

金属覆盖介质波导在截止点附近的光学特性*

江晓清 杨建义 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘 要 本文提出一种适合于截止点附近计算含金属覆盖层介质波导的近似解析方法, 详细地讨论了在截止点附近的光波导的模式传播特性和光电调制特性, 并结合有效折射率方法讨论了截止型脊形波导调制器的截止条件。

关键词 集成光学, 光波导, 调制器

1 引 言

对金属覆盖的各种介质波导光学特性的研究, 一直是集成光学器件在设计中的重要课题, 然而, 大多数是讨论在远离截止点时光波导的光学特性。许多近似求解含金属覆盖层介质波导的复本征方程的方法, 如各种微扰法^[1-6]、自耦合系数法^[7]、射线法^[2, 8]和等效电流理论^[9]等, 在远离截止区域有较好的近似。在截止点附近, 一般只能用精确的数字解方法, 而且对光波导在截止点附近的模式传播特性的讨论也很少。Borland 等^[10]利用无吸收介质波导的近似, 分析了四层弱吸收介质波导在截止点附近的模式传播特性, Retzon 等^[11]在实验上研制出 GaAs/GaAlAs 单异质结截止型脊形波导调制器, 但没有对含金属覆盖层介质波导从理论上作详细的分析。本文给出一种适合于截止点附近求解的近似解析方法, 详细讨论了含金属覆盖层四层平面波导在截止点附近的模式传播; 根据耦合模理论模拟了截止型光波导的光电调制特性, 并结合简单的有效折射率方法对截止型脊形光波导调制器的截止条件作了分析。

2 理论分析

考虑图 1 所示的含金属覆盖层的四层平面波导(如 Al/GaAlAs/GaAs/GaAlAs 结构), $\text{Re}(n_1) < n_2 \leq n_4 < n_3$ 。设含金属覆盖层波导中的电场(TE 模)为

$$E_y(x, z, t) = E_y(x) e^{-j(\beta z - \omega t)} \quad (1)$$

由于金属具有复折射率($n_1 = n_{1r} - jn_{1i}$), 传播常数 β 是复数, 并满足标量波动方程

$$d^2 E_y / dx^2 - (\beta^2 - k^2 n_i^2) E_y(x) = 0 \quad (2)$$

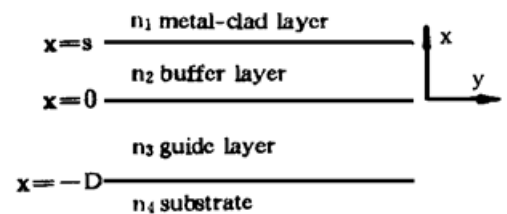


Fig. 1 Schematic of the asymmetric metal-clad four-layer planar dielectric waveguide

* 本课题得到浙江省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995 年 7 月 11 日; 收到修改稿日期: 1996 年 1 月 18 日

其中 $k = 2\pi/\lambda$, n_i 为第 i 层的折射率。当 $kn_4 \leq \text{Re}(\beta) \leq kn_3$ 时, 满足方程(2) 的解为

$$E_y(x) = \begin{cases} A \exp(-p_1 x) & s \leq x \\ B \exp(p_2 x) + C \exp(-p_2 x) & 0 \leq x \leq s \\ E \sin(p_3 x) + F \cos(p_3 x) & -D \leq x \leq 0 \\ G \exp(p_4 x) & x \leq -D \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中 } p_3 = (k^2 n_3^2 - \beta^2)^{1/2}, p_i = (\beta^2 - k^2 n_i^2)^{1/2} \quad (i = 1, 2, 4) \quad (4)$$

根据边界条件, 可得本征方程^[11]

$$\begin{aligned} Dp_3 &= M\pi + \text{tg}^{-1} \left[\mathcal{Y}_{34} p_4 / p_3 \right] + \text{tg}^{-1} \left\{ \mathcal{Y}_{32} p_2 / p_3 \text{th} \left[\text{th}^{-1} \left[\mathcal{Y}_{21} p_1 / p_3 \right] + sp_2 \right] \right\} \\ &= M\pi + \text{tg}^{-1} \left[\mathcal{Y}_{34} \frac{p_4}{p_3} \right] + \text{tg}^{-1} \left[\frac{\mathcal{Y}_{31} \left[p_1 p_2 + \mathcal{Y}_{12} p_2^2 \text{th}(sp_2) \right]}{p_3 \left[p_2 + \mathcal{Y}_{21} p_1 \text{th}(sp_2) \right]} \right] \quad M = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (5)$$

对于 TE 模 $\mathcal{Y}_{ab} = 1$, TM 模 $\mathcal{Y}_{ab} = n_a^2/n_b^2$, M 是模次。对于 TM 模, 应用 H_y 代替(1) ~ (3) 中的 E_y 。

当 $\text{Re}(\beta/k) = n_4$ 时, 认为波导处在截止状态^[2, 11](严格说应该是 $\text{Re}(p_4) = 0$, 但因 β 的虚部一般远小于实部, 两条件近似相等)。因此, 在截止点 $\text{Re}(\beta/k) = n_4$ 附近, 可令

$$\beta = \beta_c + \Delta\beta, \quad \beta_c = kn_4, \quad |\Delta\beta| \ll \beta_c \quad (6)$$

代入(4) 式, 取下列近似(先考虑 $n_2 \neq n_4$)。

$$p_i \approx p_{i0} + k^2 x^2 / p_{i0} \quad (i = 1, 2), \quad p_3 \approx p_{30} - k^2 x^2 / p_{30}, \quad p_4 \approx \sqrt{2kx(1 + x^2/4n_4^2)} \quad (7)$$

$$\text{其中 } x^2 = n_4 \Delta\beta / k, \quad p_{30} = k(n_3^2 - n_4^2)^{1/2}, \quad p_{i0} = k(n_4^2 - n_i^2)^{1/2} \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

因此, 将(7) 式代入(5) 式, 并利用 $\text{tg}^{-1}(\theta_0 + \Delta\theta) \approx \text{tg}^{-1}(\theta_0) + \Delta\theta / (1 + \theta_0^2)$ ($\theta_0 \gg \Delta\theta$) 关系, (5) 式可近似写成(忽略 x^2 以上的项)

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{2\sqrt{2}n_4^2 p_{30}^2 D}{r_{34}(4k^2 n_4^2 + p_{30}^2)} + \frac{2\sqrt{2}n_4^2 p_{30}^3}{r_{34}k(4k^2 n_4^2 + p_{30}^2)(\Psi^2 + \Phi^2)} \left\{ \mathcal{Y}_{31} \Phi \left[\frac{(p_{10}^2 + p_{20}^2)}{p_{10} p_{20}} + 2\mathcal{Y}_{12} \text{th}(sp_{20}) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{\mathcal{Y}_{12} sp_{20}}{\text{ch}^2(sp_{20})} \right\} - \Psi \left[\frac{p_{30}^2 - p_{20}^2}{p_{20} p_{30}} + \mathcal{Y}_{21} \text{th}(sp_{20}) \frac{p_{30}^2 - p_{10}^2}{p_{10} p_{30}} + \frac{\mathcal{Y}_{21} sp_{10} p_{30}}{p_{20} \text{ch}^2(sp_{20})} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$b = 4n_4^2 p_{30}^2 / (4k^2 n_4^2 + p_{30}^2), \quad c = [2\sqrt{2}n_4^2 p_{30}^3 / r_{34}k(4k^2 n_4^2 + p_{30}^2)] [M\pi + \text{tg}^{-1}(\Psi/\Phi) - Dp_{30}] \quad (11)$$

$$\Phi = p_{30} [p_{20} + \mathcal{Y}_{21} p_{10} \text{tg}(sp_{20})], \quad \Psi = \mathcal{Y}_{31} [p_{10} p_{20} + \mathcal{Y}_{12} p_{20}^2 \text{tg}(sp_{20})] \quad (12)$$

方程(10) 可利用 Cardan 公式^[12] 求得(另外两个解不合题意)

$$x = [-q/2 + \sqrt{(p^3/27 + q^2/4)}]^{1/3} - (p/3) [\sqrt{(p^3/27 + q^2/4)}]^{-1/3} \quad (13)$$

$$\text{其中 } p = b - a^3/3, \quad q = c - ab/3 + 2a^3/27 \quad (14)$$

$$\text{因此, 波导的复传播常数为 } \beta = \beta_c + kx^2/n_4 \quad (15)$$

模等效折射率 N_e 和吸收系数 α 分别为

$$N_e = \text{Re}(\beta/k), \quad \alpha = -2\text{Im}(\beta) \quad (16)$$

当 $n_2 = n_4$ 时, $p_2 = p_4 \ll 1$, (5) 式中可先作如下近似 $\text{th}(sp_2) \approx sp_2$, 类似上面的推导便可得到相应的公式, 这里不再推导。

3 数值分析与结论

3.1 模式传播特性

为便于比较, 讨论了文献[4] 给出的 Al/GaAs/GaAlAs 单异质结平面波导例子。图 2 分别是利用公式(15)、文献[4] 的近似方法和精确的数值解在截止点附近 TE₀ 模的计算结果(为

简单起见, 本文仅以 TE_0 模为例), 可见在靠近截止区域用本文给出的近似方法所得到的结果同方程(5)精确的数值解是相吻合的。

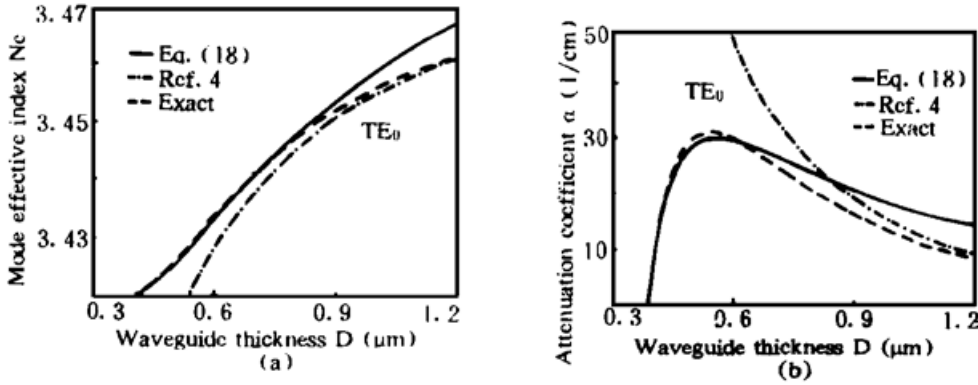


Fig. 2 Mode effective index (a) and attenuation coefficient (b) dependence on guide-layer thickness near cutoff. Results from (full lines) Eq. (18), (dot dash lines) Ref. 4 and (dash lines) accurate numerical results. $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $n_{\text{GaAs}} = 3.48$, $n_{\text{GaAlAs}} = 3.42$, $n_{\text{Al}} = 1.75 - j8.5$

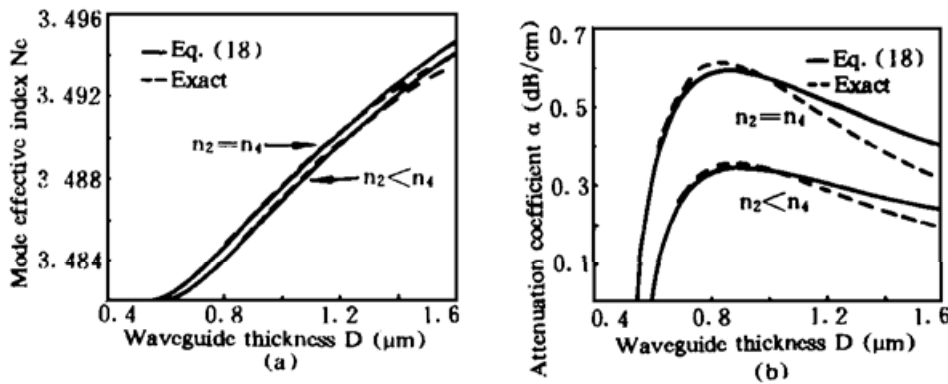


Fig. 3 Mode effective index (a) and attenuation coefficient (b) dependence on guide-layer thickness near cutoff for TE_0 , when cladding layer $s = 0.3 \mu\text{m}$, $n_2 = n_4$ and $n_2 < n_4$. Results from (full lines) Eq. (18) and (dash lines) accurate numerical results. $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.23 - j13.2$, $n_2 = 3.438$ and 3.482 , $n_3 = 3.504$, $n_4 = 3.482$

对于非对称 Al/GaAlAs/GaAs/GaAlAs 双异质结平面波导, 选择波导参数为: 波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, Ga_{1-x}Al_xAs 的折射率由 Sellemter 方程^[13]可得 $3.504 (x = 0)$, $3.482 (x = 0.07)$, $3.438 (x = 0.2)$, 金属铝的复折射率为^[14] $1.23 - j13.2$ 。在截止点附近, 不同上限制层引起波导模式传播特性和电极吸收系数的变化关系如图3所示, 图4为 TE_0 模截止波导厚度 D_c 与不同上限制层之间的变化曲线, 为了比较, 将表面为空气时的情况也画在同一图中。由方程(5)可知, TE_M 模的截止厚度比 TE_0 模大 $M\pi/p_{30}$ 。在截止点附近, 吸收系数存在一个吸收峰, 并随着上限制层的增大而减少, 在靠近截止点急剧下降; 当 $n_2 = n_4$, 且上限制层较薄时, 截止波导厚度 D_c 与上限制层 s 之和基本保持近似不变。

3.2 光电调制特性

由晶体的电光效应可知, 当光沿着 GaAs $\langle 110 \rangle$ 方向传播时, GaAs 折射率随着电极上电压的增大而减小, 变化数量级在 10^{-4} ^[15]。光电调制就是利用波导折射率变化引起其传播模式的变化而实现的。假设电压变化只引起上限制层和波导层的折射率均匀变化, 那么根据耦合理论, 这两个模式之间的归一化耦合系数为^[16]

$$\eta = \left[\int_{-\infty}^{\infty} E_1 E_2^* dx \right]^2 / \int_{-\infty}^{\infty} E_1 E_1^* dx \int_{-\infty}^{\infty} E_2 E_2^* dx \quad (17)$$

式中 E_1 为原场强, E_2 为由折射率变化产生另一模式的场强。另一方面, 折射率变化同时也

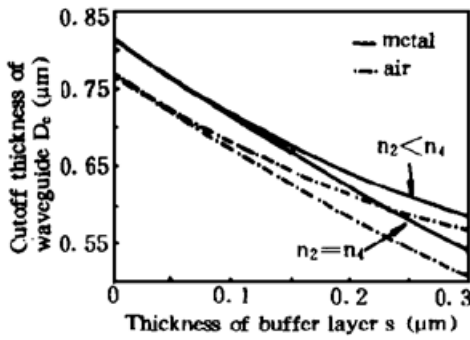


Fig. 4 TE₀ cutoff thickness of waveguide dependences on cladding layer, when the index of buffer layer $n_2 = n_4$ and $n_2 < n_4$. Full lines - metal, dot dash lines - air, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.23 - j13.2$, $n_2 = 3.438$ and 3.482 , $n_3 = 3.504$, $n_4 = 3.482$

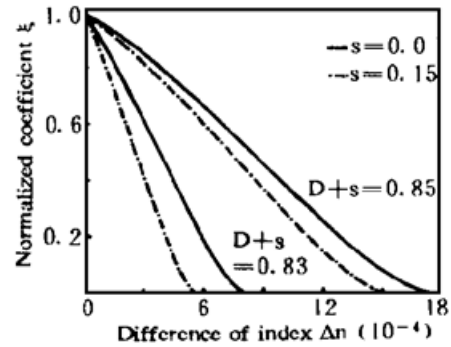


Fig. 5 Normalized coefficient (ξ) as a function of the index difference of guide-layer, when $D + s = 0.85$ and $0.83 \mu\text{m}$. Full lines - $s = 0.0 \mu\text{m}$, dot dash lines - $s = 0.15 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.23 - j13.2$, $n_2 = 3.482$, $n_3 = 3.504$, $n_4 = 3.482$

导致波导的光功率限制系数 Γ ($\Gamma = P_{\text{guide}}/P_{\text{total}}$)^[11] 的变化。因此,波导的强度调制特性可用归一化系数(ξ) 模拟

$$\xi = \text{Re}(\eta\Gamma_0) \tag{18}$$

Γ_0 为归一化光功率限制系数。图 5 为 TE₀ 模在截止点附近由波导层(包括上限制层)折射率变化引起的归一化强度调制特性,其变化规律同文献[11]给出的实验规律相似。 $\eta\Gamma_0$ 的虚部是反映金属覆盖层对调制器的相位调制效应,但它的数值在 10^{-4} 数量级,可忽略不计。TE₀ 模从非截止态过渡到截止时 ($a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$) 相对光强分布如图 6 所示。

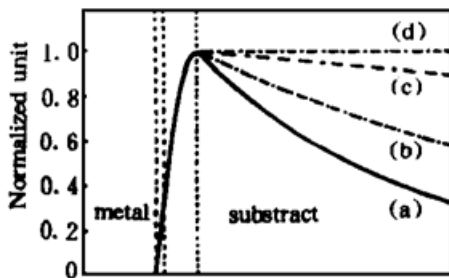


Fig. 6 The distribution of relative intensity of TE₀ from lossy propagation mode to cutoff mode ($a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$)

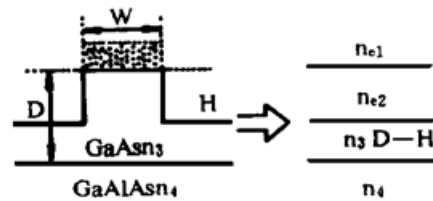


Fig. 7 Schematic of rib waveguide. W : rib width; H : rib high, D : thickness of rib waveguide

3.3 脊形光波导调制器的截止条件

脊形波导是集成光学中最常见的光波导,它通常用简单的有效折射率方法来近似分析,对于弱波导,特别是在靠近波导截止区域的低阶模,有效折射率方法仍是一个很好的近似方法^[11]。可借助于有效折射率方法,将含金属覆盖层的脊形波导等效为图 7 的平面波导来分析。由于脊宽 W 一般远大于波导的截止厚度,用文献[3, 4]的方法可计算模等效折射率。图 8 为不同脊宽时,TE₀ 模截止条件与脊高之间的变化规律,从图 8 可知,只有波导厚度在一定范围内(如当 $W = 5 \mu\text{m}$ 时, D 只能取 $0.82 \sim 0.85 \mu\text{m}$),才能通过脊高来调整波导模式处在截止点。

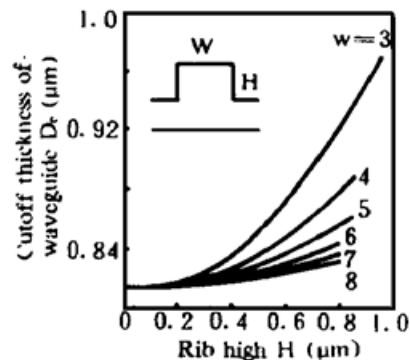


Fig. 8 The cutoff thickness of metal-clad rib waveguide dependences on rib high, when rib width $W = 3, 4, 5, 6, 7, 8 \mu\text{m}$. $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.23 - j13.2$, $n_3 = 3.504$, $n_4 = 3.482$

结 论 综上所述,在截止点附近,本文给出的近似解析方法具有很好的近似,并可方便地应用于具有弱吸收介质波导结构的分析,该分析对实际截止型光波导调制器件的设计是有意义的。

参 考 文 献

- [1] Adams, M. J. . An introduction to optical waveguides. John Wiley & Sons Ltd., 1981: 69, 189
- [2] I. P. Kaminow. Metal-clad optical waveguides: Analytical and experimental study. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 396~ 405
- [3] Yoshihisa Yamamoto, Takeshi Kamiya, Hisayoshi Yanai. Characteristics of optical guided modes in multilayer metal-clad planar optical guide with low-index dielectric buffer layer. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-11**(9): 729~ 736
- [4] Chunsheng Ma, Shiyong Liu. Optical characteristics and mode selection for asymmetric metal-clad waveguides. *Optical and Quantum Electronics*, 1988, **20**: 323~ 328
- [5] Chunsheng Ma, Shiyong Liu. Effect of metal cladding thickness on guided-mode optical characteristics for metal-clad four-layer waveguides. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1990, **7**(9): 1577~ 1581
- [6] V. L. Gupta, Enakshi K. Sharma. Metal-clad and absorptive multilayer waveguides: an accurate perturbation analysis. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1992, **9**(6): 953~ 956
- [7] 金 锋, 范俊清. 集成光学, 北京: 国防工业出版社, 1981: 中册
- [8] Zihua Wang, S. R. Seshadri. Metal-clad planar four-layer waveguides. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1989, **6**(1): 142~ 144
- [9] Yizun Wu. Equivalent current theory of optical waveguide coupling. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, **4**(10): 1902~ 1910
- [10] W. C. Borland, D. E. Zelmon, C. J. Radens *et al.*. Properties of four-layer planar optical waveguides near cutoff. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(7): 1172~ 1179
- [11] Retzon Chen, Chen S. Tsai. GaAs-GaAlAs heterostructure single-mode channel-waveguide cutoff modulator and modulator array. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(12): 2205~ 2208
- [12] Carl E. Pearson. Handbook of applied mathematics. Van Nortrand Reinhold Company. New York, 1974: 43
- [13] 陈益新 等. 集成光学理论和技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 39
- [14] Edward D. Palik. Handbook of optical constant of solids. London, ACADEMIC PRESS. INC, 1985, Chap. 11
- [15] C. A. Berseth, C. Wuethrich, F. K. Reinhart. The electro-optic coefficients of GaAs: measurements at 1.32 and 1.52 μm and study of their dispersion between 0.9 and 10 μm . *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(6): 2821~ 2825
- [16] 蔡伯荣, 谭志飞, 孙守瑶 等. 集成光学, 成都: 电子科技大学出版社, 1990: 83

Optical Characteristics of Metal-Clad Dielectric Waveguide Near Cutoff

Jiang Xiaoqing Yang Jianyi Wang Minghua

(Department of Information & Electronics Eng. Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 11 July 1995; revised 18 January 1996)

Abstract An approximate analytical method is presented for the use of analyzing metal-clad dielectric waveguides near cutoff. The mode propagation and photo-electric modulation characteristics near cutoff are discussed in detail. And, the cutoff condition of rib waveguide cutoff modulator is analysed by using the simple effective index method.

Key words integrate optics, optical waveguide, modulator.