

# 一种新型集成光学微位移传感器的研究

蔡伯荣 陈 铮 李玉祥  
(成都电讯工程学院) (重庆光电子技术研究所)

## 提 要

本文采用数值孔径( $NA$ )法首次计算了光纤-波导端面的耦合效率和器件的响应特性;全面测试了器件的性能,其理论分析与实验结果符合较好;还讨论了进一步提高器件的探测灵敏度及其实用化的途径。  
关键词: 微位移传感器; 数值孔径法。

## 一、引 言

集成光学传感器除具光纤传感器的许多优点外,还有结构紧凑、坚固,体积小和便于集成等特点。近年来随着信息技术的飞速发展,集成光波导传感器的研究日趋活跃。目前,报道的以光波导为基础的传感器有温度、湿度、电磁场、波前和振动传感器等等。但是,光源本身的不稳定往往对传感器带来一定的影响。1985年S. Honkanen等人提出了一种利用集成光学耦合元件制作的振动传感器<sup>[1]</sup>,特点是该器件不受光源波动的影响。鉴于这种传感器有着广泛的应用前景,我们在此基础上研制了一种新型集成光学微位移传感器,结构如图1所示,是由一根单模光纤和两条相向粘接的沟道波导构成的。与S. Honkanen等人的报道不同的是:本文采用 $NA$ 法计算了光纤-波导端面的耦合效率和器件的响应特性;全面测试了器件的性能,提出了器件实用化的改进途径。

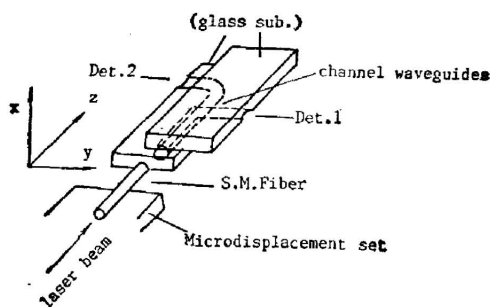


Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the integrated Optical channel waveguides microdisplacement sensor

## 二、工作原理与理论分析

如图1所示,激光经光纤射向上下两沟道波导的端面,并用探测器1、2同时分别测量

收稿日期: 1988年1月19日

从波导的两个输出端的光强。由于外界的影响(如风速,水声,振动或加速度等),光纤将沿  $x$  方向上、下移动,耦合入波导的光强将发生变化,从而波导输出光强随之而变。设两波导的输出光强分别为  $I_1$  和  $I_2$ ,它们将随位移  $x$  而改变,从而可以定义如下的响应率

$$R(x) = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (1)$$

观察  $R(x)$  的变化就能确定光纤的位移,从而确定外界因素的特性。由于  $R(x)$  是光强的相对值,所以光源波动不会对它产生影响,它只与光纤端面和波导端面的相对位置有关。

器件工作时,光纤-波导端面光的耦合是关键,本研究设计的沟道波导其厚度为  $40 \mu\text{m}$ ,深度约  $11 \mu\text{m}$ ,属于多模波导。为了简化计算,我们采用  $NA$  法<sup>[2]</sup>,并假定:(1) 光纤输出的激光近似为高斯光束,(2) 激光束以小于沟道波导的数值孔径对应的角度入射时都能被波导接收和导引来计算光纤-波导端面的耦合效率。图 2(a) 示出了当激光束从单模光纤端面(端面中心坐标  $c(x_0, y_0, 0)$ )以  $\theta(x, y, z)$  角入射到波导端面某点  $p(x, y, z)$  的情况。图 2(b) 是光纤输出的高斯光束示意图,图中  $\phi$  为高斯光束的等相面,其上点  $Q$ (与波导端面  $P$  点对应)与光轴的夹角为  $\theta'$ 。显然,当高斯光束的光轴与波导端面的法线平行时,则

$$\theta = \theta' \quad (2)$$

高斯光束的场分布可写成<sup>[3]</sup>

$$E(x, y, z) = \frac{c}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right) \exp(-i\phi) \quad (3)$$

式中:  $r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2$ ,  $\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2\right]^{1/2}$ 。

$\omega(z)$  为高斯光束宽度;  $\omega_0$  为束腰半径; 其中  $f = \pi/\lambda\omega_0^2$ 。(3) 式中的  $c$  为一常数,而等相面  $\phi$  有如下关系

$$\phi(x, y, z) = k \left[ z + \frac{r^2}{2\mathcal{R}(z)} - \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{f}\right) \right] \quad (4)$$

式中,波矢  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为光波波长;  $\mathcal{R}(z) = z + (f^2/z)$ 。

现按图 2(b) 示,对  $\phi$  取梯度得,

$$\sin \theta' = \frac{\partial \phi}{\partial r} / \left[ \left(\frac{\partial \phi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

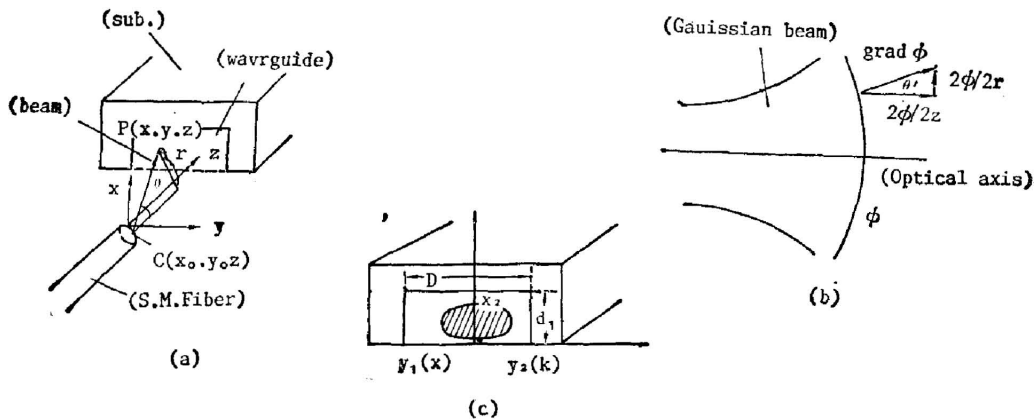


Fig. 2 Schematic diagram of the fiber-waveguide coupling effect

再由数值孔径的定义可得<sup>[6]</sup>

$$\sin \theta = N \cdot A = [n_1^2(x, y) - n_2^2]^{1/2}. \quad (6)$$

于是按(1)式得

$$[n_1^2(x, y) - n_2^2]^{1/2} = \frac{\partial \phi}{\partial r} / \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

式中:  $n_1(x, y)$  为波导折射率;  $n_2$  为衬底折射率。由此方程便可确定一条如图 2(c) 所示的闭合曲线, 按前述的基本假设, 在此曲线围绕的面积内, 入射光束将被耦合入波导。由式(4)和(7)以及图 2(c) 上所设各量即可求得该曲线的如下形式的表达式

$$\left. \begin{aligned} y_1(x) &= y_0 - \left[ \frac{-2A(x-x_0)^2 + B - (B^2 - 4AC)^{1/2}}{2A} \right]^{1/2}, \\ y_2(x) &= y_0 + \left[ \frac{-2A(x-x_0)^2 + B - (B^2 - 4AC)^{1/2}}{2A} \right]^{1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $A = k^2(N \cdot A)^2(z + f^2/z)^2$ ,  $B = 4k^2(z^2 + f^2)^2[(N \cdot A)^2 - 1] - 2k(z + f^2/z)^2(z^2 - f^2)(N \cdot A)^2P$ ,  $C = P^2(N \cdot A)^2(z + f^2/z)^2$ ,  $P = 2k(f^2 + z^2) - 2f(f^2 + z^2)$ 。

图 2(c) 中的  $D$  为波导宽度;  $d_1$  为波导深度;  $x_1$  和  $x_2$  的值可由方程式(7)令  $y = y_0$  时求得。

由于可以忽略波导折射率沿其宽度方向的变化, 故式(8)中的  $N \cdot A$  仅为  $x$  的函数, 并可写成<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} N \cdot A &= [n_1^2(x) - n_2^2]^{1/2} \\ &= \left\{ \left[ n_1 - (n_1 - n_2) \left( \frac{x}{d} + b \frac{x^2}{d^2} \right) \right]^2 - n_2^2 \right\}^{1/2} \quad (0 \leq x \leq d_1). \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $n_1$  为表面折射率;  $n_2$  为衬底折射率;  $b$  和  $d$  为特定常数。

因为假定入射角  $\theta$  很小, 则光场平行和垂直入射面偏振的透射率近乎相等, 设它为  $T(\theta)$ 。则可求得光纤-波导端面的耦合效率为

$$\eta(x_0 y_0 z) = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} T(\theta) I(x, y, x_0, y_0, z) dx dy}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(x, y, x_0, y_0, z) r dr d\theta}. \quad (10)$$

式中透射率可表示成<sup>[5]</sup>

$$T(\theta) = \sin(2\theta) \sin(2\theta_t) / \sin^2(\theta + \theta_t).$$

$\theta_t$  为折射角, 且满足

$$\sin \theta = n_1(x) \sin \theta_t.$$

现将式(3)代入式(10)最后求得

$$\eta(x_0 y_0 z) = \frac{2}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} \frac{T(\theta) \cdot \exp \left[ -\frac{2\eta^2}{\omega^2(z)} \right]}{\omega^2(z)} dx dy. \quad (11)$$

于是按器件的两个沟道波导输入耦合的情况, 其响应率即可写成

$$R(x) = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2}. \quad (12)$$

### 三、器件制备与测试结果

我们是在玻璃衬底上先蒸铝(厚约  $0.4 \sim 1 \mu\text{m}$ )后光刻, 再进行 Ag-Na 离子交换制作的

波导, 波导宽  $40\ \mu\text{m}$ , 深  $11\ \mu\text{m}$  左右, 弯曲部分曲率半径为  $7.5\ \mu\text{m}$ , 根据 Winkler 提出的方法<sup>[6]</sup>, 在此情况下, 导模在弯曲后的辐射损耗只有  $0.1\ \text{dB}$ , 大大小于吸收和散射损耗, 将做好的波导端面抛光, 把同一条件下制得的两块样品相向粘接, 最后将它与端面抛光的芯径为  $5\ \mu\text{m}$  的单模光纤组合成如图 1 所示的微位移传感器。为避免光在两波导间发生耦合, 调整其间空气隙的厚度是必要的。

将单模光纤的输出端固定在精度为  $0.1\ \mu\text{m}$  的微位移装置上, 调整光纤使之与传感器两沟道波导的中心对准。测试时, 将 He-Ne 激光束经透镜耦合入光纤, 这时输出激光射向波导端面, 沿  $x$  方向移动光纤, 同时用光功率计测量两波导的输出光功率。

测试结果如图 3 所示: 图中  $x_1$  为两波导的间距;  $z$  是光纤与波导端面间距。图 3(1) 分别示出三种不同  $z$  值时, 归一化光强  $I$  与位移  $x$  的变化关系, 图 3(2) 是相应的响应率  $R(x)$  与  $x$  的变化关系, 其中实线是按 (11) 式和 (12) 式计算的理论结果, 黑点和  $\times$  为实测值。从图可见, 理论计算与实测结果吻合较好。在所示的三种情况下, 可探测的最小位移分别为 (a)  $0.022\ \mu\text{m}$ , (b)  $0.028\ \mu\text{m}$ , (c)  $0.023\ \mu\text{m}$ 。其动态范围分别是  $1.6\ \mu\text{m}$ ,  $2.2\ \mu\text{m}$  和  $5.8\ \mu\text{m}$ 。

为要实地应用, 需进一步提高器件探测灵敏度, 其途径是: (1) 提高光探测器的灵敏度, (2) 降低波导损耗, (3) 减小光纤-波导以及波导-波导间距。

该器件结构简单, 无需参考光束, 为在加速度, 振动, 流速等测量中开发应用, 应配上微机信号处理系统, 以便对响应率进行实时的讯号分析。

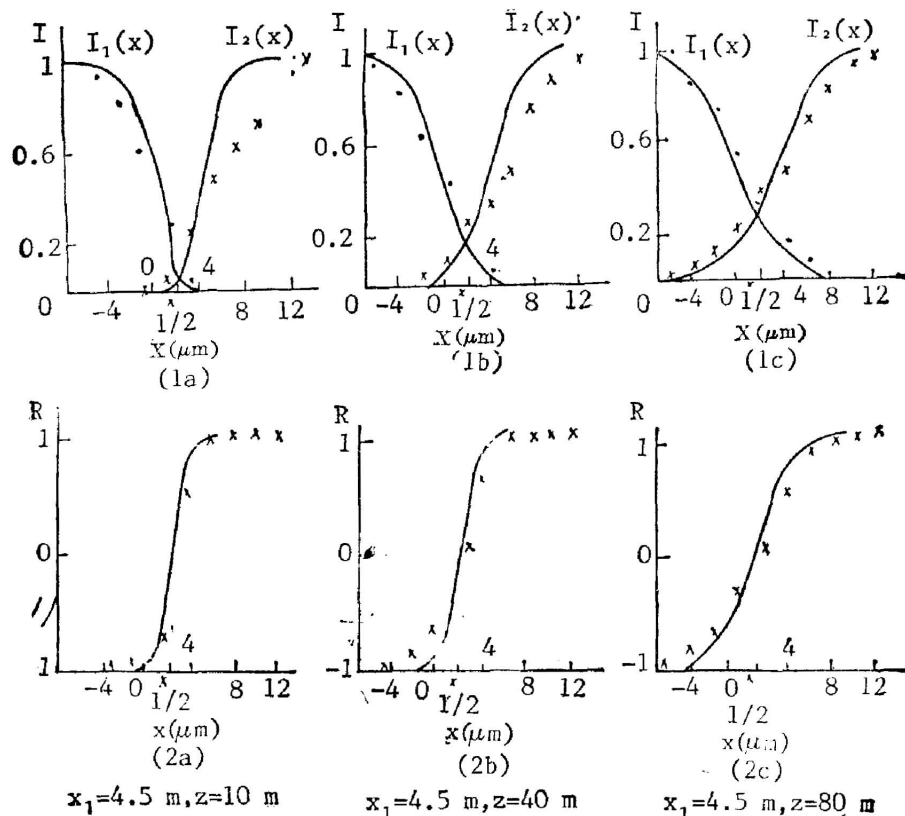


Fig. 3 Diagram of response characteristics of the sensor

## 参 考 文 献

- [ 1 ] S. Honkanen *et al.*; «*Proceedings of the Third European Conference, ECIO'85 Berlin*», (Germany, May 6~8, 1985,) 5~8.
- [ 2 ] 叶培大等;《光波导技术基本理论》, (人民邮电出版社, 北京, 1981), 168~171。
- [ 3 ] 周炳琨等;《激光原理》, (国防工业出版社, 北京, 1980), 348~350。
- [ 4 ] G. Stewart *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**, No. 4, (Apr), 192~200.
- [ 5 ] 曲林杰等;《物理光学》, (国防工业出版社, 北京, 1980), 36~42,
- [ 6 ] C. Winkler *et al.*; *Optical and Quantum Electronics*, 1979, **11**, No. 2 (Mar.) 173~183.

**Investigation of a novel integrated optics  
microdisplacement sensor**

CAI BORONG, CHEN ZHENG

LI YUXIANG

(Chengdu Institute of Radio Engineering)

(Chongqing Institute of Opto-Electronics Technology)

(Received 19 January 1988)

**Abstract**

This paper reports a novel integrated optics microdisplacement sensor which has been fabricated in our Labs. based on S. Honkanen's proposal. The *NA* approach is firstly used for calculating the characteristics of the sensor and all the performances of the device are measured. The theoretical analysis and experimental results are in agreement basically. Several ways to improve the sensitivity of the device are presented. The sensor could be used in a wide area, such as vibration, acceleration and acoustic sensing etc.

**Key words:** microdisplacement sensor; *NA* Approach.