

文章编号:1007-2985(2011)05-0059-03

# 基于双面金属包覆介质波导灵敏度的研究\*

冉茂武

(铜仁学院物理与电子科学系, 贵州 铜仁 554300)

**摘 要:**利用双面金属包覆介质波导色散方程,通过微扰近似,当波导层为亚毫米量级时有  $N \rightarrow 0$  的特性,得到超高阶导模与偏振无关. 定义了灵敏度,得到了灵敏度与有效折射率、厚度、波长和介电常数的关系,当有效折射率趋于零时,超高阶导模具有极高的灵敏度. 该理论在制备生物传感器、光电子器件中具有指导意义.

**关键词:**光波导;色散方程;有效折射率;灵敏度

中图分类号:O435.1

文献标志码:A

介质光波导是在光波导器件和集成光路中用于限制和传输光的元件,根据其几何结构形状不同,它可以分为光纤波导<sup>[1]</sup>、平板波导<sup>[2]</sup>、条形波导和 Y 分支波导<sup>[3]</sup>等,介质光波导中传输光的波长通常处于可见光和近红外波段范围,研究光波导通常以电磁场理论和介质光学特性的理论为基础. 由于象金或银这样的贵金属在可见光和近红外波段范围内,它的介电常数为复数,其实部相对于虚部来说,往往是一个较大的负数<sup>[4]</sup>. 因此,可以把贵金属用来作为在光波导的覆盖层和衬底,于是后来相继出现非对称金属波导<sup>[5]</sup>和双面金属包覆介质波导<sup>[6-8]</sup>. 这些波导已经在波导干涉仪、调制器、模数转换器、光开关、光功分器和生物传感器等得到广泛应用. 但是,不管是光纤波导,还是平板波导、条形波导、Y 分支波导以及非对称金属波导和双面金属包覆介质波导,都没有对灵敏度进行深入研究.

笔者以双面金属包覆介质波导色散方程为基础,经过理论分析,并利用微扰近似导出导模衰减全反射(ATR)谱的特性,以及超高阶导模对波导层的厚度、折射率和波长的灵敏度公式,对设计与制作出高性能的集成光子器件的发展有重要指导意义.

## 1 超高阶导模的 ATR 谱

如图 1 所示是双面金属包覆介质波导结构,其中  $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$  分别是空气、银膜和波导层的介电常数,且  $\epsilon_1 = \epsilon_{1r} + i\epsilon_{1i}$ . 上层银膜  $h_1$  的厚度约为 30 nm,下层银膜  $h_3$  的厚度约为 200 nm,当波导层的  $h_2$  为亚毫米尺度时,波导层容纳数千个导模. 把双面金属包覆介质波导放在如图 2 所示  $\theta/2\theta$  转台上,利用自由空间耦合技术<sup>[9]</sup>进行角度扫描,可以得到如图 3 所示的衰减全反射(ATR)谱,当激光光束入射角  $\theta$  满足共振匹配角时,入射光可以直接耦合进入波导层,激发一系列分立的导模. 由于这些模的有效折射率  $N$  相当小,模序数特别大,因而称之为超高阶导模<sup>[10-11]</sup>.

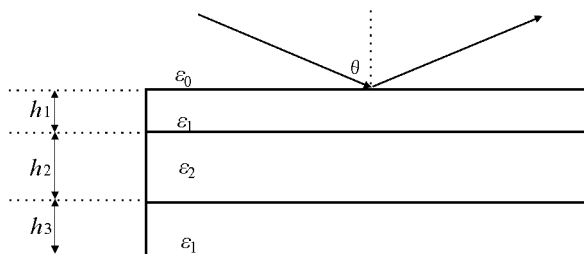


图 1 双面金属包覆介质波导

\* 收稿日期:2011-08-11

基金项目:“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室基金资助项目(2011GZKF031107);贵州省教育厅自然科学基金资助项目(2008098);铜仁学院教改资金资助项目(院教改 2008)

作者简介:冉茂武(1971-),贵州沿河人,铜仁学院物理与电子科学系副教授,主要从事生物传感器和光波导设备及其参数测量研究.

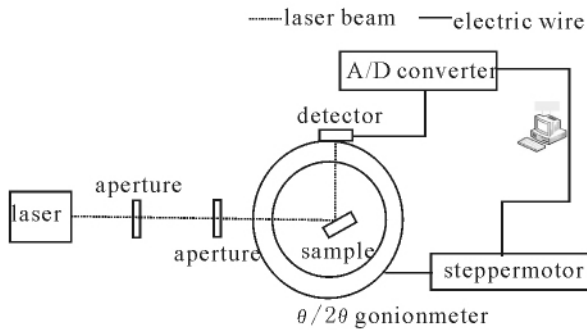


图 2 角度扫描装置

3 层平板介质波导的色散方程<sup>[12]</sup> 为

$$\kappa h = m\pi + \arctan\left(\frac{p_0}{\kappa}\right) + \arctan\left(\frac{p_2}{\kappa}\right), \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} \kappa = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}, \\ p_0 = (\beta^2 - k_0^2 n_0^2)^{1/2}, \\ p_2 = (\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}. \end{cases} \quad (2)$$

其中  $n_0$  是覆盖层的折射率;  $n_1$  是波导层的折射率;  $n_2$  是衬底的折射率;  $h$  是波导层的厚度.当覆盖层和衬底同为金属材料时, 波导层为介质时, 称之为双面金属包覆介质波导, 则可以令  $p_0 = p_2 = p$ . 于是由(1)式可以得到双面金属包覆介质波导的色散方程为

$$\kappa h_2 = m\pi + 2\arctan\left(\rho \frac{p}{\kappa}\right), \quad (3)$$

其中有

$$\rho = \begin{cases} 1 & \text{TE 模式,} \\ \epsilon_1/\epsilon_2 & \text{TM 模式.} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \kappa = (k_0^2 \epsilon_2 - \beta^2)^{1/2}, \\ p = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_2)^{1/2}. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_2} \sin \theta$ ;  $k_0$  为激光在真空中的波数. 当波导层的厚度  $h_2$  为亚毫米尺度时, 则  $m \gg 1000$ . (3) 式可以近似为

$$\kappa h_2 = m\pi. \quad (6)$$

将  $\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_2} \sin \theta$ ,  $\kappa = (k_0^2 \epsilon_2 - \beta^2)^{1/2}$  代入(6)式, 则

$$m\pi = h_2 (k_0^2 \epsilon_2 - k_0^2 \epsilon_2 \sin^2 \theta)^{1/2}. \quad (7)$$

两边微分并化简得

$$\pi dm = h_2 \frac{k_0^2 \epsilon_2 \sin \theta}{2(k_0^2 \epsilon_2 - k_0^2 \epsilon_2 \sin^2 \theta)^{1/2}} d\theta, \quad (8)$$

于是可以得到

$$\Delta m \propto \sin^2 \theta \Delta \theta, \quad (9)$$

当入射角  $\theta$  较小时,  $\Delta m$  与  $\Delta \theta$  成正比, 即模序数的变化量随角度变化量增大而增大.

## 2 超高阶导模的灵敏度

### 2.1 偏振的灵敏性

激光光束具有 TE 和 TM 偏振性, 但是当波导层为亚毫米量级时, 不管是 TE 偏振还是 TM 偏振, 对应的色散方程都近似为(6)式; 因此, 可以判断双面金属包覆介质波导超高阶导模的偏振性是不灵敏的.

### 2.2 厚度、波长、折射率的灵敏性

由于超高阶导模在波导层之间滞留时间长, 因此波导层的厚度、光波波长和折射率的微小变化, 都会引起超高阶导模的灵敏度变化, 笔者把有效折射率对某一参数的变化率称之为灵敏度, 用“ $\phi$ ”表示, 即

$$\phi = \frac{dN}{dx}, \quad (10)$$

其中  $x$  代表波层导的厚度、光波波长和折射率. 由  $N = \beta/k_0$  代入(5)式中第 1 式并与第 2 式化简, 再代入(6)式得到

$$k_0 h \sqrt{\epsilon_2 - N^2} = m\pi, \quad (11)$$

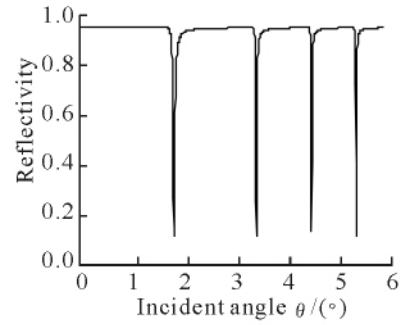


图 3 衰减全反射(ATR)谱

两边微分并化简得

$$\phi_h = \frac{dN}{dh} = \frac{\epsilon_2 - N^2}{Nh}. \quad (12)$$

同理可得

$$\phi_\lambda = \frac{dN}{d\lambda} = \frac{\epsilon_2 - N^2}{N\lambda}, \quad (13)$$

$$\phi_{\sqrt{\epsilon_2}} = \frac{dN}{d\sqrt{\epsilon_2}} = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{N}. \quad (14)$$

由(12)、(13)和(14)式可以看出,灵敏度与有效折射率  $N$  成反比,当入射角很小时,即对于超高阶导模有  $N \rightarrow 0$ ,则可以得到极高的灵敏度.

### 3 结论

由双面金属包覆介质波导超高阶导模推导出灵敏度与有效折射率、波导层的厚度、激光波长和波导层的介电常数的关系,灵敏度与有效折射率  $N$  成反比,当  $N \rightarrow 0$  时,灵敏度  $\phi$  极大,其灵敏度与偏振无关,该理论对生物传感器、滤波器和光电子器件等制备具有重要指导意义.

参考文献:

- [1] 陈 哲,崔 菲,曾应新,等.侧边抛磨光纤波导传输特性的理论分析 [J].光子学报,2008,37(5):918-923.
- [2] SUN M,MULLER M W. Measurements on Four-Layer Isotropic Waveguides [J]. Applied Optics,1997,16:814-815.
- [3] 邹 林,陈抱雪,陈 林,等.  $As_2S_3$  玻璃条形波导的光激励法制备技术研究 [J].光学学报,2006,26(7):1 044-1 047.
- [4] 波恩 M,沃尔夫 E.光学原理 [M].北京:科学出版社,1978.
- [5] OTTO A,SOHOLE W. Modification of The Total Reflection Modes in a Dielectric Film by one Metal Boundary [J]. Optics Communications,1971(3):254-258.
- [6] 周 峰,曹庄琪,蒋 毅,等.双面金属包覆波导介质波导模序数的判方法 [J].光学学报,2002,22:665-669.
- [7] 冉茂武,曹庄琪,陈险峰,等.用古斯—汉欣位移研究 PMN-PT 电光陶瓷的电光效应 [J].中国激光,2011,38(9):0 906 001-1-0 906 001-4.
- [8] 冉茂武,陈险峰,曹庄琪.利用超高阶导模测量 PMN-PT 透明陶瓷二次电光系数 [J].光学学报,2011,31(10):1 012 002-1-1 012 002-4.
- [9] LI H G,CAO Z Q,LU H F, et al. Free-Space Coupling of a Light Beam Into a Symmetrical Metal-Cladding Optical Waveguide [J]. Applied Physics Letters,2003,83:2 757-2 759.
- [10] LU H F,CAO Z Q,LI H G, et al. Study of Ultrahigh-Order Modes in a Symmetrical Metal-Cladding Optical Waveguide [J]. Applied Physics Letters,2004,85:4 579-4 581.
- [11] 冉茂武.基于亚毫米尺度金属双覆波导的茅台酒折射率测量 [J].吉首大学学报:自然科学版,2011,32(2):45-51.
- [12] 曹庄琪.导波光学 [M].北京:科学出版社,2007:15.

## Study on the Sensitivity of Symmetrical Metal-Cladding Dielectric Waveguide

RAN Mao-wu

(Department of Physics and Electronic Science, Tongren University, Tongren, 554300, Guizhou China)

**Abstract:** By applying the perturbation approximation method to dispersion equation of symmetrical metal-Cladding dielectric medium waveguide, the author finds that when the thickness of waveguide layer decreases to sub millimeter range, the effective index will approach zero, and the ultrahigh-order modes are no longer related to polarization. Then the author defines the sensitivity of waveguide, and gets its relationship with effective index, thickness, wavelength and dielectric constant. When the effective index approaches zero, the ultrahigh-order modes will have a super high sensitivity. This theory is of certain directive significance to biosensor and photoelectronic device.

**Key words:** optical waveguides; the dispersion equation; effective refractive index; ; sensitivity

(责任编辑 陈炳权)