

文章编号: 0253-2239(2006)04-0497-4

亚毫米尺度双面金属波导的超高阶模及其滤波特性研究*

曹庄琪 陆海峰 李红根 邓晓旭 沈启舜

(上海交通大学物理系, 导波光电子器件实验室, 上海 200240)

摘要: 利用真空溅射法在一片亚毫米尺度的光学玻璃平板两面分别镀上不同厚度的金属薄膜, 构成一种超厚的双面金属包覆波导。采用自由空间耦合技术实现了这种波导中超高阶导模的激发。由于超高阶导模具有对波长特别灵敏而对偏振不灵敏的特殊性质, 以此为基础, 在实验中演示了可调谐、偏振不灵敏、低损耗(小于 0.5 dB)的超窄带(小于 0.08 nm)和梳状滤波(通道间隔为 100 GHz)。

关键词: 导波光学; 双面金属波导; 自由空间耦合; 超窄带滤波器; 梳状滤波器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Research of Ultrahigh-Order Modes in Double Metal-Cladding Optical Waveguide with Submillimeter Scale

Cao Zhuangqi Lu Haifeng Li Honggen Deng Xiaoxu Shen Qishun

(Laboratory of Guided-Wave Optoelectronics, Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: An optical glass slab, which is coated with two metal films with different thickness on both sides, is used to form a new type of ultrathick double metal-cladding optical waveguide with submillimeter-scale. Excitation of the ultrahigh-order modes are implemented by employing the free-space coupling technique. Based on the unusual features of the ultrahigh-order modes, wavelength-sensitive and polarization-insensitive, ultra-narrow bandwidth filtering (0.08 nm) and comb filtering (channel spacing 100 GHz) with tunable, low loss (0.5 dB) and polarization-insensitive operation capabilities are demonstrated experimentally.

Key words: waveguide optics; double metal-cladding optical waveguide; free-space coupling; ultra-narrow bandwidth filter; comb filter

1 引 言

导波光学是近四十年来高科技发展的重要学科, 以它为基础的高速光通信和集成光电器件正在迅猛地发展, 对人类生活的各个方面都产生了深远的影响。导波光学领域最基础的元件是平面光波导。这类光波导限制光的尺度为波长量级, 一般能够容纳几个导模, 导模数量随着波导厚度的增加而增加。当波导厚度大于几十微米时, 模密度很高, 模趋于连续。因而利用棱镜^[1]或光栅^[2]激发时, 表征导模的 m 线将发生重叠, 从而无法实现器件的功

能。本文提出了一种亚毫米尺度的双面金属包覆波导, 这种波导可容纳数千个导模, 绝大部分导模处于高模密度区域, 只有极少数超高阶导模是分立的。若采用自由空间耦合, 可实现超高阶模的激发^[3]。这些超高阶模除了具有偏振不灵敏性之外, 还具有对光源波长、波导厚度和折射率十分敏感的特性^[4]。除此之外, 这种结构尺寸小、制备方便, 具有潜在的低价格优势, 预计会在各类功能器件的制备中获得广泛的应用。

* 国家自然科学基金(60237010)和教育部博士点基金(20020248058)资助课题。

作者简介: 曹庄琪(1945~), 男, 上海人, 上海交通大学物理系教授, 主要从事导波光学和光波导器件方面的研究。

E-mail: zqcao@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2005-06-20; 收到修改稿日期: 2005-10-13

2 波导结构与耦合原理^[3]

亚毫米双面金属包覆波导结构如图 1 所示,其中 ϵ_0 、 ϵ_1 和 ϵ_2 分别为空气、介质和金属的介电系数, h_1 为平板厚度, h_2 为上层金属膜的厚度,一般为 30~60 nm。下层金属一般涂得较厚,约为 200 nm 量级,因光无法穿透,可看作半无限大。由于金属波导的吸收性质,双面金属波导的损耗一般很大,但损耗随着波导厚度的增加而减小^[5]。因此,对亚毫米尺度的超厚波导,金属吸收的影响已大为减弱。双面金属包覆波导有效折射率的取值范围为^[5]

$$0 < n_{\text{eff}} < \sqrt{\epsilon_1}, \quad (1)$$

根据(1)式,提出了直接从空气介质转移光能的自由空间耦合技术,这种技术可激发波导中有效折射率在 $0 < n_{\text{eff}} < 1$ 范围内的导模。但当波导厚度达到亚毫米时,绝大部分导模仍是准连续的,只有当 $n_{\text{eff}} \rightarrow 0$ 时,模密度显著降低,因而可用小角度入射光激发这些分立的导模。根据这种导模的模式本征方程

$$\frac{2\pi h_1}{\lambda} \sqrt{\epsilon_1 - n_{\text{eff}}^2} = m\pi + 2\arctan\left(\rho \sqrt{\frac{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_2}{\epsilon_1 - n_{\text{eff}}^2}}\right), \quad (2)$$

其中与偏振有关的参数由下式给出:

$$\rho = \begin{cases} 1, & \text{TE 模} \\ \epsilon_1/\epsilon_2, & \text{TM 模} \end{cases} \quad (3)$$

设入射光波长 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, 波导厚度 $h_1 = 100 \mu\text{m}$, 而(2)式右边第二项的最大值是 π 。因此对超高阶导模 ($n_{\text{eff}} \rightarrow 0$ 的情况), 粗略的估计显然有 $m > 1000$ 。

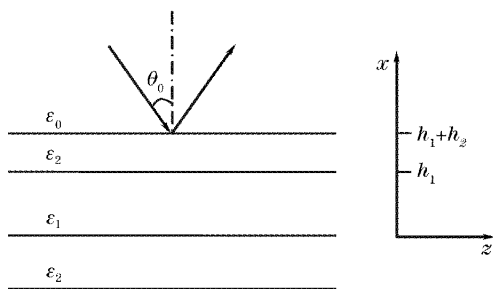


图 1 双面金属包覆波导结构图

Fig. 1 Double metal-cladding optical waveguide

3 超高阶导模的特性^[4]

通常情况下,由于 $m > 1000$, 在(2)式中忽略偏振相关的全反射相移项,不会产生大的误差,因此可把模式本征方程近似改写为

$$\frac{2\pi h_1}{\lambda} \sqrt{\epsilon_1 - n_{\text{eff}}^2} = m\pi. \quad (4)$$

由此,可得以下结论:

1) 对各向同性的导波层介质,(4)式是偏振无关的,即超高阶导模是偏振不灵敏的。利用图 1 所示的结构和自由空间耦合技术所做的偏振不灵敏的实验曲线如图 2 所示。

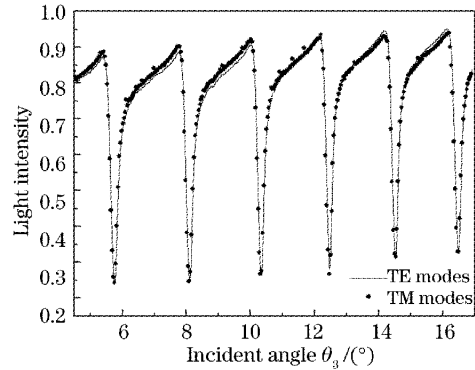


图 2 偏振不灵敏实验结果图。 $\epsilon_1 = 2.25$, $\epsilon_2 = -10 + i$, $h_1 = 100 \mu\text{m}$, $\lambda = 650 \text{ nm}$, $h_2 = 30 \text{ nm}$

Fig. 2 Experimental results of polarization insensitivity, with $\epsilon_1 = 2.25$, $\epsilon_2 = -10 + i$, $h_1 = 100 \mu\text{m}$, $\lambda = 650 \text{ nm}$, $h_2 = 30 \text{ nm}$

2) 由(4)式可得

$$\Delta n_{\text{eff}} = -\frac{\sqrt{\epsilon_1 - n_{\text{eff}}^2}}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{m}{2h_1} \Delta \lambda. \quad (5)$$

由于 m 很大,而 $n_{\text{eff}} \rightarrow 0$, 说明超高阶导模的有效折射率对光波长的变化十分灵敏。

3) 由于光在空气介质中的入射角 θ_0 很小,因此在波导中光线在上下两层金属界面间的入射角更小,说明对相同的传输距离,超高阶模比低阶模有更多的反射次数。可以预计超高阶模的有效折射率对波导的折射率和厚度变化也是极为灵敏的,有关公式与(5)式类似。

4 可调谐超窄带滤波器的研究

利用自由空间耦合技术,当单色光波长固定的,通过入射角角度扫描可得一系列衰减全反射(ATR)吸收峰。同样当入射角固定时,通过波长扫描也可得到一系列随波长变化的吸收峰。可调谐超窄带滤波器的实验装置如图 3 所示。

在本实验中波长为 850 nm, 线宽为 1 MHz 的可调谐半导体激光器(DC110)输出的激光,经过一偏振器(P)和四分之一波片后成为圆偏振光,再通过一分束片(S),小部分光经反射后由波长计接收,大部分光以一定角度入射于样品表面,反射光通过偏振分束器(BPS)后成等强度的 TE 和 TM 光分别进入两光电探测器 D, 输出信号进入计算机。精密

参 考 文 献

- 1 R. Ulrich. Theory of the prism-film coupler by plane-wave analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(10): 1337~1349
- 2 T. Tamir, S. T. Peng. Analysis and design of grating couplers [J]. *Appl. Phys.*, 1977, **14**(3): 235~253
- 3 H. Li, Z. Cao, H. Lu *et al.*. Free-space coupling of light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(14): 2757~2759
- 4 H. Lu, Z. Cao, H. Li *et al.*. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(20): 4579~4581
- 5 I. P. Kaminov, W. L. Mammel, H. P. Weber. Metal-clad optical waveguides; Analytical and experimental study[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 396~405
- 6 Liu Lihui, Zhao Qida, Zhou Guang *et al.*. Study on characteristics of two high-birefringence fiber loops mirror filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1185~1188 (in Chinese)
刘丽辉,赵启大,周 广等. 双折射光纤环形镜滤波器特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1185~1188
- 7 Chen Haixing, Gu Peifu, Li Haifeng *et al.*. Design of interleaver with cascaded thin film filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 62~64 (in Chinese)
陈海星,顾培夫,李海峰等. 薄膜多腔滤光片型梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 62~64
- 8 Cai Haiwen, Huang Rui, Qu Ronghui *et al.*. All fiber interleaver filter using Mach-Zehnder-based sampled fiber gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(3): 243~246 (in Chinese)
蔡海文,黄 锐,瞿荣辉等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 243~246