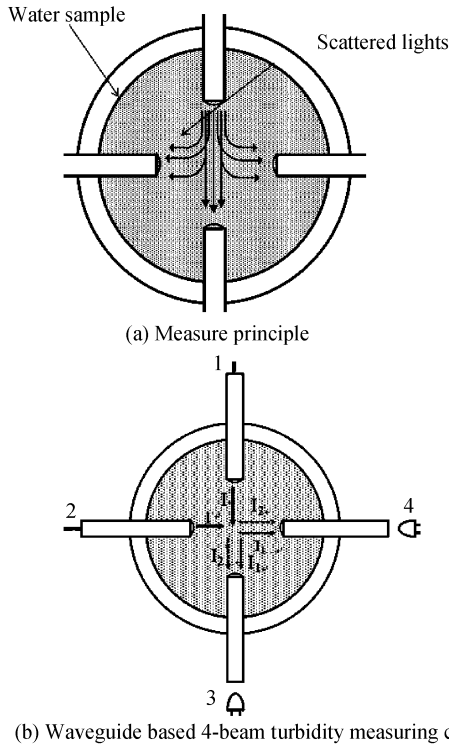


图 1 光束法测量原理和基于波导的 4 光束浊度测试单元结构

Fig. 1 Measuring principle and waveguide based 4-beam turbidity measuring cell

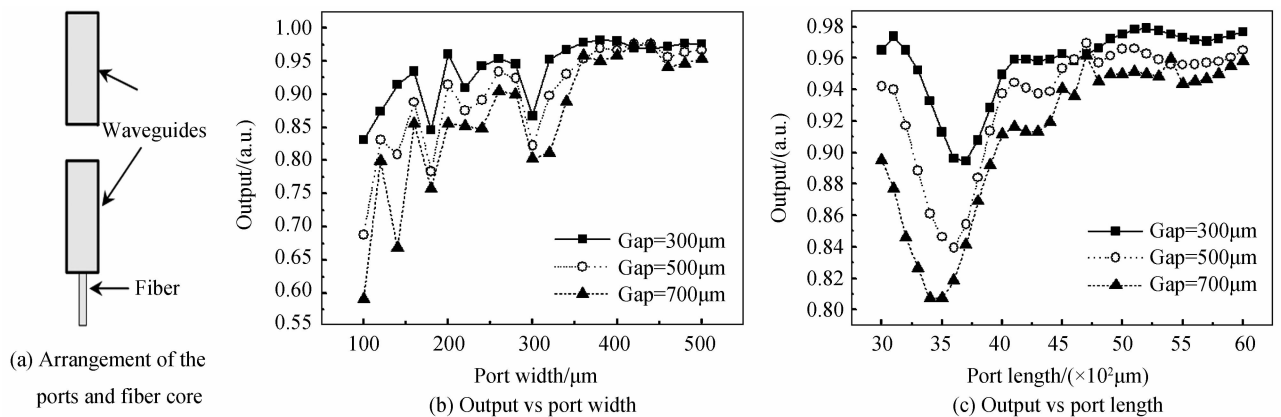


图 2 波导排布示意和不同间隙值条件下输出与波导宽度,长度的关系

Fig. 2 Arrangement of the ports and fiber core and calculated outputs under different gap conditions

能保证传输效率,可以使波导的宽度取值在  $450 \mu\text{m}$  左右,间隙值约为  $500 \mu\text{m}$ ,波导长度则可以控制为  $5\ 000 \mu\text{m}$ .

在进行信号分析处理的时候,考虑到悬浊液对经过其传输的光线不仅有散射作用,在实际操作过程中要将其纳入分析范围.本文用  $F_s$  来表示体现悬浊液浑浊度高低的散射系数,而另外一个参量  $F_a$  则代表悬浊液对光线的吸收系数,设初始进入的光线  $I$  强度为  $P_0$ ,当光束在悬浊液中传输时,透射光  $I_1$  到达波导输入端面的光强为  $P_0 F_a$ ,散射光  $I_2$  到达波导输入端面的光强则为  $P_0 F_a F_s$ ,假定波导损耗与探测器耦合因素等的综合系数为分别为  $S_1, S_2$ ,则

集输出光信号的光电二极管,其后接信号处理电路.整个测量步骤分为两个阶段:1)仅开启与光纤 1 相连的光源,此时系统的输入光线为  $I$ ,光电二极管 3 采集透射光强信号  $I_1$ ,同时光电二极管 4 则采集散射光强信号  $I_2$ ;2)仅开启与光纤 2 相连的光源,此时系统的输入光线为  $I'$ ,光电二极管 3 采集散射光强信号  $I_2'$ ,光电二极管 4 采集透射信号  $I_1'$ .经过这一测量便可获取用于浊度计算的功率参量.此种检测方法的特点是不仅可以利用透射光与散射光的强度关系来确定溶液的浊度,且由于结构的对称特性,并通过两个光源的交替切换进行分次检测,从而降低悬浊颗粒对检测波长产生的不利干扰,可以起到抵消误差的作用,提高测量所获得数据的精确度.

整个结构中重要的组成部分为带状波导,对光源从输入端到输出端之间的耦合效率进行了研究分析,不同间隙参量下的计算结果如图 2(假设两端口之间为空气隙),且波导与背景折射率差为 0.02,所用光源波长  $850 \text{ nm}$ .从图 2(b)可以看出,在不同的间隙值条件下,当波导的宽度超过一定值之后,其变化不会引起太大的输出浮动,而图 2(c)表明,波导长度大约在  $4\ 500 \mu\text{m}$  之后,其值的增大也不再对输出造成大的影响.从上面的结果可以得出,为了尽可

有两光电二极管所检测到的光强信号分别为

$$P_t = P_0 F_a S_1 \tag{1}$$

$$P_s = P_0 F_a F_s S_2$$

而在光源切换之后的散射光  $I_2'$ 、透射光  $I_1'$  信号强度分别为

$$P_s' = P_0' F_a F_s S_1 \tag{2}$$

$$P_t' = P_0' F_a S_2$$

则由表达式(1)和(2)可以推得

$$P_s/P_t = F_s S_2/S_1 \tag{3}$$

$$P_s'/P_t' = S_1 F_s/S_2$$

由此可得与浑浊度相关的散射系数  $F_s = \sqrt{P_s P_s'/P_t P_t'}$ ,从而只要通过光源切换,测量获取两

组光强数据,便可以计算出该浓度下悬浊液的散射系数<sup>[4]</sup>.从计算公式中可以看出,计算结果取决于测试芯片的输出光强,而同测试光源功率大小无直接关系.本文采用了这种4波导结构与测试原理,测试获取不同条件下的透射与散射光强,经过上述的方法计算出与浊度液浊度高低直接相关的散射系数.

采用神经网络算法对经过预计算所获得的散射系数进行处理,以便整合出与系统测试相对应的关系函数,在本文中体现为散射系数与浊度值的关系.此处采用单输入单输出(Single in Single Out, SISO)节点模型进行操作,使用这种处理方式将测试数据的预处理值作为输入,能够防止测试数据在神经元结构运算中产生较大偏差.其算法具体流程如图3,用到标准神经网络结构,散射系数数据经算法处理后直接转化为浊度值.采用一系列的标准液浊度以及与之对应的标准化散射系数来获取神经网络建立的权值参量.一旦网络建立成功,就能够用来处理待测样品所获得的散射系数从而得出其浊度值.

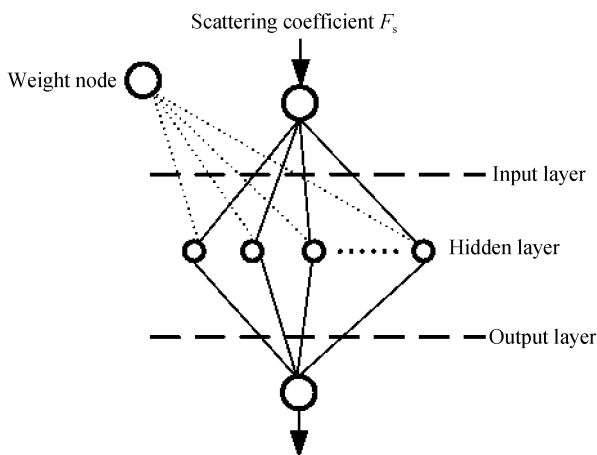


图3 神经网络 SISO 算法流程

Fig. 3 Flow chart of neural network's SISO arithmetic

建立好的神经网络模型可以被存储于固体化 flash memory 当中以备调用.在实时测量前则可以通过使用标准液校准手段进行更新,能够快速获取测试样品的特性,这将为浊度测量提供非常便利的条件.

## 2 测试单元结构制作

在器件结构的制作手段上,一种全新的激光直写加工方法被采用,通过该方式实现了前述波导测试单元的制作.激光直写技术进行光波导器件结构的加工制作并非陌生的加工手段,由该工艺制作普通波导结构如功率分配器等都已见诸文献<sup>[6-11]</sup>.由于该方法不需要进行掩模加工,并且成型快速,可以

极大的缩短加工周期,从而受到较多的研究关注.

图4描绘了本文进行激光直写所采用的装置,其中所示主体部分为德国PI公司(Physik Instrumente, Germany)生产的由C-843板卡控制的高准确度二维平移台,两平台移动方向如图中双向箭头所示,其位移分辨率高达 $0.1\ \mu\text{m}$ ,将直写样品基板放置其上后,利用与平台相连接的计算机控制移动路径,同时使用汇聚激光束对感光胶层进行照射曝光.刻写过程中使用的感光胶基底为生物玻片(Fisher Scientific,  $25\times 75\times 1\ \text{mm}^3$ ),制作过程包括:(a)基板清洗:采用洗涤剂将生物玻片洗涤干净,并蒸馏水里进行浸泡处理,最后在乙醇溶液漂洗脱水;(b)刻写:将光敏UV胶涂覆至玻片表面,控制其厚度在 $300\ \mu\text{m}$ 左右.而后将制作好的基片放置于二维平移台上.采用波长为 $408\ \text{nm}$ 的激光器作为刻写光源,通过聚焦透镜的调节,将投射光斑直径调整为 $0.5\sim 0.7\ \text{mm}$ 左右,对基片进行选择性地曝光处理,设定平移台的运动路径参量,直波导刻写时控制平台移动速度为匀速 $300\ \mu\text{m/s}$ ,在中央圆环刻写时采用变加速模式以保证线型平滑;(c)显影固化:不同于通常的湿法除胶,本文采用一种创新的“风力干法除胶”方式,通过气体喷枪以一定压强和角度对基片进行吹洗,除去98%以上的未曝光胶体,需要注意的是在吹洗过程中要不断调整喷枪与基片的角度从而使效果达到最大化,最后环节添加乙醇喷雾实现完全清洁,从而获得所需要的波导结构.该方法处理效果理想,并且可以明显减少化学溶剂的使用量.显影工序最后利用强紫外光灯箱对器件结构进行更充分的照射,时间为 $3\sim 5\ \text{min}$ ,充分固化UV胶以便增强波导的强度,最终的折射率为1.475.最后将成型的器件结构从玻片上剥离,并转移到另外的小型基台上.实际制作成型的传感单元在图5中给出,其中左图中所示为经过加工成型的波导结构外观,右图中则给出了该结构中央区域波导在显微镜下放大之后的情况.

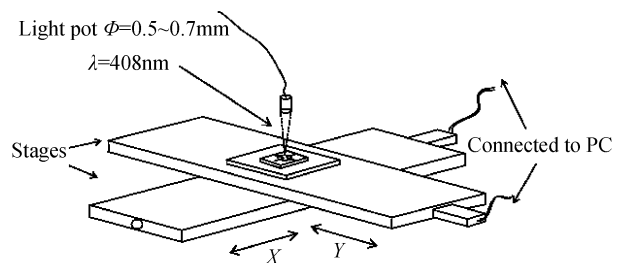


图4 高位移准确度激光直写装置

Fig. 4 Stages of high movement accuracy for laser direct writing

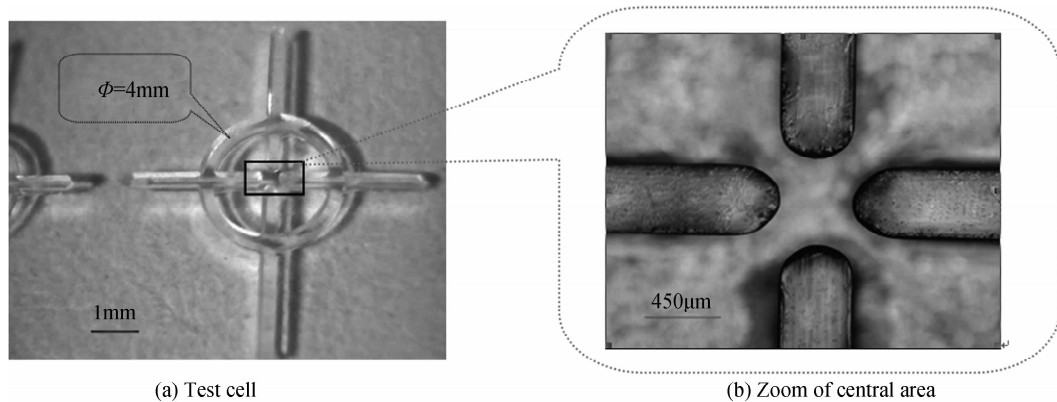


图5 激光直写法制作的浊度测试单元及中央区域放大图

Fig. 5 Test cells fabricated by laser direct writing and zoom of the central area

从图5可以看到,由于激光光斑功率分布特性,直写所完成的波导起始端与结束端均呈现一定的自然弧形其外观呈汇聚透镜状,这一特殊结构恰好可以使光线从输入波导进入待测样品时的发散角度降低,这样就能够提高光束进入输出波导时的耦合效率.应用 ZEMAX 软件对平型端面和球形端面进行模拟比较结果如图6,证明了球形结构的汇聚效应将起到很好的聚光作用,能够显著降低光束的发散角度,这就有利于实验进行中提高信源光线最终进入输出波导的耦合效率.

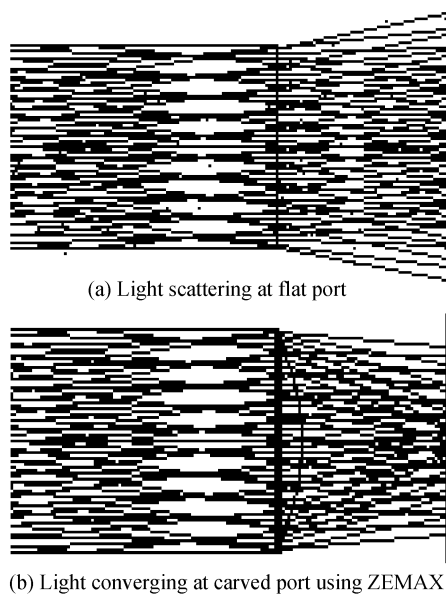


图6 ZEMAX 中光线模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of ray tracing

采用感光胶固化的方法将两根普通单模光纤连接在直写好的直波导端面上,光纤连接波长为 850 nm 的红外激光作为检测输入光源.

为了保证光纤与波导连接的耦合效率,波导以及光纤端面均预先经过切齐整处理.在输出波导的端面附近分别安放接收用光电二极管,光电二极管接入信号处理电路,用于通过浊度液的透射光和散射光强度信号采集处理,实际的系统装置如图7,相

关的后续信号处理电路部分未包括在其中.

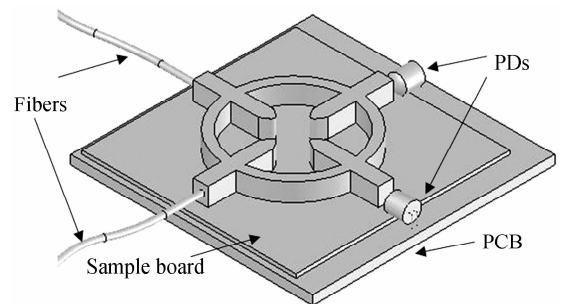


图7 浊度测试单元与光电二极管所组成的板载测试系统

Fig. 7 On board testing system constructed by test cell and PDs

此测试单元的特点在于波导以及集成,而采用纯粹光纤来实现的情况是将远处的光源传递到探测器,而要实现这一四端口结构,如果光纤必须考虑最小弯曲半径 15 mm 左右,整个结构的规格就要大于  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  了.虽然在测试时为了简化用到了光纤将光源引入,本文中提及的波导结构亦适用于当要实现微型化时 PD、LD 进一步集成化的情况,可以尝试直接实现光源与波导的耦合.迎合了 Lab-on-a-chip 的发展要求,而在这种条件下,波导的传输损耗将不占据主导地位.另外就制作工艺本身来看,该方法极其方便,整个加工过程可以控制在数分钟以内,且所用材料易于获取,成本低廉.

### 3 实验及结果分析

采用浊度值为 800 NTU 的福尔马胂标准液作为母液,从其中分别取出一定量的悬浊液并对其进行稀释,配制浊度值为 600, 400, 300, 200, 100, 80, 50, 20 (NTU) 的待用样品组.实验测试时按照从低浊度到高浊度的顺序,依次抽取少量待用样品进行测量并获取相对应的信号数据,并且在每次的测量操作之后均采用蒸馏水对测试单元进行反复清洁处理并风干,防止测量试剂浊度受到干扰而偏离理论值,以便尽量降低对实验可能带来的不利影响.对该

组标准化的浊度液试剂进行多次测量比较,综合选取数据,用来进行预处理.

预处理环节所获得的散射系数以及相对应的浊度值作为神经网络 SISO 算法系统进行计算的输入组项,在系统神经元数目为 12 的条件下经过训练之后获得的散射系数-浊度关系曲线在图 8 中给出. 其中的系列点为实验测量点,虚线为拟合的关系曲线,单从其中实际的程序计算数据结果之间的关系来看,由于测量环节中的不确定性以及系统误差的原因,使得测试结果并不是非常理想的线性,而且在个别点处出现较大的偏移,但在数据结果分布的上升趋势上还是符合理论的. 当系统训练结束之后,用于建立神经网络的参量被存储起来,以便于对待测试剂进行测量. 取一系列试剂放入测试系统进行测量,相关散射系数数据被传送到建立好的神经元系统中,并计算出对应的浊度值. 通过相对误差公式

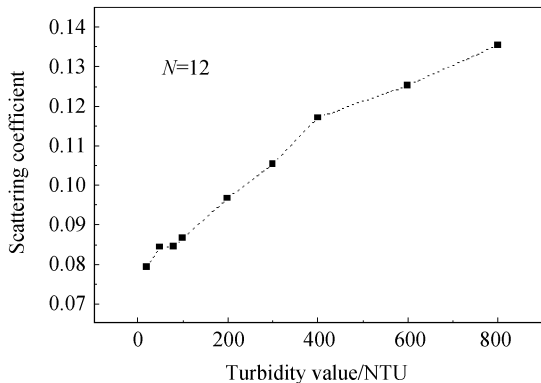


图 8 实验数据处理所得浊度和散射系数关系  
Fig. 8 Result plot between turbidity value and scattering coefficient

$$\varepsilon = \frac{TU - TU^{NN}}{TU} \times 100\% \quad (4)$$

计算得出对实际试剂测量时产生的相对误差在 5% 左右,其中 TU 为期望值,  $TU^{NN}$  为程序计算结果. 同时继续取 20NTU 浊度的样品进一步稀释,获取一系列低浊度测试组,用于系统的灵敏度检验,实验结果表明,系统的最低响应浊度在 5NTU,对于更低浊度的样品试剂则不具备检测能力,传感器仍存在很大的改进空间.

除去对个别点作用明显的随机误差,分析系统误差的主要产生原因,  $F_s$  作为 NN 处理环节的输入,其数值的获得受到多方面的因素影响;由本文所采用的计算公式  $F_s = \sqrt{P_s P_s' / P_t P_t'}$  依赖于芯片的光学对称性,当芯片制作过程的非对称因素引入后,该公式实际近似于

$$F_s = \left[ \frac{P_s}{P_t} \cdot \frac{P_s'}{P_t'} \cdot \frac{S_{M \rightarrow 4} S_{M \rightarrow 3}}{S_{1 \rightarrow 3} S_{2 \rightarrow 4}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中  $S_{M \rightarrow 4}$ ,  $S_{M \rightarrow 3}$ ,  $S_{1 \rightarrow 3}$  和  $S_{2 \rightarrow 4}$  分别代表芯片中点

(M)到 4 端口,中点(M)到 3 端口,1 端口到 3 端口以及 2 端口到 4 端口的综合耦合系数. 同时假设了这些系数仅与结构有关,与待测液体的浊度无关. 当输入组数据代入 NN 计算系统进行处理,对结构固有参量的拟合传递过程将各浊度段进行均衡,也对结果产生影响偏差. 因此要取得更好的数据结果,必须要对上述内容综合考虑,保证测量进行的条件,从而尽可能降低以上因素条件对最终结果所造成的误差,并且使所得数据更贴近于理论. 而对于低浊度的试剂测试结果表明该结构的响应度能力仍存在进一步优化改进的余地,主要在于实验当中的测量条件以及探测器的灵敏度等等,需要进一步综合改善.

## 4 结论

本文基于 ISO7027 浊度检测标准,综合了导波光学与检测知识理论,利用全新的激光直写手段,获得了用于悬浊液浊度测试的波导微型结构,在直写过程中用到了独特创新的除胶方法,提高了制作效率. 新的设计思路将集成光学优势带入浊度检测应用,实现对现有的检测方式的改进. 通过实际测试获得了相关的数据结果. 作为一种新的设计概念和制作方法,对于检测器件的芯片化、集成化起到了一定的推进作用. 本文所涉及的内容作为跨学科领域的研究尝试,虽然从结果来看并不完美,但是作为一种新的探索,期望能够通过波导直写及实验测试环节进行继续改进和优化,进一步提高系统灵敏度以及准确性,从而使该传感系统更加优化.

### 参考文献

- [1] ZHANG Dao-de. Design of the digital turbidity sensor based on infrared ray[J]. *Optoelectronic Technology*, 2004, **24**(4): 246-256.  
张道德. 基于红外线的数字式浑浊度传感器设计[J]. *光电子技术*, 2004, **24**(4): 246-256.
- [2] PAVELICH P M. Turbidity studies at the national water quality laboratory [R]. Turbidity and Other Surrogates Workshop, 2002, Reno, NV.
- [3] QI Heng, CHEN Tao. Research of polymers used in fabrication of biochip[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 138-141.  
祁恒,陈涛. 高聚物生物芯片材料激光加工性能分析[J]. *激光技术*, 2005, **29**(2): 138-141.
- [4] MEI Lin, SONG Shi-yuan, ZHA Zhong-yong, et al. progress in the study on bio-chip[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(2): 70-71.  
梅林,宋世远,查忠勇,等. 生物芯片发展现状和未来[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(2): 70-71.
- [5] GARCIA A, PEREZ M A, GRILLO G J, et al. A new design of low-cost four-beam turbidimeter by using optical fibers[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2007, **56**(3): 907-912.
- [6] PEREIRA J M D, POSTOLACHE O, GIRZO P S, et al. SDI-12 based turbidity measurement system with field calibration capability [C]. CCECE 2004 - CCGEI 2004,

- Niagara Falls, Maylmai, 2004, 4: 1975-1979.
- [7] LI Feng-you, XIE Yong-jun, SUN Qiang, *et al.* Analyzing of line profile for laser direct writing lithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 136-139.  
李凤有, 谢永军, 孙强, 等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 136-139.
- [8] LI Feng-you, LU Zhen-wu, XIE Yong-jun, *et al.* Laser direct writing system with cartesian and polar coordinate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **131**(5): 616-619.  
李凤友, 卢振武, 谢永军, 等. 直角坐标和极坐标系一体的激光直写设备 [J]. *光子学报*, 2002, **131**(5): 616-619.
- [9] OLIVERO M, SVALGARAAD M. UV-written integrated optical 1×N Splitters [J]. *Opt Express*, 2006, **14**(1): 162-170.
- [10] ISABELLE H, PHILIPPE G, DOMINIGUE B. Fabrication of polymer waveguides and spot size converters by UV induced refractive index modification [C]. *SPIE*, **5825**: 290-299.
- [11] WANG Yue, WU Yuan-da, LI Jian-guang, *et al.* Fabrication of hybrid Sol-Gel SiO<sub>2</sub> optical waveguide devices by UV Light imprinting [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, **28**(7): 1130-1133.  
王跃, 吴远大, 李建光, 等. 紫外光直写杂化溶胶凝胶 SiO<sub>2</sub> 光波导器 [J]. *半导体学报*, 2007, **28**(7): 1130-1133.

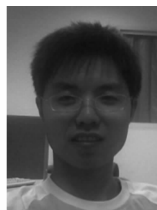
## Laser Direct Writing Based on Turbidity Sensor Structure

LI Shu, FANG Ke-jia, WU Xing-kun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A design of ratio turbidity sensor fabricated by laser refractive index modulation is proposed and tested. Both waveguide theory and detecting knowledge are combined. The turbidity sensing structure is made from UV curable optical polymer and a special “airing dry method” is used to dispose the unexposed part. The whole progress only takes 7~8 minutes and thus this method can greatly promote fabrication efficiency. Experimental test is conducted by using standard turbidity solutions, and the related data are processed with a SISO algorithm neural network system. The results curves are obtained for scattering coefficient and turbidity of the standards, which proves that the sensor system has a relative error rate of 5%.

**Key words:** Laser direct writing; Polymer; Turbidity analysis; Neural network



**LI Shu** was born in 1983. He is currently a Ph. D. degree candidate, and his research interests focus on is micro-optical device fabrication.



**WU Xing-kun** was born in 1961. He received the Ph. D. degree from Stanford University. Now he works as a Doctoral Supervisor, and his research interests focus on modern sensors and micro-optical device fabrication.