

文章编号: 0253-2239(2005)02-161-4

渐变折射率波导表面折射率的确定*

付国兰^{1,2} 曹庄琪¹ 丁 渊¹ 朱海东¹ 沈启舜¹ 刘三秋³

1 上海交通大学物理系, 上海 200240
2 江西师范大学物理与通信电子学院, 南昌 330027
3 南昌大学理学院, 南昌 330047

摘要: 单调变化的渐变折射率波导的表面折射率大于波导基模的有效折射率, 因而不能用传统的 m-线方法测量。利用分析转移矩阵(ATM)方法研究了渐变折射率波导中的表面等离子波, 提出了一种确定波导近表面折射率的实验技术, 在波导折射率分布的拟合中, 得到了比传统逆 WKB 方法更为合理的结果。

关键词: 导波光学; 折射率分布; 分析转移矩阵方法; 表面等离子波; 渐变折射率波导

中图分类号: TN491 文献标识码: A

Determination of Surface Index of Graded-Index Waveguides

Fu Guolan^{1,2} Cao Zhuangqi¹ Ding Yuan¹ Zhu Haidong¹ Shen Qishun¹ Liu Sanqiu³

1 Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240
2 Institute of Physics and Communication and Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027
3 School of Science, Nanchang University, Nanchang 330047

Abstract: Surface refractive index of a monotonously graded-index waveguide, which is greater than the effective index of the fundamental mode and cannot be measured in conventional m-line spectroscopy, is experimentally determined by employing the surface plasma wave (SPW) resonance technique based on analytical transfer matrix (ATM) method. The index profiles predicted are more accurate than those obtained by the conventional inverse WKB (Wentzel, Kramers, Brillouin) method.

Key words: guided wave optics; refractive index profile; analytical transfer matrix (ATM) method; surface plasma wave; graded-index waveguides

1 引 言

渐变折射率平板波导由于其低成本和低损耗的特性, 在光电子器件和集成光学中具有日益重要的应用前景^[1]。由于光波导的折射率分布决定了波导器件的传输特性, 并对波导器件的设计有着重要的指导意义, 因此精确确定波导的折射率分布始终是导波光学的任务之一。确定波导折射分布的主要技术是逆 WKB(Wentzel, Kramers, Brillouin)方法^[2], 由于其具有物理意义清晰、分析简单的特点, 该方法获得了广泛的应用。但由 m-线技术测到的波导基模的有效折射率所对应的位置, 通常离波导表面还有相当的距离。如何确定波导表面的折射率

对折射率分布的确定具有关键的作用。在逆 WKB 方法中, 有光滑过渡法及最小三角形面积法^[2]。也有用有效折射率和模序数的连续函数外推来得到波导表面的折射率^[3]。由于没有实验基础, 这些数学方法得到的结果有相对高的自由度。因而影响了折射率分布的精确测定。

本文提出在波导表面蒸镀一层金属薄膜(金或银), 通过激发金属波导界面上的表面等离子波 (SPW)^[4]来获取波导近表面折射率的信息。利用分析转移矩阵^[5,6]计算了指数、慢变费米和快变费米三类典型分布的波导, 表明这种方法是十分有效的。在此基础上, 用银离子交换波导进行了实验, 并

* 国家自然科学基金(60237010)资助课题。

作者简介: 付国兰(1978~), 女, 江西樟树人, 硕士研究生, 主要从事导波光学的研究。E-mail: guolanfu@yahoo.com.cn。

收稿日期: 2004-04-13; 收到修改稿日期: 2004-06-24

用逆分析转移矩阵方法^[7]和逆 WKB 方法对其折射率进行了拟合。实验结果表明:逆 WKB 方法对表面折射率的确定有很大的偏差。

2 渐变折射率波导的近表面折射率

考虑如图 1 所示的金属覆盖渐变折射率光波导。其中 ϵ_0 和 ϵ_∞ 分别是波导表面和衬底的介电系数, ϵ_c 是金属(金或银)覆盖层介电系数的实部。在可见与近红外波段,金或银介电系数的虚部远小于其实际部的绝对值,因此,表面等离子波的共振角仅与金属介电系数的实部有关,虚部只影响波导的损耗特性,所以在计算中我们忽略了金属介电系数的虚部。一般来说,表面等离子波的有效折射率大于波导的表面折射率,所以在波导内部没有转折点。为利用矩阵方法分析,我们把 $(0, x_s)$ 区域分成厚度为 h 的 l 层薄膜,其中 x_s 为截断点,并假设 $\epsilon(x \geq x_s) = \epsilon_s$ 。截断点的选取由所要求的精确度决定,精确度要求高,截断点则尽量远离表面,反之,则可离表面近些。

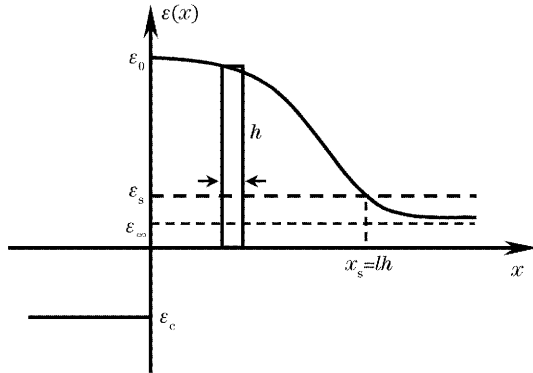


图 1 渐变波导介电常量分布示意图

Fig. 1 Plot of a graded-index waveguide's dielectric constant profile

根据分析转移矩阵方法,表面等离子波的色散方程为

$$\begin{bmatrix} -\frac{P_c}{\epsilon_c} & 1 \\ 1 & -\frac{P_s}{\epsilon_s} \end{bmatrix} \left(\prod_{i=0}^l M_i \right) \begin{bmatrix} 1 \\ -P_s/\epsilon_s \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

式中 P_c, P_s 分别为 $(x < 0)$ 和 $(x > x_s)$ 区域迅衰场的衰减系数。

$$P_c = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_c)^{1/2}, \quad P_s = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_s)^{1/2}, \quad (2)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} \cosh(\alpha_i h) & -\frac{\epsilon_i}{\alpha_i} \sinh(\alpha_i h) \\ -\frac{\alpha_i}{\epsilon_i} \sinh(\alpha_i h) & \cosh(\alpha_i h) \end{bmatrix},$$

$$\alpha_i = [\beta^2 - k_0^2 \epsilon(x_i)]^{1/2}, \quad (3)$$

β 为表面等离子波的传播常量, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空波

数, λ 为真空中的光波长。

(1) 式通过化简可得

$$\begin{bmatrix} -\frac{P_c}{\epsilon_c} & 1 \\ 1 & -\frac{P_s}{\epsilon_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -P_s/\epsilon_s \end{bmatrix} = 0, \quad (4)$$

等效衰减系数 P_i 可通过下式求出

$$\begin{cases} P_i = P_0, \\ P_i = \alpha_i \frac{\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{i+1}} \frac{P_{i+1}}{\alpha_i} \cosh(\alpha_i h) + \sinh(\alpha_i h)}{\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{i+1}} \frac{P_{i+1}}{\alpha_i} \sinh(\alpha_i h) + \cosh(\alpha_i h)}, \\ P_{i+1} = P_s, \end{cases} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, l) \quad (5)$$

P_i 可由一个等效介电系数 ϵ_{eq} 来表征,其定义为

$$P_i = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_{eq})^{1/2}, \quad (6)$$

(4) 式可进一步化简为

$$\epsilon_0 P_c + \epsilon_c P_s = 0, \quad (7)$$

把(2)式和(6)式代入(7)式,我们可得到

$$\frac{\beta}{k_0} = \sqrt{\frac{\epsilon_c^2 \epsilon_{eq} - \epsilon_c \epsilon_0^2}{\epsilon_c^2 - \epsilon_0^2}}. \quad (8)$$

如果已知波导的折射率分布 $n(x)$ 和金属介电系数的实部 ϵ_c , 从(5)式、(6)式和(8)式中就可以获得渐变折射率波导的等效折射率 $n_{eq} = \sqrt{\epsilon_{eq}}$ 。

下面我们以一些实例来计算波导的等效折射率,在计算过程中,采用的波长为 832 nm,金属介电系数的实部为 -30, x 的单位为 μm 。考虑以下几种折射率分布:

1) 指数折射率分布

$$n(x) = 1.512000 + 0.1 \exp(-x/3.0)$$

2) 慢变费米折射率分布

$$n(x) = 1.512000 + \frac{0.1}{1 - \exp(-2.0) + \exp[(x - 3.0)/1.5]}$$

3) 快变费米折射率分布

$$n(x) = 1.512000 + \frac{0.100}{1 - \exp(-10.0) + \exp[(x - 4.0)/0.4]}.$$

上述三种分布的表面折射率相同,都为 1.612000,计算所得的波导等效折射率分别为: 1.607011, 1.610483 和 1.611997,如图 2 所示。从图 2 可以看出,等效折射率比任何导模的有效折射率都更接近于波导的表面折射率。这三种典型折射率分布的等效折射率距离表面的深度都为 0.2 个波长左右,而基模有效折射率的深度一般都在 2 个波长以上。因此,利用表面等离子波采集波导表面附近的信息是有效的。

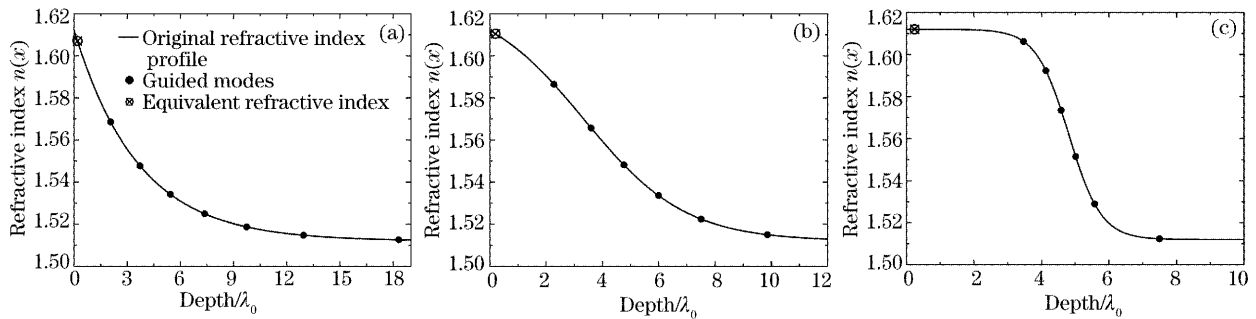


图 2 指数分布波导(a),慢变费米分布波导(b),快变费米分布波导(c)的等效折射率与导模有效折射率的比较

Fig. 2 Comparison of the obtained equivalent refractive index with the guided modes' effective indexes in exponential index profile (a), slow changing Fermi index profile (b) and fast changing Fermi index profile (c)

而在实际的计算中,由于波导的折射率分布是不知道的,不能直接运用(8)式。但根据上面的例子,可令

$$\epsilon_0 = \epsilon_{\text{eq}}, \quad (9)$$

代入(8)式,可得

$$\frac{\beta}{k_0} = \sqrt{\frac{\epsilon_c \epsilon_{\text{eq}}}{\epsilon_c + \epsilon_{\text{eq}}}}, \quad (10)$$

上式为处于介电系数分别为 ϵ_c 和 ϵ_{eq} 的金属层与介质界面处的表面等离子波的色散方程。也就是说,在计算过程中,渐变折射率波导是看作有着等效介电系数 ϵ_{eq} 的均匀介质。

这种近似的精确度很高。对于上述三个例子,用方程(10)计算得到的等效折射率分别为1.606992, 1.610481和1.611997。可见近似(9)式引起的误差很小,与实验测量误差相比可以忽略不计。

因此,在实际的计算中,如果表面等离子波的传播常数 β 和金属介电系数的实部 ϵ_c 已知,由(10)式就可以很方便地确定波导的等效折射率。

3 确定波导的表面折射率

由于波导等效折射率与表面折射率非常接近,所以对确定波导折射率分布是十分有用的。下面我们利用等效折射率和导模的有效折射率来确定波导的表面折射率和波导的折射率分布。主要步骤如下:

1) 测量在波导中激发的表面等离子波和导模的有效折射率。

2) 利用表面等离子波的有效折射率,由(10)式得到等效折射率 n_{eq} 。

3) 在 n_{eq} 的基础上假定一个初始的表面折射率 n_0 ($n_0 > n_{\text{eq}}$),通过逆 WKB 方法确定折射率分布 $n(x)$ 。

4) 把 $n(x)$ 代入(5)式、(6)式、(10)式中,计算

得到一个新的近表面折射率 n'_{eq} 并计算 $\delta = (n_{\text{eq}} - n'_{\text{eq}})$ 。

5) 令 $n_0 = n_0 + \delta$ 重复步骤 2),可以得到新的折射率分布 $n(x)$ 。

6) 重复步骤 4)和步骤 5),直到 $\delta \rightarrow 0$,这时就得到了波导的表面折射率 n_0 和波导的折射率分布 $n(x)$ 。

在这种方法中,表面折射率 n_0 是由实验上来确定的并且是唯一的。而在逆 WKB 方法中, n_0 是由数学方法决定的,并且会由于标准的不同而不同。在那些近表面附近的折射率分布变化不是很快的渐变波导中,我们完全可以令 $n_0 = n_{\text{eq}}$,这样,在确定波导的折射率分布时,只需前面三个步骤即可。

4 实 验

为了从实验上验证上述方法,我们在 342 °C 的温度下用 BK-7 玻璃制备了两个 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换波导。因为金属的介电系数会随着温度、压力以及厚度等条件的变化而变化^[8],而等效折射率很大程度上取决于金属介电系数的实部。所以为了得到波导的等效折射率,用溅射的方法同时在两个波导表面和一个玻璃片表面镀上了厚度为 51 nm 的金膜。使用 832 nm 的波长,首先测量玻璃片中激发的表面等离子波的传播常量,从中可以计算得到金属的介电系数^[9], $\epsilon_c = -27.47170$ 。然后再测量两波导的表面等离子波以及两波导 TE 模的有效折射率,第一个波导有 4 个 TE 导模,标记为 A,而第二个波导有 3 个 TE 导模,标记为 B。再利用方程(10)计算波导的近表面折射率,采用上述步骤计算了波导的表面折射率及其折射率分布。所有的数据都列在表 1 中。图 3 是根据本文提出的方法和传统逆 WKB 方法得到的波导的折射率分布,从中可以

看出,两种方法得到近表面区域的折射率分布的差别比较大,而在远离表面时却相差不大。对于逆 WKB 方法,使用两种不同的数学标准得到的折射

率分布在表面附近的结果是不一样的。而用本文提出的方法可通过实验测定波导的等效折射率,所以可以避免这种不确定性。

表 1 两波导的等效折射率和导模的有效折射率及算得的表面折射率

Table 1 The measured equivalent indexes and the guided mode's effective indexes and the calculated surface indexes of the two waveguides

Waveguide A						Waveguide B				
n_0	n_{eq}	TE ₀	TE ₁	TE ₂	TE ₃	n_0	n_{eq}	TE ₀	TE ₁	TE ₂
1.54906	1.54775	1.54354	1.53296	1.52249	1.51914	1.54398	1.54238	1.53612	1.52294	1.51098

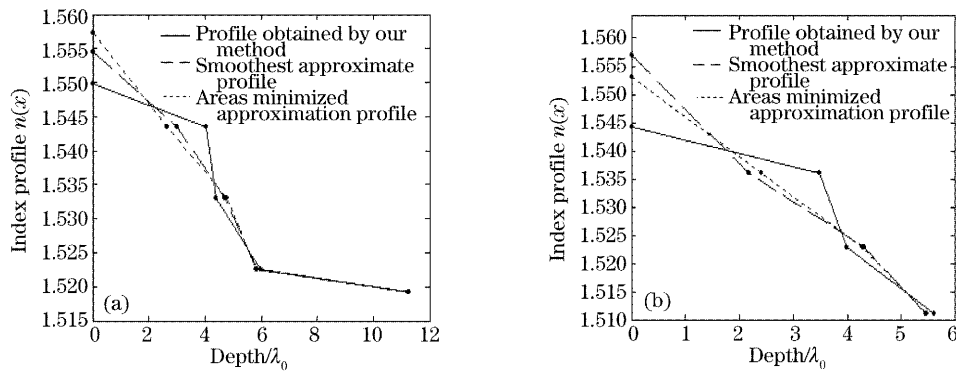


图 3 本文方法和传统逆 WKB 方法得到的波导 A(a)和 B(b)的折射率分布图

Fig. 3 The index profile of the waveguide A (a) and B (b) constructed by our method and by the conventional inverse WKB

5 结 论

本文介绍了一种从实验上确定渐变折射率平板波导的近表面折射率的方法,以及利用近表面折射率来确定波导的表面折射率以及波导的折射率分布的方法,这个方法能有效地解决传统逆 WKB 方法在确定波导表面折射率时存在的高自由度问题,因而可以得到更为精确的结果。

参 考 文 献

- Ramaswamy R. Y., Srivastava R.. Ion-exchanged glass waveguides; a review[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 984~1001
- White J. M., Heidrich P. F.. Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(1): 151~155
- Chiang K. S., Wong C. L., Cheng S. Y. *et al.*. Refractive index profiling of graded-index waveguides from effective indexes measured with different external refractive indexes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(10): 1412~1417
- Jiri Homola, Sinclair S. Yee, Günter Gauglitz. Surface plasma resonance sensors; review[J]. *Sensors and Actuators (B)*, 1999, **54**(1~2): 3~15
- Cao Zhuangqi, Jiang Yi, Shen Qishen *et al.*. Exact analytical method for planar optical waveguides with arbitrary index profile [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1999, **16**(9): 2209~2212
- Cao Zhuangqi, Zhan Li, Chen Yingli. An accurate analysis of graded index optical waveguides. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(12): 1240~1243 (in Chinese)
曹庄琪,詹黎,陈英礼. 渐变折射率光波导的精确分析[J]. *光学学报*, 1994, **14**(12): 1240~1243
- Lu Desen, Cao Zhuangqi, Ding Yuan *et al.*. Graded refractive index profile reconstructions by the inversed analytic transfer matrix method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 307~309 (in Chinese)
陆德森,曹庄琪,丁渊等. 渐变折射率平板波导的逆分析转移矩阵方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 307~309
- Fukui M., Okuno Y., Shinya A. *et al.*. Studies on optical constants of metal films evaporated at low temperatures [J]. *Surface Science*, 1995, **323**(3): 275~281
- Chen W. P., Chen J. M.. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic film[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(2): 189~191