

文章编号: 1001-3806(2007)01-0074-03

## 新型反谐振反射光波导传感器的研究

成娟娟, 谢 康\*

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

**摘要:** 为了寻找到性能更好、灵敏度更高的光波导传感器, 在传统反谐振反射光波导结构的基础之上, 提出了一种新型反谐振反射光波导传感器, 对其反射率和传输损耗进行了模拟, 并计算了它的灵敏度。结果表明, 与传统表面均匀传感型反谐振反射光波导传感器相比, 新型传感器直接将待测的样品作为波导层并且采用了周期结构的反共振层, 使大部分光束集中在样品中传播, 从而降低了传输损耗, 提高了传感器的灵敏度, 为波导传感器的制作提供了一定的数值参考。

**关键词:** 集成光学; 反谐振反射光波导; 反射率; 倏逝场; 传输损耗; 灵敏度

**中图分类号:** TP212.14      **文献标识码:** A

### Study of an anti-resonant reflecting optical waveguide sensor

CHENG Juan-juan, XIE Kang

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054, China)

**Abstract** In order to find a more effective and sensitive waveguide sensor, a new kind of structure of anti-resonant reflecting optical waveguide (ARROW) based on the traditional ARROW is proposed. Its reflectivity and transmitted loss are simulated and its sensitivity is calculated. Comparing with traditional surface homogeneous sensing ARROW sensors, as waveguide is directly constructed by the sample and a periodic structure is adopted, the beam is mostly confined in the waveguide and the transmitted loss is effectively deduced, then, the sensitivity is greatly improved.

**Key words** integrated optics; anti-resonant reflecting optical waveguide; reflectivity; evanescent field; transmitted loss; sensitivity

### 引 言

近年来, 随着集成光学技术的发展, 光学传感技术也得到了飞速发展。集成光学技术利用类似于半导体集成电路的方法, 把光学元件以薄膜形式集成在同一衬底上形成集成光路, 它解决了传统光学系统体积大、稳定性差, 光束的对准和准直困难等特点。而集成光波导传感器是集成光学技术的一个重要应用领域, 它的感应和传递信息的媒质是直接制作在芯片上的介质光波导。

传统波导的波导与硅基底之间的折射率系数差异较大, 若将波导直接构建在硅基底上, 将会有很大一部分能量损失在硅基底上, 因此必须在两者之间成长一层厚的缓冲层, 成长这一层缓冲层必须有很好的厚膜技术, 而且成本较高。1986年, DUGUAY 等人提出了反谐振反射光波导 (anti-resonant reflecting optical

waveguide ARROW) 技术<sup>[1]</sup>。它的出现解决了这些技术上的难题。它在材料的选择上具有多样性, 且在制作上对各层材料的折射率和厚度有很好的容忍度。ARROW 的工作原理是将利用波导与硅基底之间的一层 Fabry-Pérot 反射层来将光束局限在波导层中传输, 具有单模、损耗小的特点。由于 ARROW 在减小泄露能量的同时, 也相对增加了倏逝场在样品材料中的能量分布, 从而使波导的灵敏度得到提高, 因此, 对于集成光波导化学传感器来说, ARROW 结构是非常合适的选择<sup>[2~5]</sup>。传统的 ARROW 结构利用波导中导模的倏逝波探测波导表面附近样品材料的特性变化, 从而改变光波的相位或振幅, 然后利用合适的光路和电路进行探测来得到样品材料的信息。但由于分布于样品材料的导模倏逝场有限, 故灵敏度不高。作者提出的一种新型结构的 ARROW 传感器在很大程度上解决了这一问题。

### 1 反谐振反射光波导原理

#### 1.1 ARROW 结构<sup>[6]</sup>

与传统的光波导采用全内反射 (total internal re-

作者简介: 成娟娟 (1980-), 女, 硕士, 从事光波导传感器研究。

\* 通讯联系人。E-mail kangxi@uestc.edu.cn

收稿日期: 2005-11-18 收到修改稿日期: 2006-03-16

flecting TR)不同, ARROW 的波导层与第 1 覆盖层界面有很高的反谐振反射特性, 反射率可以达到 99% 以上, 其折射率分布如图 1 所示。图 2 为 ARROW 结构中光传输示意图。由于它是一种漏膜波导, 在波长为 632.8nm 时, TE 高阶模和所有的 TM 模式基本上都被折射到衬底中, 只有 TE<sub>0</sub> 模式的损耗较小, 所以 ARROW 结构可以看作是一种单模波导。

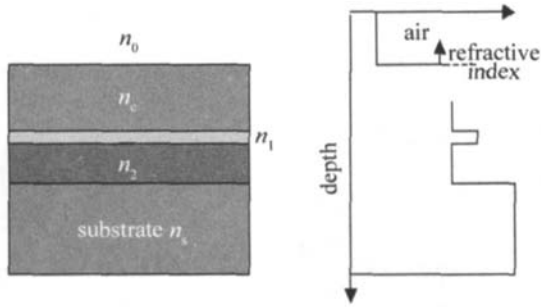


Fig 1 Structure and index profile of ARROW

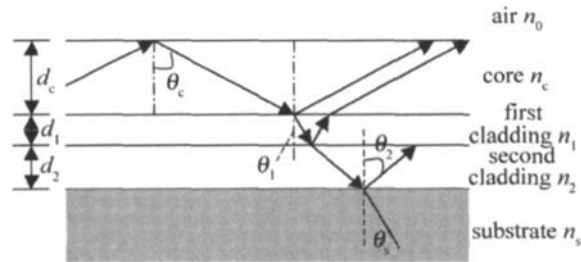


Fig 2 Schematic of beam transmitting in the ARROW

图中,  $n_0$  为空气折射率,  $n_c$  为波导层折射率,  $n_1$  为第 1 覆盖层折射率,  $n_2$  为第 2 覆盖层折射率,  $n_s$  为衬底折射率, 而且  $n_0 < n_c = n_2 < n_1 < n_s$ 。  $d_c$  为波导层厚度,  $d_1, d_2$  为两覆盖层厚度。

根据反谐振条件, 可以得到各覆盖层的近似厚度为<sup>[7]</sup>: 
$$d_{1(2)} \approx \frac{\lambda}{4n_{1(2)}} \left[ 1 - \left( \frac{n_c}{n_{1(2)}} \right)^2 + \left[ \frac{\lambda}{2n_{1(2)}d_c} \right]^2 \right]^{-1/2} \times (2m + 1), (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$
 式中, 整数  $m$  表示第 1 覆盖层和第 2 覆盖层中反谐振(干涉)阶数, 通常取  $m = 0$  使覆盖层厚度最小,  $\lambda$  为工作波长,  $d_c'$  为波导的有效厚度<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} d_c' \approx d_c + \xi \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_c^2 - n_0^2}} \\ \xi = \begin{cases} 1 & \text{for TE mode} \\ n_0^2/n_c^2 & \text{for TM mode} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

若  $n_2 = n_c$ , 利用近似关系, 则  $d_c' \approx d_c$ , 第 2 覆盖层的厚度计算公式可以简化为:  $d_2 \approx d_c(2m + 1)/2 \quad (3)$

传播常数为:  $\beta_v = k_0 n_c \cos \theta_{(v)} \quad (4)$

式中,  $v = 0, 1, 2, \dots$  模阶数,  $k_0 = \lambda/2\pi$  是真空中波矢。

### 1.2 基于 ARROW 结构的新型传感器设计

在上述结构的反谐振反射光波导中, 光束在  $n_0/n_c$  界面发生全反射而在样品材料中产生的倏逝场, 于是

可获得样品材料的折射率及厚度等参数的信息。但是倏逝场在样品层中的分布毕竟有限, 所以采用一种改进的方法, 直接将要探测的样品作为 ARROW 结构的波导层。由于绝大部分光束能量分布在波导中, 所以由样品折射率微小改变引起的变化可以很容易探测得到, 从而使波导的灵敏度得到了很大的提高。图 3 是波导层为液体的反谐振反射光波导的结构和折射率分布图。

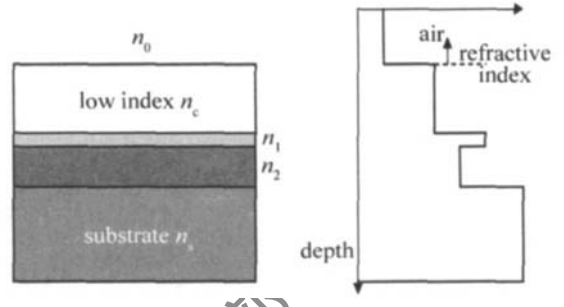


Fig 3 Structure and index profile of ARROW with liquid core

由于采用液体构成波导层, 故此结构中各层的折射率关系为  $n_0 < n_c < n_2 < n_1 < n_s$ 。下面是对反谐振反射波导特性的数值模拟。

从图 4 可以看出, 与普通的 ARROW 结构相比, 由于波导层的折射率较低导致了反谐振反射特性不高,

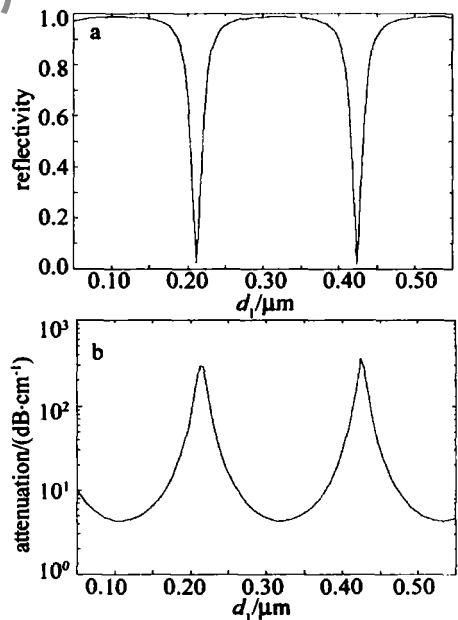


Fig 4 Reflectivity and transmitted loss of TE fundamental mode at different thickness of first cladding ( $n_0 = 1.0, n_c = 1.33, n_1 = 2.0, n_2 = 1.46, n_s = 3.8, d_c = 4\mu\text{m}, d_2 = 0.2605\mu\text{m}, \lambda = 633\text{nm}$ )

波导的传输损耗较大。为了提高反射率, 减小传输损耗, 又进一步提出了一种周期结构的 ARROW (见图 5) 使其具有较高的反折率和较小的传输损耗, 从而满足传感器的设计要求。其中折射率  $n_N = \begin{cases} n_1, N = 2M - 1 \\ n_2, N = 2m \end{cases}$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ )。采用矩阵传输法进行数值模拟分析, 得出不同在数目反谐振层下 ARROW 的反射率和波导

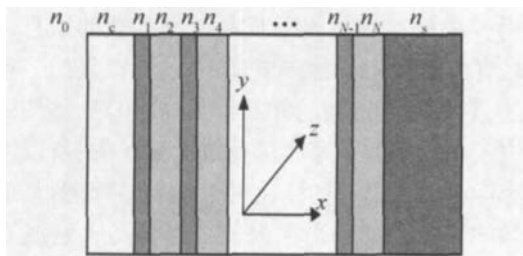


Fig 5 Multilayer ARROW

Table 1 Characteristic parameters of multilayer ARROW (TE fundam ental mode  $n_0 = 1.0$ ,  $n_c = 1.33$ ,  $n_{2m-1} = 2.0$ ,  $n_{2m} = 1.46$ ,  $n_s = 3.8$ ,  $d_c = 4\mu\text{m}$ ,  $d_{2m} = 0.2605\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 633\text{nm}$ ,  $m = 1, 2, 3$ )

waveguide structure	the optimized thickness of $2m - 1$ st cover/ $\mu\text{m}$	waveguide loss/(dB $\cdot \text{cm}^{-1}$ )	reflectivity
$n_0/n_c/n_1/n_2/n_s$	0.1045	4.3240	98.59%
$n_0/n_c/n_1/n_2/n_3/n_4/n_s$	0.1045	0.7213	99.77%
$n_0/n_c/n_1/n_2/n_3/n_4/n_5/n_6/n_s$	0.1045	0.1184	99.96%

同材料交错沉积而成,在制作的过程中容易造成物质相互污染;而且,多层镀膜时需要精确地控制各项工艺参数,薄膜厚度很难精确控制,这两方面问题都会制约波导传感器的性能。

## 2 传感器灵敏度分析

### 2.1 基于 ARROW 结构的表面均匀传感器灵敏度

在折射率测量中,假设待测物质均匀覆盖在波导的表面,在待测物质中倏逝场的渗透深度远远小于待测物质的覆盖厚度,这种传感器称为均匀传感器<sup>[9]</sup>(如图 6所示)。则波导的灵敏度定义为波导的有效

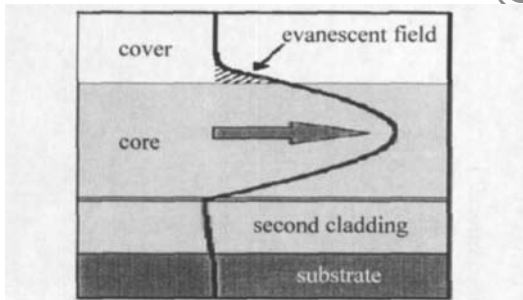


Fig 6 Homogeneous sensing

折射率  $n_e$  随待测物质折射率  $n_v$  变化而变化的速率,

即  $S = \frac{\partial n_e}{\partial n_v}$ 。波导的灵敏度可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\partial n_e}{\partial n_v} = \frac{n_v}{n_e} \left[ 2 \left( \frac{n_e}{n_v} \right)^2 - 1 \right] \rho \frac{P_v}{P_t}, \quad \rho = \begin{cases} 0 & \text{for TE mode} \\ 1 & \text{for TM mode} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $n_e$  为波导的有效折射率,  $n_v$  为待测物质折射率,  $P_v$  为导模分布在待测物质中的能量,  $P_t$  为导模能量的总和。由 (5) 式可以得出: 波导的灵敏度与导模模场分布在待测物质中的能量成正比。图 7 是对待测物质为水 ( $n_v = 1.33$ ) 时的 TE 基模的灵敏度进行的计算。从图 7 计算结果可知, 采用较薄的波导层才能获得较高的灵敏度, 因为这样可以获得较大的倏逝场深度, 从

传输损耗。从表 1 不难看出, 增加反谐振层的数量可以大大提高反射率, 从而将光束有效地限制在波导层中, 降低了传输损耗。在 TE 模式下, 采用 3 对  $n_1/n_2$  交替的反谐振层使反射率达到 99.96% 而传输损耗减小到 0.1184dB/cm。

此种结构的波导可采用物理<sup>[8]</sup>或化学气相方法沉积制作。但亦可看到, 这种结构的波导是由两种不

而使待测物质中有较大比例的导模能量分布。

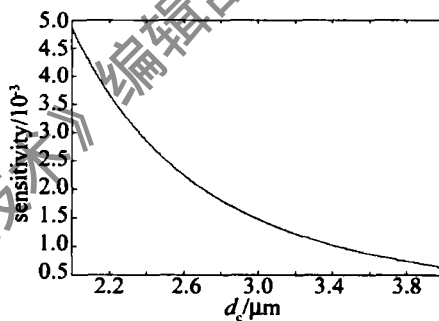


Fig 7 Sensitivity of ARROW for homogeneous sensing at different thickness of core

### 2.2 新型 ARROW 结构传感器的灵敏度

由光波导灵敏度的定义可知, 增加待测物质中导模模场的能量分布可以提高波导的灵敏度。对于作者提出的新型结构传感器来说, 由于此种传感器将待测的物质作为波导层, 使得绝大部分的导模模场能量都分布导芯中, 根据灵敏度计算公式可知, 此种结构波导传感器的灵敏度将得到极大的提高。图 8 为波导灵敏

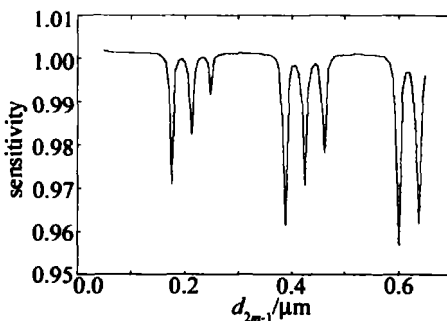


Fig 8 Sensitivity of ARROW at different thickness of the  $2m - 1$ th layer ( $n_0 = 1.0$ ,  $n_c = 1.33$ ,  $n_{2m-1} = 2.0$ ,  $n_{2m} = 1.46$ ,  $n_s = 3.8$ ,  $d_c = 4\mu\text{m}$ ,  $d_2 = 0.2605\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 633\text{nm}$ ,  $m = 1, 2, 3$ ,  $N = 6$ )

度与第  $2m - 1$  层薄膜厚度的关系曲线图。从图中不  
(下转第 101 页)

是非常有意义的。

存在的问题是: 如果隔离沟腐蚀过有源层的话, 会引起漏电流的增加, 会降低激光器的有源区的增益<sup>[10][11]</sup>, 这将成为在减小寄生电容的同时要解决的关键问题。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] JIANG J P. Semiconductor laser [ M ]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2000. 109~ 124 ( in Chinese ).
- [ 2 ] LIAO X B. Study on the modulation bandwidth of the ultrahigh speed semiconductor lasers [ J ]. Study on Optical Communications, 1990, 2 ( 1 ): 36~ 46 ( in Chinese ).
- [ 3 ] ALLOVON M, QUILLLEC M. Interest in A GaInAs on InP for optoelectronic applications [ J ]. IEEE Proceedings Optoelectronics, 1992, 139 ( 2 ): 148~ 152.
- [ 4 ] TH IJI P J A, THEM IJER L F, BINSMA J J M *et al*. Process on long-wavelength strained-layer InGaAsP quantum-well semiconductor lasers and amplifiers [ J ]. IEEE J Q E, 1994, 30 ( 3 ): 477~ 499.
- [ 5 ] ZHANG B J YIM B, LID H *et al*. High-frequency and high-power InGaAsP/InP SPB-BC lasers [ J ]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25

( 5 ): 385~ 390 ( in Chinese ).

- [ 6 ] POGOSSIAN S P, GALL H E, GIERALTOWSKI J *et al*. Determination of the parameters of rectangular dielectric waveguides by new effective methods [ J ]. Journal of Modern Optics, 1995, 42 ( 2 ): 403~ 409.
- [ 7 ] KUMAR A, CLARK D F, CULSHAW B. Explanation of errors inherent in the effective-index method for analyzing rectangular core waveguides [ J ]. Opt Lett, 1988, 13 ( 12 ): 1129~ 1131.
- [ 8 ] BOWERS J E, KOREN U, MILLER B I *et al*. High speed polyimide-based semitransparent planar buried heterostructure [ J ]. Electron Lett, 1987, 23 ( 13 ): 1263~ 1265.
- [ 9 ] LIU G L, ZHANG B J, ZHU H L *et al*. High-frequency planar buried-heterostructure DFB lasers fabricated by proton implantation [ J ]. Semiconductor Optoelectronics, 2000, 21 ( 4 ): 245~ 248 ( in Chinese ).
- [ 10 ] NAGARAJAN R, FUKUSHIMA T, CORZINE S W *et al*. Effects of carrier transport on high-speed quantum well lasers [ J ]. A P L, 1991, 59 ( 19 ): 1835~ 1837.
- [ 11 ] GRABMAIER A, HANGLEITER A, FUCHS G *et al*. Low nonlinear gain in InGaAs/InGaAs separate confinement multiquantum well lasers [ J ]. A P L, 1991, 59 ( 24 ): 3024~ 3026.

( 上接第 76 页 )

难看出, 此新型波导传感器第  $2m - 1$  层薄膜厚度变化范围在  $0.05\mu\text{m} \sim 0.65\mu\text{m}$ , 其理论灵敏度都在 0.95 以上, 比均匀传感型波导传感器的灵敏度提高了两个数量级。而且, 与图 7 中的均匀传感型 ARROW 相比, 此新型波导传感器对厚膜技术要求不高, 在一定程度上解决了波导制作技术上的难题。

### 3 结 论

在传统反谐振反射光波导基础之上, 提出了一种新型结构的光波导。对其反射率和传输损耗进行了模拟, 在理论上获得了性能较好的波导结构, 并对波导的灵敏度进行了估算。与传统的表面均匀传感型波导相比, 此种波导结构是将待测样品直接作为波导层, 并采用周期结构的反谐振层, 灵敏度得到了很大提高, 为波导传感器的制作提供了一定的数值参考。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] DUGUAY M A, KOKUBUN Y, KUCH T L. Antiresonant reflecting optical waveguide in  $\text{SiO}_2$ -Multilayer structures [ J ]. A P L, 1986,

49 ( 1 ): 13~ 15.

- [ 2 ] BERNINI R, CAMPOPIANO S, ZENI L *et al*. ARROW optical waveguides based sensors [ J ]. Sensors and Actuators, 2004, B100 ( 2 ): 143~ 146.
- [ 3 ] BABA T, KOKUBUN Y. Dispersion and radiation loss characteristics of antiresonant reflecting optical waveguides: numerical results and analytical expressions [ J ]. IEEE J Q E, 1992, 28 ( 7 ): 1689~ 1700.
- [ 4 ] YIN D, BARBER J P, HAWKINS A R *et al*. Integrated optical waveguides with liquid cores [ J ]. A P L, 2004, 85 ( 16 ): 3477~ 3479.
- [ 5 ] PRIETO F, SEPULVEDA B, CALLE A *et al*. Integrated Mach-Zehnder interferometer based on ARROW structures for biosensor applications [ J ]. Sensors and Actuators, 2003, B92 ( 2 ): 151~ 158.
- [ 6 ] KUBIA J M. A rigorous design method for antiresonant reflecting optical waveguides [ J ]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6 ( 12 ): 1460~ 1462.
- [ 7 ] BABA T, KOKUBUN Y, SAKAKI T *et al*. Loss reduction of an arrow waveguide in shorter wavelength and its stack configuration [ J ]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1988, 6 ( 9 ): 1440~ 1445.
- [ 8 ] HAN X X, ZHU D Q, NING N *et al*. Investigation on the preparation of advanced polymer thin film for waveguides [ J ]. Laser Technology, 2004, 28 ( 3 ): 315~ 318 ( in Chinese ).
- [ 9 ] PRIETO F, LIQBERA A, JMENEZ D *et al*. Design and analysis of silicon antiresonant reflecting optical waveguides for evanescent field sensor [ J ]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2000, 18 ( 7 ): 966~ 972.