

文章编号 : 0253-2239(2002)08-0924-03

# 双面金属包覆介质波导的直接耦合方法<sup>\*</sup>

李红根 沈启瞬 曹庄琪

(上海交通大学物理系,上海 200240)

沈玉全 翟剑峰

(中国科学院理化技术研究所,北京 100101)

摘要: 根据双面金属包覆介质波导的特殊性质,提出了一种新的波导耦合方法,这种技术在不用棱镜、光栅和其它元件的情况下,可使光能从金属表面直接耦合进波导。实验结果与理论预言符合得很好。

关键词: 直接耦合;光波导;色散特征

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

自导波光学问世以来,由于它在未来信息社会巨大的应用潜力,一直受到学术界和技术界的高度重视。经过 30 多年的发展,今天已初步成为一门体系完整的学科。

导波光学器件的基本元件是光波导,与波导同时诞生和发展的是它的耦合技术。目前常用的有棱镜耦合<sup>[1]</sup>、光栅耦合<sup>[2]</sup>、端面耦合<sup>[3]</sup>和劈形耦合<sup>[4]</sup>等方法。棱镜耦合虽不利于集成化,但利用该方法可以测量波导的参数。因此这一方法至今仍在实验室中普遍使用。光栅耦合利于集成,但复杂的制备技术和低的耦合效率阻碍了这种方法的广泛使用。端面耦合和劈形耦合也各有其优缺点和适用的波导。另外由于双面金属包覆介质波导的特殊构造,近年来已在电光波导调制器和电光系数的测量等领域获得了广泛的应用<sup>[5,6]</sup>。

与全介质波导和单面金属包覆介质波导不同,双面金属包覆介质波导的有效折射率可在零与无穷大之间变化,我们利用这个特点提出了将光束直接射向波导表面,在入射光波矢与导模传播常数匹配情况下,可实现光能与导模能量的耦合。在此基础上,我们制备了金属-有机薄膜-衬底结构的双面金属包覆介质波导,并利用角度扫描的方法得到了衰减全反射曲线,实验结果证实了我们的预言。

## 2 原 理

对于图 1 所示的全介质平板波导或单面金属包覆介质波导,不失一般性,可设  $n_1 > n_2 > n_0$  (对金属覆盖层,在可见光和近红外波段,  $n_0 < 1$ ) ,则该波导有效折射率的取值范围是

$$n_2 < N < n_1, \quad (1)$$

式中  $N = \beta/k_0$ ,  $\beta$  为导模传播常数,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为真空中的波数,  $\lambda$  为真空中的波长。光若从覆盖层直接入射,则根据波矢匹配条件:

$$k_0 n_0 \sin\theta_0 = \beta, \quad (2)$$

则要求  $\sin\theta_0 > 1$ , 显然不可能。

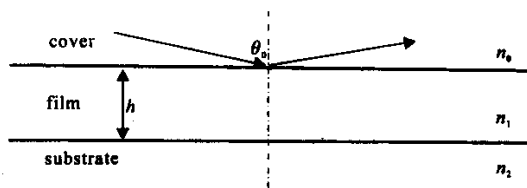


Fig.1 Dielectric planar waveguide

为了能使光束耦合进波导,一个有效的办法是在波导覆盖层上放置一高折射率棱镜,如图 2 所示,当光从棱镜一斜面入射,在入射角大于棱镜和覆盖层之间的临界角的情况下,覆盖层中为两相反迅速

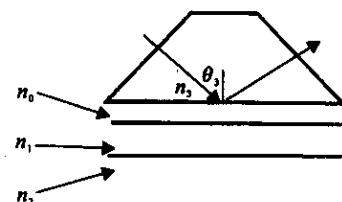


Fig.2 Prism-waveguide coupling configuration

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60047004)资助课题。

E-mail: leehgen@yeah.net

收稿日期: 2001-08-13; 收到修改稿日期: 2001-09-21

场的叠加。若满足匹配条件

$$k_0 n_3 \sin\theta_3 = \beta, \quad (3)$$

则入射光可以激发波导中的导模。

但对于图 3 所示的双面金属包覆介质波导,对一般的贵金属来说(如金、银、铜、铝等),由于在可见光和近红外波段的特殊性质,使得双面金属包覆介质波导中传输模的色散性质如图 4 所示<sup>[7]</sup>。

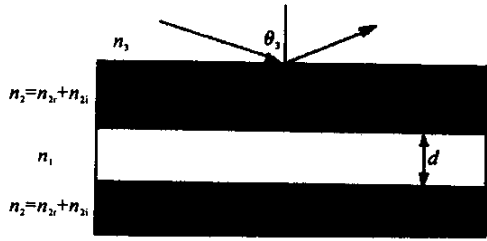


Fig.3 Double metal cladding waveguide

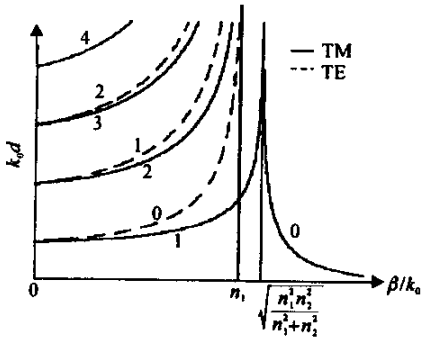


Fig.4 Dispersion characteristics of double metal-cladding waveguide

由图可见,除  $TM_0$  模之外,其他所有模式的有效折射率都可以趋近于零,即有

$$0 < N < \sqrt{\frac{n_1^2 n_2^2}{n_1^2 + n_2^2}}$$

当光从上层金属膜上的  $n_3$  介质入射时,就有可能满足波矢匹配条件(3)式,使光束直接从金属表面耦合进波导,而不会产生  $\sin\theta_3 > 1$  的矛盾。

### 3 样品制备和实验测量

#### 3.1 双面金属包覆介质波导的制备

首先把经过清洗的玻璃片置于溅射机中,根据时间控制溅射一层厚度约 200 nm 的金膜,由于当金膜的厚度超过 150 nm 时,可完全隔离衬底的影响,可把这层金膜看作无穷厚。然后用自旋涂覆法均匀地涂上一层聚酰亚胺(PI)有机薄膜,经过 DEKTAK

轮廓测厚仪测量,膜厚约为 2700 nm,为防止金粒子渗入有机膜,在小功率条件下,在有机膜表面溅射一层薄的金膜作为耦合层。其厚度  $d$  和复介电系数  $\epsilon_2$ ,可利用陪片经双波长法测得<sup>[8]</sup>,光波长为 780 nm 时测得

$$d = 36 \text{ nm},$$
$$\epsilon_2 = -20 + i1.5.$$

所得介电系数结果与文献 9,10 给出的参量十分接近。

双面金属包覆介质波导制作流程图如图 5 所示。

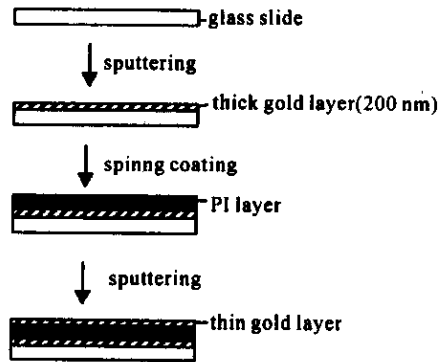


Fig.5 Fabrication process of double metal-cladding waveguide

#### 3.2 角度扫描法观测导膜的激发

实验装置如图 6 所示,光源为带准直器的半导体激光光束( $\lambda = 780 \text{ nm}$ ,发散角小于 1 mrad),通过小孔滤除边缘光束,经过起偏器后变成偏振光,直接射向样品表面,样品放在  $\theta/2\theta$  仪上,样品每转动  $\theta$  角,反射光线转动  $2\theta$  角,探测器放在  $2\theta$  转盘上,能够保证探测器时刻跟踪反射光。样品的扫描通过步进电机驱动,最小步长角度为  $5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。计算机控制步进电机的转动,探测器接收的信号放大后经过模/数转换卡进入计算机, $x$  方向表示角度, $y$  方向表示反射光强,在屏幕上得到扫描曲线。

当入射角  $\theta$  满足由(3)式表示的匹配条件时,将激发双面金属包覆介质波导中的模式。实际得到的扫描曲线如图 7 所示,图中的两个吸收峰表示金属包覆介质波导中的两个 TE 模。虚线为利用菲涅耳公式用计算机模拟得到的理论曲线,实线为实验结果。模拟所用的数据已列于图中,下层金膜的厚度和衬底的折射率对实验结果没有影响,故未予列出。

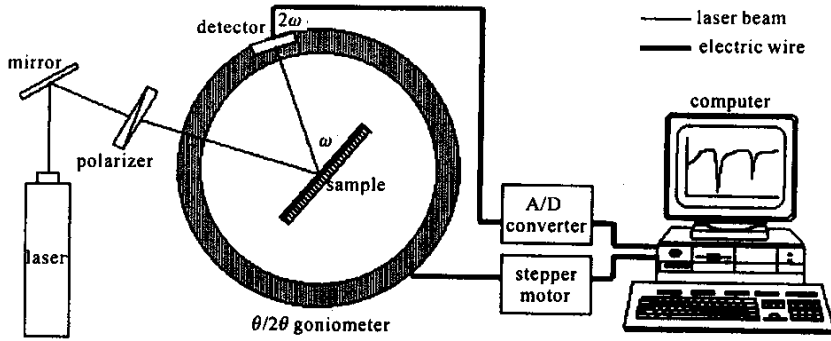


Fig. 6 Experimental setup for measurement

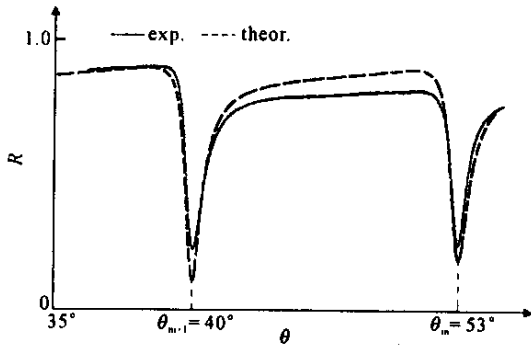


Fig. 7 Attenuated total reflection curves with  $\epsilon_1 = 2.80$ ,  
 $d_1 = 2700 \text{ nm}$ ,  $\epsilon_2 = -20 + i1.5$ ,  $d_2 = 36 \text{ nm}$

**结论** 本文通过理论分析、模拟,提出了一种全新的耦合方法,并在实验中得到了很好的证实。直接耦合方法既可免除棱镜耦合带来的不便(如空气隙厚度的控制和棱镜的加工等),又可省却光栅耦合器的制备困难,但却兼有棱镜耦合器的优点,即利用直接耦合可以测量薄膜的折射率和厚度,这种新的耦合方法预计会有广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

[1] Ulrich R. Theory of prism-film coupler by plane-wave analysis. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(10):1337 ~ 1349

- [2] Tamir T, Peng S T. Analysis and design of grating couplers. *Appl. Phys.*, 1977, **14**(3) 235 ~ 253
- [3] Boya J T, Anderson D B. Radiation pattern of an end-fire optical waveguide coupler. *Opt. Commun.*, 1975, **13**(3) 353 ~ 358
- [4] Tien P K, Martin R J. Experiments on light waves in a thin tapered film and a new lightwave coupler. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(9) 398 ~ 400
- [5] Jiang Yi, Cao Zhuangqi. Low voltage electro-optical polymer light modulator using attenuated total internal reflection. *Opt. and Laser Technol.*, 2001, **33**(9):417 ~ 420
- [6] Jiang Yi, Cao Zhuangqi. Improved attenuated-total-reflection technique for measuring the electro-optic coefficients of nonlinear optical polymers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2000, **17**(5) 805 ~ 808
- [7] Cao Zhuangqi. *Transfer Matrix Method in Guided-wave Optics*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000. Chap.9
- [8] Chen W P, Chen J M. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic films. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(2):189 ~ 191
- [9] Schulz L G. The optical constants of silver, gold, copper, and aluminum. I. The absorption coefficient  $k$ . *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(5) 357 ~ 362
- [10] Schulz L G, Tancherlini F R. The optical constants of silver, gold, copper, and aluminum. II. The index of refraction  $n$ . *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(5) 362 ~ 368

## Direct Coupling for Double Metal-Cladding Waveguides

Li Honggen<sup>1)</sup> Shen Qishun<sup>1)</sup> Cao Zhuangqi<sup>1)</sup> Shen Yuquan<sup>2)</sup> Zhai Jianfeng<sup>2)</sup>

(1), Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240

(2), Institute of Physics and Chemistry, The Chinese Academy Sciences, Beijing 100101

(Received 13 August 2001; revised 21 September 2001)

**Abstract:** Based on the dispersion characteristics of double metal-cladding wave guides, a novel coupling method, which is free from using the prism, grating and other coupling elements, is developed. Experimental results agree well with the theoretical prediction.

**Key words:** direct coupling; optical waveguides; dispersion characteristics