

五层 MOS 光波导 TE 模光学特性的简化分析

马春生 曹 杰 刘式墉
(吉林大学电子科学系, 长春 130023)

提 要

应用一种简化的方法对五层 MOS 光波导的光学特性进行了分析, 给出了 TE 模传播常数和吸收损耗系数的近似计算公式, 并结合计算结果检验了本方法及公式的精度, 为实现波导中 TE₀ 模低损耗单模传输, 讨论了某些波导参数的选择。

关键词 集成光学, MOS 光波导, TE 模, 传播常数, 吸收损耗。

1 引 言

当研究光波导的调制和开关特性时, 要在波导层上加一金属包层以形成电极。由于金属包层的存在必然影响到波导中模的传输, 并引起模的吸收损耗^[1~7]。为了减小金属包层对波导光学特性的影响, 可在波导层和金属包层之间插入一层介质作为缓冲层, MOS 波导就是这种波导结构。当把金属包层视为无限厚时, 这种结构是金属包层四层波导, 介质缓冲层和波导层的厚度都将对波导光学特性产生影响^[7~10]。如果考虑到金属包层具有有限厚度时, 这种结构是金属包层五层波导, 此时金属包层的厚度也将对波导光学特性产生影响^[11]。

众所周知, 要想得到模传播常数和吸收损耗系数的精确结果, 应数值求解模的特征方程。由于金属具有复介电常数, 因此模特征方程是复数超越方程, 数值求解非常繁琐复杂, 为了克服数值求解的困难, 快速实现波导的特性分析计算和结构设计, 本文简化了特征方程的求解过程, 给出了 TE 模传播常数和吸收损耗系数的近似计算公式, 并以半导体集成光学中应用的空气/Au/SiO₂/GaAs/AlGaAs 五层 MOS 光波导为实例进行了相应的计算, 结果表明: 本文的方法和公式具有令人满意的精度, 最后结合计算结果, 讨论了某些波导参量如金属包层, 氧化物缓冲层和波导层的厚度对 TE 模光学特性的影响, 并给出了波导中实现 TE₀ 模低损耗单模传输的条件。

2 理 论 分 析

金属包层五层光波导的结构如图 1 所示, t_1, t_3, t_4 分别为波导层, 介质缓冲层和金属包层的厚度, $n_1, n_2, n_3, \hat{n}_4, n_5$ 分别为波导层, 衬底, 介质缓冲层, 金属包层和其上面的介质层

的折射率, 其中仅 \hat{n}_4 是复的, 并可表示为

$$\hat{n}_4 = n_4 - iK_4, \tag{1}$$

式中 n_4, K 分别为金属包层的实折射率和消光系数, 各介质层的相对介电常数分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_j &= n_j^2, \quad (j=1, 2, 3, 5) \\ \hat{\epsilon}_4 &= \hat{n}_4^2 = n_4^2 - K_4^2 - 2in_4K_4, \end{aligned} \tag{2}$$

对于金属在光频范围内, $n_4 < K_4$, 因此其复介电常数 $\hat{\epsilon}_4$ 的实部和虚部皆为负数, 定义

$$\hat{\epsilon}_4 = -\epsilon_4 - iK_4, \quad (\epsilon_4, K_4 > 0) \tag{3}$$

由(2)式、(3)式得

$$\epsilon_4 = K_4^2 - n_4^2, \quad K_4 = 2n_4K_4 \tag{4}$$

本文仅对 TE 模进行分析, 令 $\hat{\beta}$ 为 TE 模的复传播常数, 则 $\hat{\beta}$ 满足下述金属包层五层光波导的 TE 模特征方程(等价于文献[11]中的 $\delta(c)$ 式)

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_1 t_1 &= n\pi + \text{tg}^{-1} \hat{T}_2 + \text{tg}^{-1} (\hat{T}_3 / \Gamma_3), \tag{5} \\ \hat{T}_3 &= \frac{(\hat{T}_4 \hat{T}_4 + \hat{T}_3) - (\hat{T}_4 \hat{T}_4 - \hat{T}_3) \exp(-2\hat{\gamma}_3 t_3)}{(\hat{T}_4 \hat{T}_4 + \hat{T}_3) + (\hat{T}_4 \hat{T}_4 - \hat{T}_3) \exp(-2\hat{\gamma}_3 t_3)}, \\ \hat{T}_4 &= \frac{(\hat{T}_4 + \hat{T}_5) - (\hat{T}_4 - \hat{T}_5) \exp(-2\hat{\gamma}_4 t_4)}{(\hat{T}_4 + \hat{T}_5) + (\hat{T}_4 - \hat{T}_5) \exp(-2\hat{\gamma}_4 t_4)}, \\ \hat{T}_j &= \hat{\gamma}_j / \hat{\gamma}_1, \quad \hat{\gamma}_1 = (k_0^2 \epsilon_1 - \hat{\beta}^2)^{1/2}, \quad \hat{\gamma}_j = (\hat{\beta}^2 - k_0^2 \epsilon_{0j})^{1/2}, \quad (j=2, 3, 4, 5) \end{aligned} \tag{6}$$

式中 $n=0, 1, 2, \dots$ 为模阶数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空中光波数, λ_0 为真空中光波长, 引入量

$$\begin{aligned} \hat{P} &= (k_0^2 \epsilon_1 - \hat{\beta}^2)^{1/2} / k_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2}, \quad V_1 = k_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} t_1, \\ V_3 &= k_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} t_3, \quad V_4 = k_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} t_4, \quad Q_3 = (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} / (\epsilon_1 - \epsilon_3)^{1/2}, \\ \hat{Q}_4 &= (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} / (\epsilon_1 - \hat{\epsilon}_4)^{1/2}, \quad Q_5 = (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} / (\epsilon_1 - \epsilon_5)^{1/2}. \end{aligned} \tag{7}$$

把(5)式、(6)式简化为

$$\begin{aligned} V_1 \hat{P} &= (n+1)\pi - \text{tg}^{-1} \hat{P} - \text{tg}^{-1} (Q_3 \hat{T}_3 \hat{P}), \tag{a)} \\ \hat{T}_3 &= \frac{(Q_3 \hat{T}_4 + \hat{Q}_4) - (Q_3 \hat{T}_4 - \hat{Q}_4) \exp(-2V_3/Q_3)}{(Q_3 \hat{T}_4 + \hat{Q}_4) + (Q_3 \hat{T}_4 - \hat{Q}_4) \exp(-2V_3/Q_3)}, \\ \hat{T}_4 &= \frac{(Q_5 + \hat{Q}_4) - (Q_5 - \hat{Q}_4) \exp(-2V_4/\hat{Q}_4)}{(Q_5 + \hat{Q}_4) + (Q_5 - \hat{Q}_4) \exp(-2V_4/\hat{Q}_4)}, \end{aligned} \tag{8}$$

这里假设了波导层厚度 t_1 足够大, 以使模离截止区较远, 使得 $|\hat{P}|$ 是一个小量, 因而在(8)式的导出过程中, 含有 \hat{P}^2 的项已略去, 由于 $|\hat{P}|, |Q_3 \hat{T}_3 \hat{P}| \ll 1$, 则(8-a)式又可近似为

$$V_1 \hat{P} = (n+1)\pi - \hat{P} - Q_3 \hat{T}_3 \hat{P}, \tag{9}$$

由(9)式解出

$$\hat{P} = (n+1)\pi / (1 + V_1 + Q_3 \hat{T}_3), \tag{10}$$

由(7)式、(9)式可得

$$\begin{aligned} \hat{\beta} &= k_0 \epsilon_1^{1/2} \left[1 - \frac{(n+1)^2 \pi^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2\epsilon_1 (1 + V_1 + Q_3 \hat{T}_3)^2} \right], \tag{a)} \\ \hat{\Gamma}_3 &= \Gamma_{31} - i\Gamma_{32}, \quad \hat{\Gamma}_4 = \Gamma_{41} - i\Gamma_{42}, \quad \hat{Q}_4 = Q_{41} - iQ_{42}, \tag{b)} \end{aligned} \tag{11}$$

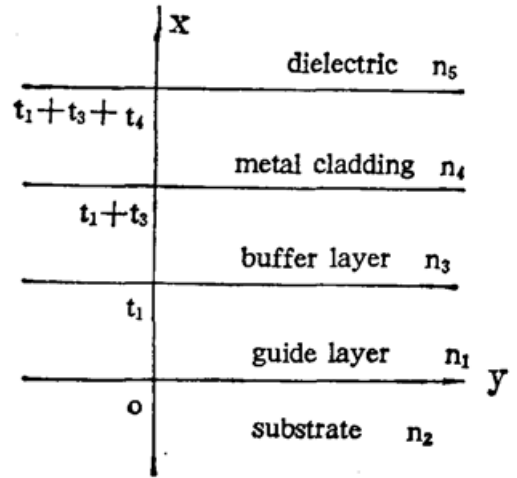


Fig. 1 Cross-section of metal-cladding five-layer optical waveguide with $n_1 > n_2 \geq n_3, n_5$

把(11-b)式 $\hat{\Gamma}_3$ 代入(11-a)式, 并利用 $\beta = \text{Re}(\hat{\beta})$ 和 $\alpha = -2\text{Im}(\hat{\beta})$, 则可得到金属包层五层光波导 TE 模传播常数 β 和吸收损耗系数 α 的近似计算公式为

$$\beta = k_0 \epsilon_1^{1/2} \left\{ 1 - \frac{(n+1)^2 \pi^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2\epsilon_1 [(1+V_1+Q_3\Gamma_{31})^2 + (Q_3\Gamma'_{32})^2]} \cos \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{Q_3\Gamma_{32}}{1+V_1+Q_3\Gamma_{31}} \right) \right] \right\}, \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{k_0(n+1)^2 \pi^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_1^{1/2} [(1+V_1+Q_3\Gamma_{31})^2 + (Q_3\Gamma'_{32})^2]} \sin \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{Q_3\Gamma_{32}}{1+V_1+Q_3\Gamma_{31}} \right) \right], \quad (13)$$

对(7)式和(8)式进行复数运算, 可得 Q_{41} , Q_{42} ; Γ_{31} , Γ_{32} 和 Γ_{41} , Γ_{42} 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} Q_{41} &= \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2}}{[(\epsilon_1 + \epsilon_4)^2 + K_4^2]^{1/4}} \cos \left[\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{K_4}{\epsilon_1 + \epsilon_4} \right) \right], \\ Q_{42} &= \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2}}{[(\epsilon_1 + \epsilon_4)^2 + K_4^2]^{1/4}} \sin \left[\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{K_4}{\epsilon_1 + \epsilon_4} \right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{31} &= \left(\frac{\xi_1^2 + \xi_2^2}{\xi_3^2 + \xi_4^2} \right)^{1/2} \cos [\tan^{-1}(\xi_2/\xi_1) - \tan^{-1}(\xi_4/\xi_3)], \\ \Gamma_{32} &= \left(\frac{\xi_1^2 + \xi_2^2}{\xi_3^2 + \xi_4^2} \right)^{1/2} \sin [\tan^{-1}(\xi_2/\xi_1) - \tan^{-1}(\xi_4/\xi_3)], \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= Q_3\Gamma_{41} \text{th}(V_3/Q_3) + Q_{41}, \quad \xi_2 = Q_3\Gamma_{42} \text{th}(V_3/Q_3) + Q_{42}, \\ \xi_3 &= Q_3\Gamma_{41} + Q_{41} \text{th}(V_3/Q_3), \quad \xi_4 = Q_3\Gamma_{42} + Q_{42} \text{th}(V_3/Q_3), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{41} &= \left(\frac{1+a_4^2-2a_4 \cos \phi_4}{1+a_4^2+2a_4 \cos \phi_4} \right)^{1/2} \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{2a_4 \sin \phi_4}{1-a_4^2} \right) \right], \\ \Gamma_{42} &= \left(\frac{1+a_4^2-2a_4 \cos \phi_4}{1+a_4^2+2a_4 \cos \phi_4} \right)^{1/2} \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{2a_4 \sin \phi_4}{1-a_4^2} \right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(17)式中

$$\left. \begin{aligned} a_4 &= \left[\frac{(Q_5 - Q_{41})^2 + Q_{42}^2}{(Q_5 + Q_{41})^2 + Q_{42}^2} \right]^{1/2} \exp \left(- \frac{2V_4 Q_{41}}{Q_{41}^2 + Q_{42}^2} \right), \\ \phi_4 &= \tan^{-1} \left[\frac{2Q_5 Q_{42}}{Q_5^2 - (Q_{41}^2 + Q_{42}^2)} \right] - \frac{2V_4 Q_{42}}{Q_{41}^2 + Q_{42}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3 算例与讨论

作为实例作者计算了半导体集成光学中应用的空气/Au/SiO₂/GaAs/AlGaAs 五层 MOS 光波导的 TE 模有效折射率 $N (= \beta/k_0)$ 和吸收损耗系数 α , 为了检验本文方法及公式的精度, 复特征方程(5)的数值结果(实线)和公式(12)、(13)的近似结果(虚线)同时在图 2、图 3、图 4 中给出, 计算时有关参量选为: 真空中红外光波长 $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$, 在此波长下, GaAs 波导层和 Al_{0.1}Ga_{0.9}As 衬底可视为非吸收介质, 其折射率分别为 $n_1 = 3.48$, $n_2 = 3.43$ ^[12], SiO₂ 缓冲层的折射率 $n_3 = 1.45$, Au 金属包层为吸收介质, 其折射率 $n_4 = 0.19$, 消光系数 $K_4 = 6.1$ ^[13], 金属包层上面的介质为空气, 其折射率 $n_5 = 1$.

图 2 给出了 TE₀ 模的吸收损耗系数 α 随金属包层的厚度 t_4 的变化曲线. 其中图 2(a) 固定了氧化物缓冲层的厚度 $t_3 = 0.13 \mu\text{m}$, 给出了波导层的几个不同厚度 $t_1 = 1, 2, 3, 4 \mu\text{m}$ 所对应的几条曲线; 图 2(b) 固定了波导层的厚度 $t_1 = 1.25 \mu\text{m}$, 给出了氧化物缓冲层的几个不同厚度 $t_3 = 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1} \mu\text{m}$ 所对应的几条曲线. 可以看出, 在 $0 < t_4 < 0.01 \mu\text{m}$ 范围内, 吸收损耗系数 α 随金属包层的厚度 t_4 的增大而迅速地增大; 在 $t_4 = 0.01 \mu\text{m}$ 附近出

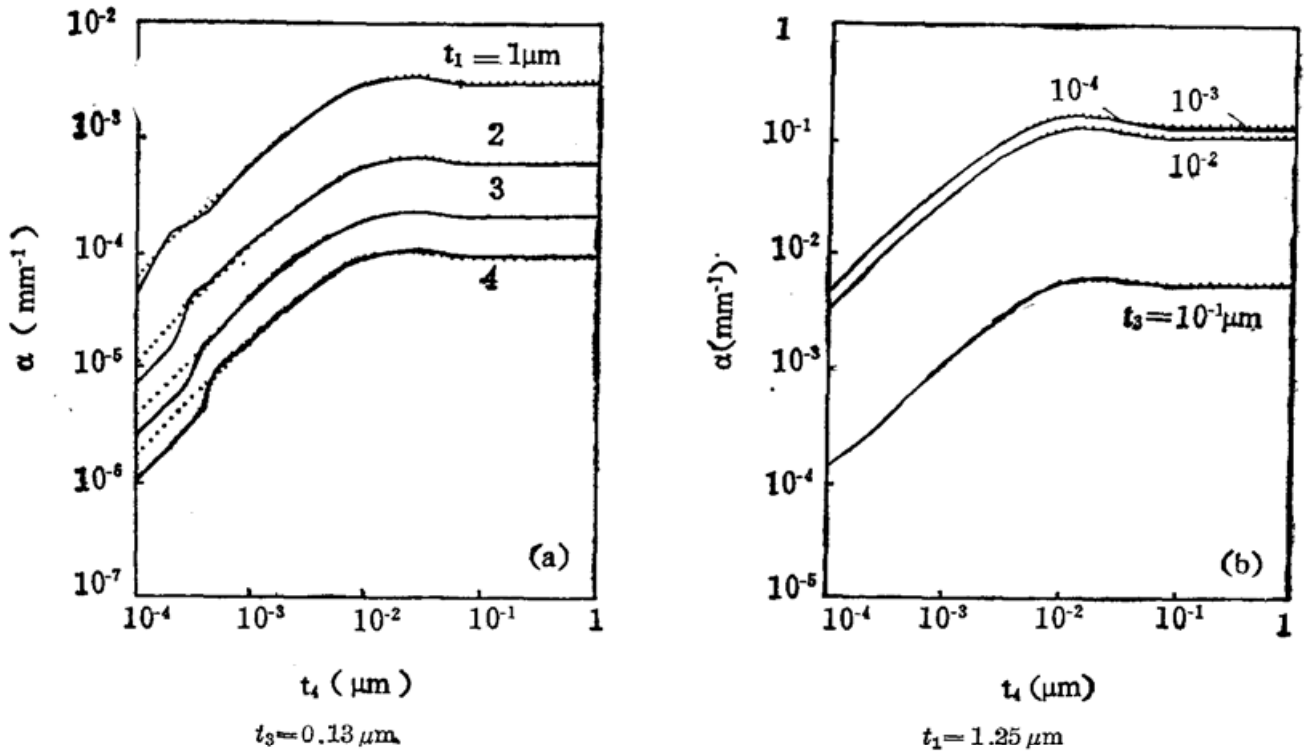


Fig. 2 TE₀ mode absorption loss coefficient α versus metal cladding thickness t_4

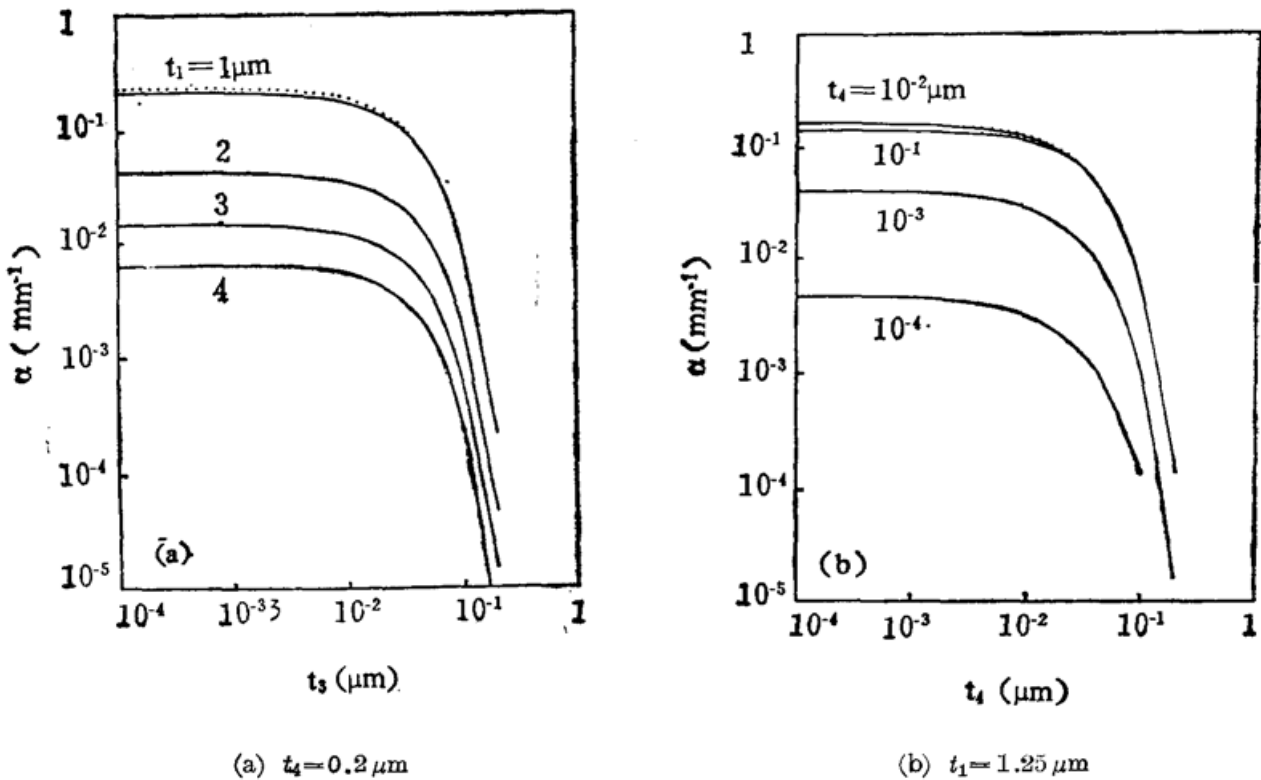


Fig. 3 TE₀ mode absorption loss coefficient α versus oxide buffer layer thickness t_3

现一个平缓的吸收峰; 当 $t_4 \geq 0.1 \mu\text{m}$, 金属包层的厚度 t_4 的变化对模吸收损耗已不产生影响, 吸收损耗系数 α (以及有效折射率 N) 变为常数. 因此在 $t_4 \geq 0.1 \mu\text{m}$ 的情况下, 就分析模的光学特性而言, 则可以把金属包层的厚度视为无限厚, 并可把金属包层五层波导近似为金属包层四层波导, 从而使分析计算得以简化.

图 3 给出了 TE₀ 模的吸收损耗系数 α 随氧化物缓冲层的厚度 t_3 的变化曲线. 其中图 3(a) 固定了金属包层的厚度 $t_4 = 0.2 \mu\text{m}$, 给出了波导层的几个不同厚度 $t_1 = 1, 2, 3, 4 \mu\text{m}$

所对应的几条曲线;图 3(b)固定了波导层的厚度 $t_1=1.25 \mu\text{m}$, 给出了金属包层的几个不同厚度 $t_4=10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1} \mu\text{m}$ 所对应的几条曲线. 可以看出, 在 $0 < t_3 < 0.01 \mu\text{m}$ 范围内, 氧化物缓冲层的厚度 t_3 的改变对模的吸收损耗影响不大, 吸收损耗系数 α 的变化较缓慢; 当 $t_3 > 0.01 \mu\text{m}$, 氧化物缓冲层的厚度 t_3 的改变对模的吸收损耗的影响变大, 随着氧化物缓冲层的厚度 t_3 的增大而迅速地减小. 因此为了减小因金属包层而引起的吸收损耗, 必须增大氧化物缓冲层的厚度. 考虑到波导的光学特性和电学特性, 氧化物缓冲层的厚度 t_3 可在 $0.1 \leq t_3 \leq 0.2 \mu\text{m}$ 范围内选择^[14,15]. 对于那些波导层厚度 $t_1 \geq 1 \mu\text{m}$ 的波导, 此时 TE_0 模的吸收损耗系数 α 将下降到 10^{-2}mm^{-1} 以下.

图 4 给出了 TE 模前五个模式的有效折射率 N 和吸收损耗系数 α 随波导层厚度 t_1 的变化曲线, 此时固定了氧化物缓冲层的厚度 $t_3=0.13 \mu\text{m}$ 及金属包层的厚度 $t_4=0.2 \mu\text{m}$. 由图 4(a) 可以看出, 当 $t_1 \approx 1.25 \mu\text{m}$ 时 TE_1 及其它高阶模已截止, 波导中仅传输 TE_0 模; 由图 4(b) 可以看出, 此时 TE_0 模的吸收损耗系数 $\alpha \approx 2 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. 因此当选择波导层, 氧化物缓冲层和金属包层的厚度分别为 $t_1=1.25 \mu\text{m}$, $t_3=0.13 \mu\text{m}$, $t_4=0.2 \mu\text{m}$ 时, 波导中只允许 TE_0 模进行低损耗单模传输, 而使波导成为低损耗单模波导.

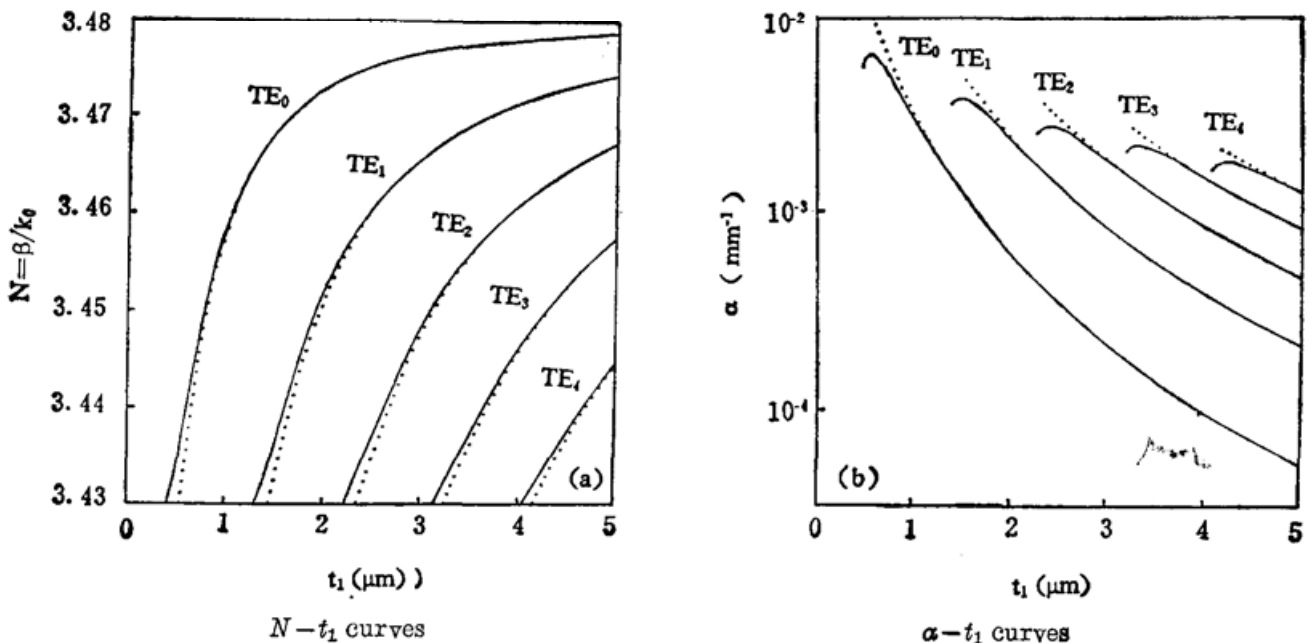


Fig. 4 TE_n mode effective index N and absorption loss coefficient α versus guide layer thickness t_1 , $t_3=0.13 \mu\text{m}$, $t_4=0.2 \mu\text{m}$

由图 2、图 3、图 4 还可以看出, 除了在模临近截止的一个很小的区域外, 在其它广泛的范围内, 应用本方法及相应的 (12) 式、(13) 式所计算的近似结果与模的复特征方程 (5) 的精确结果符合得很好, 从而说明本文给出的方法和公式具有较高的精度.

4 结 束 语

本文给出了一种简单而有效的方法分析了五层 MOS 光波导 TE 模的光学特性, 并给出了相应的近似计算公式, 该方法及相应的公式克服了数值分析的繁琐, 计算量大等缺点, 快速地实现对波导光学特性的分析计算及结构设计, 并能得到令人满意的结果, 这一方法可推

广应用到其它一些具有金属包层的多层波导结构的光电子器件中去, 如调制器, 功率开关, 探测器等等, 因此作者认为本文给出的方法在这些金属包层光波导器件的特性分析计算及结构设计中具有较高的实用价值和广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] T. Takano, J. Hamasaki, Propagating modes of a metal-clad-dielectric-slab waveguide for integrated optics. *IEEE J. Quantum Electron*, 1972, **QE-8**, (2): 206~212
- [2] T. E. Batchman, S. C. Rashleigh, Mode-selective properties of a metal-clad-dielectric-slab waveguide for integrated optics, *IEEE J. Quantum Electron*, 1972, **QE-8**, (11): 848~851
- [3] Y. Suematsu, M. Hakuta, K. Furuya, *et al.*, Fundamental transverse electric field (TE₀) mode selection for thin-film asymmetric light guides. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21** (6): 291~293
- [4] A. Reisinger, Single-mode GaAs-Al_xGa_{1-x}As rib waveguide switches. *Appl. Opt.*, 1973, **12** (5): 1015~1025
- [5] I. P. Kaminow, W. L. Mammel, H. P. Weber, Metal-Clad optical waveguides: analytical and experimental study. *Appl. Opt.*, 1974, **13** (2): 396~405
- [6] S. X. She, Propagation loss in metal-clad waveguides and weakly absorptive waveguides by a perturbation method. *Opt. Lett.*, 1990, **15** (16): 900~902
- [7] S. X. She, Metal-clad multilayer dielectric waveguide: accurate perturbation analysis. *J. Soc. Am. A*, 1990, **7** (9): 1582~1590
- [8] J. N. Polky, G. L. Mitchell, Metal-clad planar dielectric waveguide for integrated optics. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64** (3): 274~279
- [9] Y. Yamamoto, T. Kamiya, H. Yanai, Characteristics of optical guided modes in multilayer metal-clad planar optical guide with low-index dielectric buffer layer. *IEEE. J. Quantum Electron*, 1975, **QE-11** (9): 729~736
- [10] M. Masuda, J. Koyama, Effects of a buffer layer on TM modes in a metal-clad optical waveguide using Ti-diffused LiNbO₃ C-plate. *Appl. Opt.*, 1977, **16** (11): 2994~3000
- [11] C. Y. H. Tsao, L. Li, D. N. Payne, Propagation Characteristics of guided waves in Stratified metallic optical waveguides. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (7): 1316~1325
- [12] H. C. Casey, M. B. Panish, *Heterostructure Lasers*. New York: Academic Press, 1978: 43~44
- [13] W. G. Driscoll, W. Vaughan, *Handbook of Optics*. New York: McGraw-Hill, 1978: 7~150
- [14] J. C. Shelton, F. K. Reinhart, R. A. Logan, Single-mode GaAs-Al_xGa_{1-x}As rib waveguide switches. *Appl. Opt.*, 1978, **17** (6): 890~891
- [15] J. C. Shelton, F. K. Reinhart, R. A. Logan, Rib waveguides switches with Mos electrooptic control for monolithic integrated optics in GaAs-Al_xGa_{1-x}As. *Appl. Opt.*, 1978, **17** (16): 2548~2555

Simplified analysis for TE mode optical characteristics of five-layer MOS optical waveguides

MA CHUNSHANG CAO JIE LIU SHIYONG

(Department of Electronics Science, Jilin University Changchun 130023)

(Received 28 January 1992)

Abstract

A simplified method is presented for analyzing the optical characteristics of the mode in the asymmetric five-layer MOS optical waveguide with finite thicknesses of

the metal cladding and the oxide buffer layer. The approximate formulas are derived for calculating the propagating constant and the absorption loss coefficient of the TE mode. Compared with the calculated results, the accuracy of this method is determined. In order to realize the single-mode propagation in the waveguide with low absorption loss, the selections of some guided parameters are discussed.

Key words integrated optics, MOS optical waveguide, TE mode, propagation constant, absorption loss.

中国自然科学核心期刊百名最新名次排定

光学学报再次入选 位居第 38 名

最新鉴定的百种(1990~1991年)中国自然科学核心期刊,经中国自然科学核心期刊研究课题组使用“引文法”排定名次,并于最近公布。光学学报再次入选,名次由原第 60 名上升到第 38 名。

引文法——选择若干权威期刊作引文源,统计它们引用其它期刊的次数,据此遴选核心期刊。此方法优点明显:论文被同行引用体现了它的价值,由此统计确定核心期刊客观、公正,具有可靠性、权威性。

最新“核心期刊表”每两年公布一次,是期刊学术级别的标志。

中国自然科学核心期刊研究课题组使用“引文法”工作的详细报道见《中国科技期刊研究》1992年第四期。

中国自然科学核心期刊研究课题组 1992-07

注: 1990~1991年中国自然科学核心期刊百名表见本刊本期第 840 页