

带金属包复的渐变折射率波导

林盛强 李玉善 金 锋

(中国科学院长春物理所)

提要: 在离子交换玻璃波导上, 沉积一层金属 Ag, 制成带金属包复的渐变折射率波导。利用射线光学方法求出本征值。实验结果表明其有效折射率的测量值与理论值相符。

Graded refractive index waveguides with metal-cladding

Lin Shengqiang, Li Yushan, Jin Feng

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract: On the glass waveguide formed by ion exchange, a silver metal layer is deposited, thereby the graded refractive index waveguide with metal-cladding is made. Eigenvalues are solved by ray-optics method. Experimental results show that the measured values of effective refractive indices agree with the theoretical ones.

一、引言

在集成光路中, 许多光波导器件往往需要在介质波导上沉积一层金属膜才能构成。例如, 薄膜激光器和光波导探测器的电极, 电-光和磁-光波导调制器的电极, 声-光波导调制器的电-声换能器、偏振器和滤模器等有些无源光波导器件, 均需要附一层金属膜。

带金属包复的介质波导与一般介质波导相比, 其传播特性有显著差别。对它的深入研究, 不仅便于弄清一大类光波导器件的机理, 而且有助于探索新型光波导器件。在集成光路中, 经常采用 Ti 扩散 LiNbO_3 波导和离子交换玻璃波导等渐变折射率波导。因

此, 研究带金属包复的渐变折射率波导的传播特性是很有意义的。

以往的研究工作绝大部分是在带金属包复的平板波导上进行的, 它的波导折射率是阶跃分布的, 处理边值问题虽比不带金属包复的平板波导复杂一些, 但从麦克斯韦方程出发, 也能够推导出简单的解析本征值方程。与此相反, 对于带金属包复的渐变折射率波导, 从麦克斯韦方程出发, 严格处理边值问题是一件比较复杂的事情。我们在离子交换玻璃波导上, 沉积一层金属 Ag, 研制出带金属包复的渐变折射率波导。用射线光学方法求出本征值, 并与测量结果做了比较。

收稿日期: 1982年5月11日。

二、本征值方程

带金属包复的渐变折射率波导及其坐标系如图1所示,其中 x 和 z 轴分别与波导的厚度方向和波导轴一致, M 为金属层的折射率, $n(x)$ 为导波层的折射率。金属折射率可由复数表示:

$$M^2 = K = K_r + jK_j \quad (1)$$

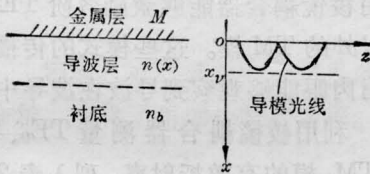


图1 带金属包复的渐变折射率波导及其坐标系

式中, K 为金属层的相对介电常数, K_r 和 K_j 分别为其实部和虚部。导波层的折射率可表示为:

$$n^2(x) = n_b^2 + (n_s^2 - n_b^2)f(x) \quad (2)$$

式中 n_s 和 n_b 分别为介质波导表面($x=0$)和衬底($x \rightarrow \infty$)的折射率; $f(x)$ 为折射率分布函数,在 $x=0$ 处取1,随 x 的增加单调地减至零。由于金属折射率是复数,故带金属包复的介质波导的本征值也是复数。本文不求复数本征值,只在特定情形下求本征值的实部。

当金属介电常数的实部远大于虚部的情形下,即:

$$|K_r/K_j| \gg 1 \quad (3)$$

可以忽略介电常数的虚部,采用射线光学方法,不难推得带金属包复的渐变折射率波导的本征值方程^[1]:

$$k \int_0^{x_v} [n^2(x) - M_\nu^2]^{1/2} dx = \nu\pi + \frac{\pi}{4} + \phi_{m\nu} \quad (4)$$

式中, $k=2\pi/\lambda$ 和 λ 分别为光波在真空中的传播常数和波长; ν 为波导模的模阶数,它取

从零开始的正整数; M_ν 为 ν 阶模有效折射率的实部, $M_\nu k$ 为沿 z 方向的传播常数; x_ν 为 ν 阶波导模光学隧道点(即光线拐点)的坐标; $2\phi_{m\nu}$ 为金属与波导界面上的反射相移:

$$\phi_{m\nu} = \tan^{-1} \left(\frac{n_s^2}{K_r} \right)^\rho \left(\frac{M_\nu^2 - K_r}{n_s^2 - M_\nu^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中, $\rho=0$ 和1分别对应于TE模和TM模。

我们在实验中采用了带金属(Ag)包复的离子交换玻璃波导,导波层的折射率分布函数为二次多项式^[2]:

$$f(x) = 1 - \left(\frac{x}{d} \right) - b \left(\frac{x}{d} \right)^2 \quad (6)$$

因此,折射率分布为:

$$n^2(x) = n_s^2 - (n_s^2 - n_b^2) \left[\left(\frac{x}{d} \right) + b \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中, d 为有效扩散深度, b 为二次项系数。金属Ag在6328Å激光波长上的介电常数为^[1]:

$$\begin{cases} K = -16.32 - j0.5414 \\ K_r = -16.32, K_j = -0.5414 \end{cases} \quad (8)$$

实部远大于虚部。将(7)式代入(4)式,利用光学隧道点的性质 $n(x_\nu) = M_\nu$,推得带金属(Ag)包复的离子交换玻璃波导的本征值方程:

$$\begin{aligned} \frac{kd}{4b} \left[\frac{H}{\sqrt{4b(n_s^2 - n_b^2)}} \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_b^2}{H}} \right) \right. \\ \left. - \sqrt{n_s^2 - M_\nu^2} \right] = \nu\pi + \frac{\pi}{4} \\ - \tan^{-1} \left| \frac{n_s^2}{K_r} \right|^\rho \left(\frac{M_\nu^2 + |K_r|}{n_s^2 - M_\nu^2} \right)^{1/2} \quad (9) \end{aligned}$$

式中,

$$H = (n_s^2 - n_b^2) + 4b(n_s^2 - M_\nu^2) \quad (10)$$

对于给定的波导参数 n_s 、 n_b 、 d 和 b ,由式(9)可以求得波导模的有效折射率 M_ν 。利用(4)和(9)式只能给出本征值的实部,求复数本征值需要发展能处理复数本征值的近似方法。

三、本征值的测量

将载物片玻璃衬底浸入 320°C 的硝酸银溶液, 扩散 1 分钟, $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$ 离子相互交换而形成渐变折射率波导。它在 6328 Å 激光波长携带两个 TE 模和两个 TM 模。利用棱镜耦合器测量其有效折射率 N_ν , 列入表 1。

表 1 离子交换玻璃波导有效折射率 N_ν 的测量值 ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$)

有效折射率	TE 模	TM 模
N_0	1.5538	1.5525
N_1	1.5141	1.5130

对于折射率的二次多项式分布式(7), 离子交换玻璃波导的本征值方程^[2]为:

$$\frac{kd}{4b} \left[\frac{Q}{\sqrt{4b(n_s^2 - n_b^2)}} \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_b^2}{Q}} \right) - \sqrt{n_s^2 - N_\nu^2} \right] = \nu\pi + \frac{\pi}{4} + \tan^{-1}(n_s^2) \rho \left(\frac{N_\nu^2 - 1}{n_s^2 - N_\nu^2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

式中,

$$Q = (n_s^2 - n_b^2) + 4b(n_s^2 - N_\nu^2) \quad (12)$$

ρ 的意义同前。将表 1 的有效折射率 N_ν 的测量值代入式(11), 得到联立的四个本征值方程。利用电子计算机, 由非线性方法求出四个波导参数: $n_s = 1.5950$ 、 $n_b = 1.5000$ 、 $d = 2.4$

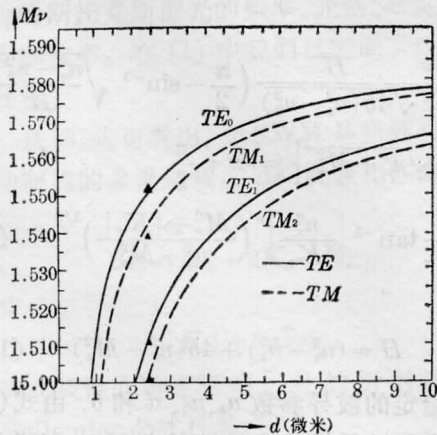


图 2 带金属(Ag)包复的离子交换玻璃波导的 $M_\nu \sim d$ 理论曲线 (▲点表示测量值)

微米、 $b = 0.62$ 。在这一离子交换玻璃波导上利用真空蒸发的方法, 沉积一层约 1000 Å 厚的金属 Ag 膜。由于此厚度大于光波在金属层中的渗透深度, 所以在理论处理上将 Ag 膜视作无限厚的金属层。将上述波导参数代入式(9), 利用电子计算机, 求出带金属(Ag)包复的离子交换玻璃波导的有效折射率 M_ν , 与扩散深度 d 的定量关系, 并画出 TE₀、TE₁、TM₁ 和 TM₂ 模的 $M_\nu \sim d$ 理论曲线(见图 2)。

在带约 1000 Å 厚金属包复的介质波导中, 利用棱镜耦合器能够激励各阶 TE 模和除基模以外的 TM 模。这些模式的传播损耗较小, 用肉眼能够观察到导波在波导中的传输条纹。利用棱镜耦合器测量 TE₀、TE₁、TM₁ 和 TM₂ 模的有效折射率, 列入表 2。并用 ▲ 点示于图 2 $M_\nu \sim d$ 曲线上。至于传播损耗很大的 TM₀ 模, 采用光电装置, 通过探测棱镜底的反射光强随入射角的变化, 测量出同步入射角, 从而确定其有效折射率。由于条件限制, 我们未能测量 TM₀ 模的有效折射率。

表 2 带金属(Ag)包复的离子交换玻璃波导的有效折射率 M_ν 的测量值 ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$)

有效折射率	TE 模	TM 模
M_0	1.551	没有测量
M_1	1.512	1.540
M_2	被截止	1.509

由图 2 可以看到, 有效折射率 M_ν 的测量值与理论值符合得很好。至于其差别较明显的 TM 模, 测量值和理论值相差约 0.3%, 这是在忽略介电常数虚部而引起的误差范围以内。这就说明, 对于有些金属包层(如 Ag), 忽略其介电常数的虚部, 利用射线光学方法, 也能够求得近似程度较高的本征值。

参 考 文 献

- [1] T. Tamir, "Integrated Optics", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York(1975), Chap. 2.
- [2] G. Stewart et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1977, QE-13, 192.