

# 新颖的微弯结构 Mach-Zehnder 干涉仪型 传感器及其优化设计\*

邱岳森 肖悦娱 何赛灵

(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,光通信交叉中心,杭州 310027)

**摘要** 介绍了一种改进的 Mach-Zehnder 干涉仪型传感器,采用微弯结构波导代替了传统的 MZ 干涉结构的两臂. 利用三维波束传播法(3D-BPM)对传感器的敏感区域,微弯结构的形状进行了研究,同时研究了微弯结构的振幅和周期对灵敏度的影响,并采用梯度算法对这两个最重要的参数进行综合优化. 模拟结果表明,优化后的传感器敏感度比优化前提高了一倍多.

**关键词** 微弯结构; Mach-Zehnder 传感器; 集成光波导

**中图分类号** TN256; TP212 **文献标识码** A

## 0 引言

在波导中传输的光波的特征参量,如振幅相位、偏振态、波长和模式等,对外界环境因素,如温度、压力、辐射等都能敏感. 因此通过测量传输光波的特征参量就可以实现对各种环境物理量的测量. 以光作为传感和传导媒体的最大优势是传输容量大,抗电磁干扰,以及作为光波载体的光波导中所具有的化学惰性和柔软性. 在智能材料、灵巧结构(smart structure)和大型结构监测、高电压、强磁场、核辐射以及生物医学等方面,光波导传感器是最具竞争力的测量手段之一. 集成光波导传感元件是具有光路系统集成的新型光学传感器结构,它使检测系统变得超小型化,具有稳定性好、精度高等优点<sup>[1]</sup>. 目前,利用集成光波导技术实现的各种类型的传感器正成为当代研究的热点课题之一. 利用马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)原理的干涉型器件灵敏度高、结构简单、制造精度要求低. 因此,在实际中的应用,尤其是在化学和生物传感方面的应用越来越广泛<sup>[2,3]</sup>.

本文介绍了一种新型的 Mach-Zehnder 传感器,采用了微弯传输波导代替了传统的 MZ 干涉仪的两臂. 由于在探测臂上采用了弯折的传输波导,使更多的光能量耦合进探测区中的待探测物质中传播,使得环境物质的折射率对传输光的有效折射率的贡献权重提高,因此对探测区折射率的变化更为敏感. 相对于传统的 Mach-Zehnder 传感器,我们改进的新型 MZ 传感器具有灵敏度更高的优点.

## 1 器件的原理与结构

马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪由两个 3 dB 耦合器

和两个波导臂组成,其基本结构为一对平行光波导,波导两端分别连接一个 3 dB 的 Y 形分束器(如图 1(a)). 通过改变折射率,使光程相应变化,形成相干增强或相消. 利用马赫-曾德尔(M-Z)干涉装置进行传感,就是将其中一臂暴露在环境中,随着外界参量的变化,如温度、浓度、变形、应力等的变化,改变了该臂传输光的有效折射率,从而改变光的相位,使得输出光的干涉结果产生变化,从而达到探测外界环境参量的目的<sup>[4]</sup>. 通常为了提高检测的灵敏度,在参考臂一侧放置了经过标定的,和待检样品相近的标准样品,使得在传感臂和参考臂中传输的光具有相近的损耗和相位变化.

为了进一步提高对环境折射率变化的灵敏度,本文提出了一种新型的波导结构,将传统的直波导结构用微弯结构的传输波导代替(如图 1(b)). 光在微弯结构中传播,更多的光能量耦合进环境物质中,环境折射率对传输光的有效折射率的权重贡献提高,因此对环境折射率的变化更为敏感,可以大幅提高传感装置对环境参量变化的灵敏度.

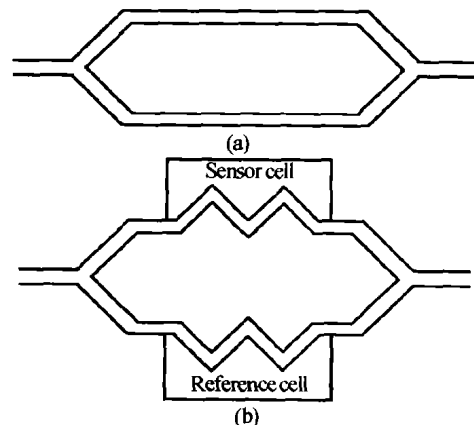


图 1 (a)传统结构的 MZ 干涉装置,(b)新型微弯结构的 MZ 干涉装置

Fig. 1 (a) Conventional MZ interferometer; (b) Novel MZ interferometer with microbending structure

\*国家自然科学基金(60372032)资助项目

Tel: 0571-87951185 Email: diym@coer.zju.edu.cn

收稿日期: 2003-11-13

集成光波导器件中常用的离子交换玻璃波导，具有工艺简单、成本低、适于工业生产等优势。因此，我们将针对离子交换玻璃波导进行设计。玻璃波导的折射率分布为<sup>[5]</sup>

$$n^2(x,y) = \begin{cases} 1 & y < 0 \\ n_b^2 + (n_s^2 - n_b^2)f(y/D_y)g(2x/W) & y > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} f(y/D_y) = \exp(-y^2/D_y^2) \\ g(2x/W) = \frac{1}{2} \{ \operatorname{erf}[W/2D_x(1+2x/W)] + \operatorname{erf}[W/2D_x(1-2x/W)] \} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $n(x,y)$  为波导中  $(x,y)$  点的折射率， $n_b$  为玻璃基底折射率， $n_s$  为表面最大折射率， $W$  为波导宽度， $D_x, D_y$  为  $x$  向， $y$  向扩散深度。（本文中， $n_b = 1.5151, n_s = 1.5231, W = 8\mu\text{m}, D_x = D_y = 8\mu\text{m}$ ）。

## 2 各因素对传感器敏感度的影响

为了研究各种因素对敏感度的影响，定义传感臂和参考臂包层折射率相同时的输出光强为 1，改变传感臂包层折射率后的输出光强与它的比为归一化光强。利用 3D-BPM 程序<sup>[6-9]</sup>进行模拟，改变传感臂的周围待测物质的折射率，分析归一化输出光强与微弯结构各参数的关系。

### 2.1 微弯结构的形状对敏感度的影响

微弯结构可以使波导中的光部分泄漏到待测环境中，从而提高传感器的灵敏度。但是灵敏度的提高与微弯结构的形状有关，本文对三种微弯结构：正弦函数，正弦函数的绝对值以及三角形进行了比较，结果如图 2 所示。（三种形状的幅度和周期相同，周期为  $2000\mu\text{m}$ ，幅度为  $5\mu\text{m}$ ，微弯结构长度为一个周期）

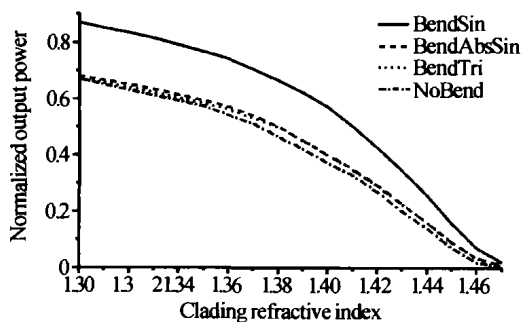


图 2 不同形状微弯结构的归一化光强输出  
Fig. 2 Normalized output light intensity for different shapes of the microbending structure

由图 2 可见，当微弯部分采用正弦函数的形状时，对应于相同的折射率变化，其输出光强的变化量最大，所以选用正弦函数结构的微弯传输波导。

### 2.2 微弯结构周期和振幅的影响

确定了微弯结构为正弦函数后，微弯结构的周

期和幅度对灵敏度也有影响（以下我们固定微弯结构的总长度  $L$  为  $2000\mu\text{m}$ ）。当固定微弯结构的周期不变时，改变微弯结构的幅值；或者固定微弯结构的幅值，改变微弯结构的周期，其灵敏度都随之变化。图 3 是固定微弯结构的周期不变，不同幅值时，归一化输出光强随包层折射率的变化。由图 3 可见，变化的幅值越大，敏感度越高，但是此时损耗也会随着增大。图 4 是固定正弦函数的幅值不变，不同周期时，归一化输出光强随包层折射率的变化。由图 4 可见，敏感度并不是与周期的变化呈线性关系的，不是周期越短，敏感度越高。

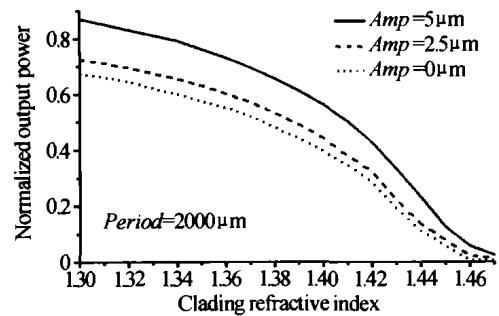


图 3 固定微弯结构周期不变时，幅值变化对敏感度的影响  
Fig. 3 Sensitivity for different amplitudes of the sin microbending for a fix period of the microbending structure

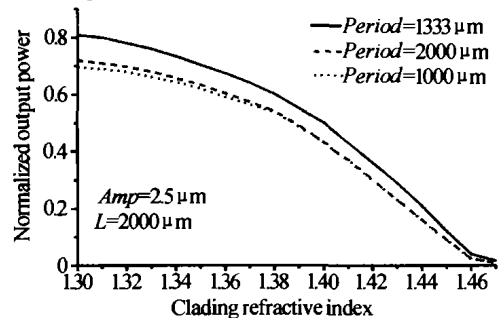


图 4 固定微弯结构振幅为  $2.5\mu\text{m}$  不变时，其周期变化对敏感度的影响  
Fig. 4 Sensitivity for different periods of the sin microbending structure when the amplitude of the sin microbending is fixed to  $2.5\mu\text{m}$

## 3 器件的优化设计及制作工艺

### 3.1 器件的优化设计

通过模拟计算发现，加入微弯结构后，敏感度随结构变化最大的包层折射率变化范围是  $[1.40, 1.45]$ ，且在此区域内，变化趋势几乎为直线，所以取这个区域的斜率为微弯结构灵敏度变化判定的依据，即优化微弯结构时的判据。

定义目标函数

$$f(P,A) = I_1 - I_2 \quad (3)$$

式中  $I_1, I_2$  分别为包层折射率在 1.40 和 1.45 时的归一化输出光强， $P$  为微弯结构的周期， $A$  为微弯的幅度。

在微弯结构的长度  $L(2000\mu\text{m})$  和器件能接受

的损耗范围给定后,通过粗略的扫描发现,敏感度是随结构的周期和幅度呈坡状变化的,所以采用梯度算法来搜索最佳的周期和幅度. 梯度法可以加快搜索的速度和细化搜索的区域,它的迭代过程简单,使用方便,与二维扫描相比具有极大的优越性.

利用梯度算法对对周期和振幅优化搜索的最后结果为

$$\text{amp} = 4 \mu\text{m}, \text{period} = 1428.6 \mu\text{m}$$

(对应的周期数目为 1.4). 其归一化的光强输出随折射率的变化如图 5 所示.

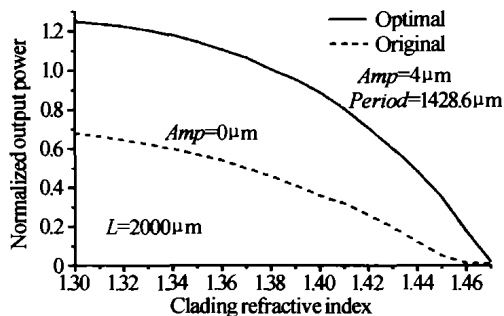


图 5 参数优化后的结构参数与传统直波导结构的对比  
Fig. 5 Comparison of the sensitivities for the conventional sensor and our novel sensor

### 3.2 器件的制作工艺

用 BK7 玻璃作为标准衬底片,利用磁控溅射技术镀一层约 150 nm 厚的铝 (Al) 膜,利用光刻技术在 Al 膜上制作器件的设计图形,在磷酸溶液 ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) 中腐蚀,将掩膜图形转移到 Al 膜上,形成 Al 掩模图案,再将带有 Al 掩模图案的玻璃衬底放入熔融的  $\text{KNO}_3$  熔液 ( $370^\circ$ ) 中进行离子交换 5 h,最后可用如氢氟酸 (HF) 溶液进行湿法腐蚀,制成脊型结构.

## 4 结论

本文采用微弯传输波导代替传统的 MZ 干涉结构的两个臂,提高了传感器对环境折射率变化的敏感程度. 利用 3D-BPM 进行模拟,分析了微弯结构的形状,微弯结构的周期和幅度对传感器敏感度的影响. 同时利用梯度算法,对微弯结构部分的两个重要参数:周期和幅度进行优化,得到了很好的效果,将传感器的敏感程度提高了 1 倍多. 同时,器件的

制作没有涉及任何的特殊工艺,光刻、磁控溅射、湿法腐蚀等标准工艺在波导制作中已经比较成熟,使得我们设计的器件在制作工艺上没有特别的难点.

### 参考文献

- 1 Wagner C, Frankenberger J, Deimel P. Optical pressure sensor based on a Mach-Zehnder interferometer integrated with a lateral a-Si:H p-i-n photodiode. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(10): 1257 ~ 1259
- 2 Luff B J, Wilkinson S, Piehler J, et al. Integrated optical Mach-Zehnder biosensor. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(4): 583 ~ 592
- 3 何玉钧,李永倩,杨志,等. 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪及其在光纤自发布里渊散射测量中的应用. *光子学报*, 2002, 31(7): 865 ~ 869  
He Y J, Li Y Q, Yang Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(7): 865 ~ 869
- 4 李宝军,万建军,李国正,等. GeSi/Si Mach-Zehnder 干涉型调制器的研制. *光电子激光*, 2000, 11(1): 14 ~ 16  
Li B J, Wan J J, Li G Z, et al. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2000, 11(1): 14 ~ 16
- 5 Zhu Ninghua, Lin Yikun, Zheng Dewu, et al. Analytical expressions of the guided mode field distribution: analysis and comparison. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(6): 1424 ~ 1428
- 6 Scarmozzino R, Osgood R M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications. *J Optical Society of America A*, 1991, 8(5): 724 ~ 731
- 7 Scarmozzino R, Gopinath A, Pregla R, et al. Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(1): 150 ~ 161
- 8 林青春,肖悦娱,何赛灵. 基于广角 FD-BPM 的 PML 边界处理方法. *光子学报*, 2002, 31(3): 349 ~ 353  
Lin Q C, Xiao Y Y, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(3): 349 ~ 353
- 9 王谦,黄耐容,何赛灵. 透明边界条件算法的比较研究及改进. *光子学报*, 2002, 31(5): 575 ~ 579  
Wang Q, Huang N R, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(5): 575 ~ 579

## A Novel Mach-Zehnder Interferometer-based Sensor with Microbending Structures and Its Optimal Design

Di Yuemiao, Xiao yueyu, He sailing

*Centre for Optical and Electromagnetic Research, Joint Laboratory of Optical Communications of Zhejiang University,  
State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

Received date: 2003-11-13

**Abstract** A novel Mach-Zehnder Interferometer (MZI)-based planar waveguide sensor is introduced. The microbending waveguides are used in the two arms of the MZI. The sensitive region and the influence of the microbending shape to the sensitivity of the sensor are studied with three-dimensional beam propagation method. The amplitude and period of a sin microbending structure are optimized with a gradient-based search algorithm. The sensitivity of the novel sensor is shown to be much better than that of a conventional MZI-based planar waveguide sensor.

**Keywords** Sensor; Microbending; Mach-Zehnder Interferometer; Planar waveguide



**Di Yuemiao** was born in 1979. He received the Bachelor degree at Department of Optical Engineering, Zhejiang University, in 2001. Currently he is pursuing his Ph. D. degree and his research activities are in design, simulation and fabrication of integrated waveguide sensor.