

文章编号: 0253-2239(2010)01-0043-04

亚毫米尺度对称金属包覆波导中传输损耗的抑制

孙晶晶¹ 桑明煌¹ 曹庄琪² 李红根²

(¹ 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)
(² 上海交通大学导波光子学实验室, 上海 200240)

摘要 利用光频范围贵金属介电常量的虚部远小于其实部绝对值的特点, 采用一阶微扰理论得到了对称金属包覆波导横电和横磁导模微扰传播常数的解析公式。针对金属包覆波导传输损耗大的缺陷, 提出采用亚毫米尺度的超厚导波层来抑制传输损耗的新方法。微扰公式与精确数值解结果相符。

关键词 光学设计; 光波导; 超高阶导模; 微扰理论; 传输损耗

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0043

Inhibiting Effect of Propagation Loss in Symmetrical Metal-Cladding Optical Waveguide with Sub-Millimeter Scale

Sun Jingjing¹ Sang Minghuang¹ Cao Zhuangqi² Li Honggen²

(¹ School of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China)
(² Laboratory of Guided-Wave Optoelectronics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract According to the characteristic of dielectric constants of the noble metals in the visible and near-infrared region, a first-order perturbation theory is applied to obtain the propagation constants of the TE and TM modes in the symmetrical metal-cladding optical waveguide. In the light of the great propagation loss of symmetrical metal-cladding optical waveguide, a method that sub-millimeter scaled guiding layer is used to depress the propagation loss is proposed. Calculated results of first-order perturbation agree well with the numerical approach.

Key words optical design; optical waveguide; ultrahigh-order guide modes; first-order perturbation; propagation loss

1 引言

利用晶体电光效应的金属包覆介质波导作为一种特殊的光波导元件, 因其相对简单的制作方法和较低的成本, 引起了人们越来越广泛的研究兴趣。由于金属介电常量的实部是负数, 极大地拓展了导模有效折射率的范围, 赋予了这类波导一系列特殊的性质, 使其在传感器领域获得重要应用^[1,2]。但由于金属在光频波段的强烈吸收, 通常认为在这类光波导中导波光不可能传输毫米尺度的距离, 其高传输损耗极大地制约了应用范围^[3~6], 因而无法实现小型化脉冲展宽器。

本文从对称金属包覆介质波导的模式本征方程

出发, 采用一阶微扰理论研究了此类波导的损耗特性, 得到了微扰传播常数的解析公式。根据公式结果, 提出利用亚毫米尺度对称金属包覆波导中的强色散超高阶导模, 在传输毫米量级距离后实现脉冲展宽 1000 倍的小型化器件来替代啁啾脉冲放大 (CPA) 技术中庞大的光栅对展宽器的设想。另外, 将一阶微扰理论的结果与数值方法的精确结果进行比较, 表明一阶微扰理论的结果是可靠的。

2 理论分析

亚毫米尺度对称金属包覆波导结构如图 1 所示。图中 ϵ_1 和 $\epsilon_2 = \epsilon_{r2} + i\epsilon_{i2}$ 分别为介质和金属(金或银)的

收稿日期: 2008-12-19; 收到修改稿日期: 2009-04-09

作者简介: 孙晶晶(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事导波光学和光电子器件等方面的研究。

E-mail: sunjingjing715@163.com

导师简介: 桑明煌(1965—), 男, 副教授, 主要从事导波光学光电子器件方面的研究。E-mail: sangqdli@yahoo.com

介电系数, h 为导波层厚度。由于在可见光和近红外波段, 对贵金属通常有 $\epsilon_{r2} < 0$ 和 $|\epsilon_{r2}| \gg \epsilon_{i2}$ ^[7,8]。因此, 分析中首先忽略金属介电系数的虚部 ϵ_{i2} , 这时理想金属包覆波导的模式本征方程可表示为

$$\kappa_1^0 h = m\pi + 2\arctan\left(\rho \frac{\alpha_2^0}{\kappa_1^0}\right), \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中

$$\rho = \begin{cases} 1, & \text{TE} \\ \epsilon_1/\epsilon_{r2}, & \text{TM} \end{cases} \quad (2)$$

$\kappa_1^0 = \sqrt{k_0^2 \epsilon_1 - (\beta^0)^2}$ 表示导波层中的横向波数, 而 $\alpha_2^0 = \sqrt{(\beta^0)^2 - k_0^2 \epsilon_{r2}}$ 表示金属层内的场的衰减系数, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为真空波数, λ 为光波长, m 为导模的模序数^[9], β^0 为理想传播常数。显然由理想金属包覆波导的模式本征方程得到的传播常数 β^0 是一实数, 表明理想金属包覆波导的损耗为零。下面以 β^0 为零级近似, 采用一阶微扰理论考虑因 ϵ_{i2} 的存在而引起的 β^0 的变化 $\Delta\beta$ 。显然 $\Delta\beta$ 的虚部即是表征波导传输损耗的特征参数。

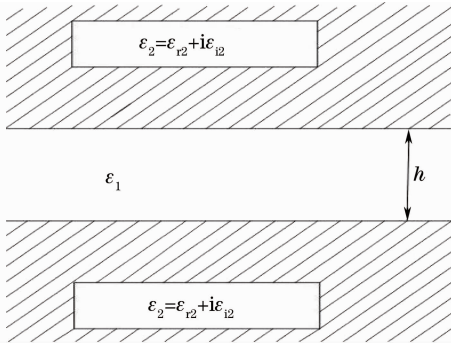


图1 对称金属包覆介质波导

Fig. 1 Symmetrical metal-cladding optical waveguide

2.1 TE 模

当 ϵ_{i2} 存在时, 对称金属包覆波导 TE 模的色散方程为

$$\kappa_1 h = m\pi + 2\arctan(\alpha_2'/\kappa_1), \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} \kappa_1 = \sqrt{k_0^2 \epsilon_1 - \beta^2}, \\ \alpha_2' = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 (\epsilon_{r2} + i\epsilon_{i2})}. \end{cases} \quad (4)$$

由于 $\epsilon_{i2}/|\epsilon_{r2}| \ll 1$, 故可对 α_2' 进行泰勒级数展开并只保留一阶小量, 于是有

$$\alpha_2' \approx \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_{r2}} - i\epsilon_{i2} \frac{k_0^2}{2\sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_{r2}}} \equiv \alpha_2 - i\epsilon_{i2} \frac{k_0^2}{2\alpha_2}, \quad (5)$$

式中 $\alpha_2 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_{r2}}$ 。利用(5)式和反正切函数的微分, 可得

$$\arctan\left(\frac{\alpha_2'}{\kappa_1}\right) \approx \arctan\left(\frac{\alpha_2}{\kappa_1}\right) - i\epsilon_{i2} \frac{k_0^2}{2\alpha_2} \frac{\kappa_1}{\kappa_1^2 + \alpha_2^2}, \quad (6)$$

因此, (3)式转化为如下形式:

$$\kappa_1 h = m\pi + 2\arctan\left(\frac{\alpha_2}{\kappa_1}\right) - 2i\epsilon_{i2} \frac{k_0^2}{2\alpha_2} \frac{\kappa_1}{\kappa_1^2 + \alpha_2^2}, \quad (7)$$

(7)式和(1)式相减并利用微分公式, 可得传播常数 β^0 的变化 $\Delta\beta$ 为

$$\Delta\beta = i\epsilon_{i2} \frac{k_0^2 \kappa_1^2}{\alpha_2 \beta (\alpha_2^2 + \kappa_1^2) h_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

式中 $h_{\text{eff}} = h + 2/\alpha_2$ 为波导的有效厚度。

根据所得解析公式, 可得以下三点结论:

1) $\Delta\beta$ 是一阶小量, 因此, 式中的波导参数 β, κ_1 和 α_2 都可用理想波导的参数 β^0, κ_1^0 和 α_2^0 代替, 不再需要展开。

2) 微扰传播常数 $\Delta\beta$ 是一纯虚数, 说明在一阶微扰理论下, 金属介电常量虚部的引入, 只影响金属包覆波导的损耗特性, 而不改变金属包覆波导传播常数实部。

3) 微扰传播常数 $\Delta\beta$ 与 h_{eff} 成反比, 对超厚的亚毫米尺度的对称金属包覆波导, 其传输损耗将大为降低。

2.2 TM 模

对 TM 模, 考虑 ϵ_{i2} 的模式色散方程如下:

$$\kappa_1 h = m\pi + 2\arctan\left(\frac{\epsilon_1 \alpha_2'}{\epsilon_2 \kappa_1}\right), \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

利用与 TE 模相类似的计算可得 TM 模微扰传播常数为

$$\Delta\beta = i\epsilon_{i2} \frac{2\alpha_2^2 + k_0^2 \epsilon_{r2}}{\alpha_2} \frac{\epsilon_1 \kappa_1^2}{(\epsilon_1^2 \alpha_2^2 + \kappa_1^2 \epsilon_{r2}^2) \beta h_{\text{eff}}}, \quad (10)$$

波导的有效厚度为

$$h_{\text{eff}} = h + \frac{2\epsilon_1 \epsilon_{r2} (\kappa_1^2 + \alpha_2^2)}{\alpha_2 (\epsilon_{r2}^2 \kappa_1^2 + \epsilon_1^2 \alpha_2^2)}, \quad (11)$$

与 TE 模的结论基本相同。

3 数值计算与比较

3.1 传播常数

为验证微扰理论结果的可靠性, 利用对称金属包覆介质波导的模式本征方程(3)式和(9)式, 用数值方法精确地计算 TE 和 TM 模的复传输常数的实部 β_r 和虚部 β_i , 并与相应的由一阶微扰理论得到的结果 β^0 和 $|\Delta\beta|$ 比较, 计算结果如图 2 所示。参数为 $\epsilon_1 = 2.25, \epsilon_2 = -16 + 0.5i, \lambda = 632.8 \text{ nm}$, 入射角 $\theta = 5^\circ$ 。由图可得以下结论:

1) 一阶微扰理论得到的结果与精确数值计算在相当大的范围内吻合,说明利用一阶微扰理论来分析对称金属包覆介质波导的传输损耗是可靠的;

2) 常规微米尺度对称金属包覆介质波导的传输损耗很大,但随着导波层厚度从微米尺度向亚毫

米尺度的过渡,传输损耗迅速减小;

3) 对亚毫米尺度对称金属包覆波导, $\beta_r - \beta^0$ 的值始终趋于零,表明金属介电常量虚部的引入,只影响金属包覆波导的损耗特性而不改变其传播常数实部的结论是正确的。

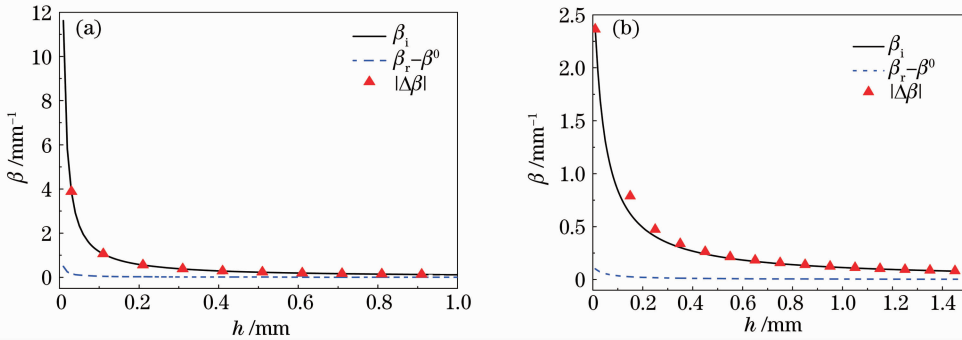


图2 对称金属包覆介质波导 TE 模(a)和 TM 模(b)的传播常数曲线

Fig. 2 Propagation constants of the TE modes (a) and TM modes in symmetrical metal-cladding optical waveguide

3.2 传输损耗

为了实现小型化脉冲展宽器的设想,利用由一阶微扰理论导出的波导复传播常数虚部公式,计算了导波层厚度 h 分别为 0.5 和 1 mm,而模阶数 m 分别为 1421 和 2843 的两种超高阶导模的传输损耗。其中金(Au)、银(Ag)在光波长 $\lambda = 1053$ nm 处的介电系数由实验曲线外推并参考有关文献所得^[10~13]。而 $\eta = \exp(-2\Delta\beta z)$, 表示导模传输 $z = 1$ mm 距离后所剩功率与导模初始功率之比^[14]。用公式

$$\xi(\text{dB/mm}) = -\frac{10}{z} \lg \eta, \quad (12)$$

计算得到的结果由表 1 列出。由表 1 可见,在亚毫米尺度下,无论是金膜还是银膜构成的对称金属包覆波导,导模的传输损耗均小于 3 dB/mm,说明在亚毫米尺度对称金属包覆波导中,导波光传输毫米尺度的距离是完全可能的,发展小型化脉冲展宽器的设想也是合理的。另外,从表 1 中还可看出,银比金具有更好的光学性能,而 TE 和 TM 模之间的差别极小。

表 1 不同参数下的导模传输损耗

Table 1 Guided-mode propagation loss with different parameters

h / mm	λ / nm	ϵ	m	mode	$ \Delta\beta $	η / %	ξ / (dB/mm)
0.5	1053	$\epsilon_{\text{Au}} = -40 + 2.5i$	1421	TE	0.31904	52.8	2.78
0.5	1053	$\epsilon_{\text{Au}} = -40 + 2.5i$	1421	TM	0.32289	52.4	2.81
0.5	1053	$\epsilon_{\text{Ag}} = -48 + 1.6i$	1421	TE	0.15689	73.1	1.36
0.5	1053	$\epsilon_{\text{Ag}} = -48 + 1.6i$	1421	TM	0.15834	72.9	1.38
1	1053	$\epsilon_{\text{Au}} = -40 + 2.5i$	2843	TE	0.15953	72.7	1.38
1	1053	$\epsilon_{\text{Au}} = -40 + 2.5i$	2843	TM	0.16144	72.4	1.40
1	1053	$\epsilon_{\text{Ag}} = -48 + 1.6i$	2843	TE	0.078446	85.4	0.69
1	1053	$\epsilon_{\text{Ag}} = -48 + 1.6i$	2843	TM	0.079167	85.3	0.70

4 结 论

利用一阶微扰理论和精确的数值计算,研究了对称金属包覆波导的损耗特性,结果表明提出的一阶微扰理论是可靠的,同时指出,采用超厚的亚毫米尺度的波导对光的传输损耗具有强烈的抑制作用,导波光在该尺度波导中实现毫米尺度的传输距离是完全可能的。这个结果对小型脉冲展宽器的制备提供了理论基础。由于亚毫米尺度对称金属包覆波导

结构简单,尺寸小,制作方便和成本低廉^[15],用于制备集成化的小型脉冲展宽器不仅可大大减小现有光栅对展宽器的庞大体积,而且具有结构紧凑、调节方便和成本低等优势,在啁啾脉冲放大技术中具有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 S. A. Kingsley, S. Sriram. Parallel-plate integrated optic high-voltage sensors[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(13): 1332~1337

- 2 Yuan Wen, Guo Qin, Sang Minghuang *et al.*. Theoretical and experimental research on voltage sensing based on attenuated-total-reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1199~1202
袁文, 郭琴, 桑明煌等. 衰减全反射型电压传感器的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1199~1202
- 3 I. P. Kaminow, W. L. Mammel, H. P. Weber. Metal-clad optical waveguides: analytical and experimental study[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 396~405
- 4 Li Ruiyong, Sheng Yuqin, Wang Bingkui *et al.*. Mode dispersion properties of the metal claded dielectric waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(1): 6~10
李瑞镛, 盛虞琴, 王炳奎等. 金属覆盖介质波导的模式色散性质[J]. *光学学报*, 1984, **4**(1): 6~10
- 5 Y. Yamamoto, T. Kamiya, H. Yanai. Characteristics of optical guided modes in multilayer metal-clad planar optical guide with low-index dielectric buffer layer[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-11**(9): 729~736
- 6 Zhou Feng, Cao Zhuangqi, Jiang Yi *et al.*. Method to identify mode order in double metal-cladding waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 665~669
周峰, 曹庄琪, 蒋毅等. 双面金属包覆介质波导模序数的判别方法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 665~669
- 7 Li Honggen, Cao Zhuangqi, Lu Haifeng *et al.*. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(14): 2757~2759
- 8 Lu Haifeng, Cao Zhuangqi, Li Honggen *et al.*. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(20): 4579~4581
- 9 Cao Zhuangqi, Lu Haifeng, Li Honggen *et al.*. Research of ultrahigh-order modes in double metal-cladding optical waveguide with sub-millimeter scale[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 497~500
曹庄琪, 陆海峰, 李红根等. 亚毫米尺度双面金属包覆波导的超高阶导模及其滤波特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 497~500
- 10 M. Bass, E. V. Stryland, D. R. Williams *et al.*. Handbook of optics vol. 2[M]. New York: McGraw-Hill, 1995. 3513~3519
- 11 P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of the noble metals[J]. *Phys. Rev. B.*, 1972, **6**(12): 4370~4379
- 12 L. G. Schulz, F. R. Tangherlini. The optical constants of silver, gold, copper, and aluminum (I. The absorption coefficient)[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(5): 357~362
- 13 L. G. Schulz, F. R. Tangherlini. The optical constants of silver, gold, copper, and aluminum (II. The index of refraction) [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(5): 362~368
- 14 Cao Zhuangqi. Guided Wave Optics[M]. Beijing: Science Press, 2007. 103
曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 103
- 15 Wu Zhijing, Sang Minghuang, Yuan Wen *et al.*. Pulse stretching based on symmetrical metal-cladding optical waveguide with sub-millimeter scale[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 119~122
吴止境, 桑明煌, 袁文等. 亚毫米尺度金属包覆波导的脉冲展宽[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 119~122