

# MOS 型波导光学特性分析\*

马春生 刘式墉

(吉林大学, 长春)

1987 年 12 月 15 日收到

本文分析了 MOS 型波导中金属包层对波导光学特性的影响, 给出了 TE 模传播常数和吸收损耗系数的近似计算公式。为了消除由金属包层引起的吸收损耗, 结合计算实例讨论了氧化物缓冲层所需厚度的选择。

**主题词:** 集成光学, MOS 型光波导, 传播常数, 吸收损耗

## 一、引言

为了研究半导体光波导的调制和开关特性, 必须在波导上加一金属层以形成电极, 此时金属包层对波导光学特性必然产生影响。为了减小这一影响, 可在金属层和波导层之间引入一氧化物缓冲层而形成 MOS 型结构。由于金属层具有吸收作用, 精确地分析这种四层结构吸收型波导的光学特性较为复杂。本文给出了一种较为简捷的分析计算方法, 并导出了 TE 模传播常数和吸收损耗系数的近似计算公式, 在模远离截止的条件下可较方便地分析 MOS 型波导中金属包层对其光学特性的影响, 并以半导体集成光学中应用的 Al/SiO<sub>2</sub>/GaAs/AlGaAs 波导为例进行了实算。为了消除金属包层引起的模吸收损耗, 结合实算结果对氧化物缓冲层所需厚度的选择做了讨论(文中带 $\wedge$ 的量皆表复量)。

## 二、理论分析

图 1 所示的 MOS 型波导仅金属层为吸收介质, 其复折射率为

$$n_m = n_m - jk_m \quad (1)$$

式中  $n_m$ ,  $k_m$  分别为金属层的实折射率和消光系数。 $b$ ,  $h$  分别表示波导层厚度和氧化物缓冲层厚度;  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  分别为氧化物缓冲层, 波导层和下限制层介质折射率。此四层介质的相对介电常数分别为

$$\epsilon_i = n_i^2 \quad (i = 0, 1, 2) \quad (2)$$

$$\hat{\epsilon}_m = \hat{n}_m^2 = n_m^2 - k_m^2 - j2n_m k_m \quad (3)$$

对于金属,  $n_m < k_m$ , 因此  $\text{Re}(\hat{\epsilon}_m), \text{Im}(\hat{\epsilon}_m) < 0$ , 若令

$$\hat{\epsilon}_m = -\epsilon_m - jK_m \quad (\epsilon_m, K_m > 0) \quad (4)$$

\* 本文曾在 1987 年 10 月成都第四届全国集成光学学术交流会上交流。

则有

$$\epsilon_m = k_m^2 - n_m^2 \quad K_m = 2n_m k_m \quad (5)$$

MOS 型波导 TE 模特征方程为<sup>[1]</sup>

$$\hat{\gamma}_1 b = n\pi + \operatorname{tg}^{-1} \hat{T}_2 + \operatorname{tg}^{-1} (\hat{T}_0/\delta) \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

其中

$$\delta = \frac{(\hat{T}_m + \hat{T}_0) - (\hat{T}_m - \hat{T}_0) \exp(-2h\hat{\gamma}_0)}{(\hat{T}_m + \hat{T}_0) + (\hat{T}_m - \hat{T}_0) \exp(-2h\hat{\gamma}_0)} \quad (7)$$

$$\hat{T}_i = \hat{\gamma}_i / \hat{\gamma}_1 \quad (i = 0, 2, m) \quad (8)$$

$$\hat{\gamma}_1 = (k_0^2 \epsilon_1 - \hat{\beta}^2)^{1/2} \quad (9)$$

$$\hat{\gamma}_0 = (\hat{\beta}^2 - k_0^2 \epsilon_0)^{1/2} \quad \hat{\gamma}_2 = (\hat{\beta}^2 - k_0^2 \epsilon_2)^{1/2}$$

$$\hat{\gamma}_m = (\hat{\beta}^2 - k_0^2 \epsilon_m)^{1/2} \quad (10)$$

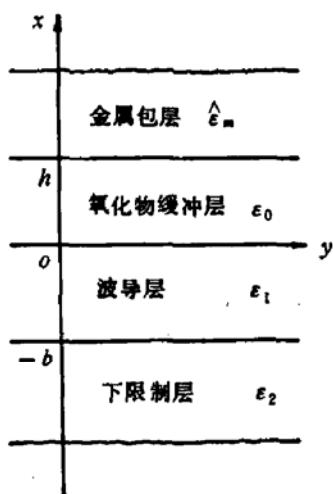


图 1 MOS 型波导横截面图

$n$  为模阶数,  $\hat{\beta}$  为模复传播常数,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为真空中波数,  $\lambda_0$  为真空中激光波长。若令

$$\hat{P} = \frac{(k_0^2 \epsilon_1 - \hat{\beta}^2)^{1/2}}{k_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2}} \quad (11)$$

$$V_b = k_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} b \quad V_h = k_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} h \quad (12)$$

$$Q_0 = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2}}{(\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2}} \quad \hat{Q}_m = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2}}{(\epsilon_1 - \epsilon_m)^{1/2}} \quad (13)$$

则(6)(7)式可化成下述形式

$$V_b \hat{P} = (n+1)\pi - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\hat{P}}{(1-\hat{P}^2)^{1/2}} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta Q_0 \hat{P}}{(1-Q_0^2 \hat{P}^2)^{1/2}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta = & \{ [(1 - \hat{Q}_m^2 \hat{P}^2)^{1/2} Q_0 + (1 - Q_0^2 \hat{P}^2)^{1/2} \hat{Q}_m] - [(1 - \hat{Q}_m^2 \hat{P}^2)^{1/2} Q_0 \\ & - (1 - Q_0^2 \hat{P}^2)^{1/2} \hat{Q}_m] \exp[-2V_h(1 - Q_0^2 \hat{P}^2)^{1/2}/Q_0] \} / \\ & \{ [(1 - \hat{Q}_m^2 \hat{P}^2)^{1/2} Q_0 + (1 - Q_0^2 \hat{P}^2)^{1/2} \hat{Q}_m] + [(1 - \hat{Q}_m^2 \hat{P}^2)^{1/2} Q_0 \\ & - (1 - Q_0^2 \hat{P}^2)^{1/2} \hat{Q}_m] \exp[-2V_h(1 - Q_0^2 \hat{P}^2)^{1/2}/Q_0] \} \end{aligned} \quad (15)$$

一般情况下  $(\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2}, |(\epsilon_1 - \epsilon_m)^{1/2}| \gg (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2}$ , 因此由(13)式可知  $Q_0, |\hat{Q}_m| \ll 1$ , 当模远离截止时波导层厚度  $b$  足够大以致有  $V_b \gg 1, |\hat{P}| \ll 1$ . 在上述条件下(14)(15)式中含有  $\hat{P}^2$  的项可以略去, 从而近似得到

$$V_b \hat{P} = (n+1)\pi - \operatorname{tg}^{-1} \hat{P} - \operatorname{tg}^{-1} (\delta Q_0 \hat{P}) \quad (16)$$

$$\delta = \frac{(Q_0 + \hat{Q}_m) - (Q_0 - \hat{Q}_m) \exp(-2V_h/Q_0)}{(Q_0 + \hat{Q}_m) + (Q_0 - \hat{Q}_m) \exp(-2V_h/Q_0)} \quad (17)$$

由(7)式可知  $|\delta| < 1$ , 又因  $Q_0, |\hat{P}| \ll 1$ , 所以  $|\delta Q_0 \hat{P}| \ll 1$ , 因此(16)式可进一步近似为

$$V_b \hat{P} = (n+1)\pi - \hat{P} - \delta Q_0 \hat{P} \quad (18)$$

由(18)式则可得到

$$\hat{P} = \frac{(n+1)\pi}{1 + V_b + Q_0 \delta} \approx \frac{(n+1)\pi}{1 + V_b} \left( 1 - \frac{Q_0 \delta}{1 + V_b} \right) \quad (19)$$

因此

$$\beta^2 \approx \frac{(n+1)^2 \pi^2}{(1+V_b)^2} \left(1 - \frac{2Q_0\delta}{1+V_b}\right) \quad (20)$$

由(11)式  $\hat{\beta}$  可表示为

$$\hat{\beta} = k_0 \epsilon_1^{1/2} \left(1 - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1} \beta^2\right)^{1/2} \approx k_0 \epsilon_1^{1/2} \left(1 - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2\epsilon_1} \beta^2\right) \quad (21)$$

把(20)式代入(21)式得到复传播常数  $\hat{\beta}$  的表达式为

$$\hat{\beta} = k_0 \epsilon_1^{1/2} \left[1 - \frac{(n+1)^2 \pi^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2\epsilon_1 (1+V_b)^2} \left(1 - \frac{2Q_0\delta}{1+V_b}\right)\right] \quad (22)$$

因为实传播常数  $\beta$  和吸收损耗系数  $\alpha$  与  $\hat{\beta}$  的关系为

$$\beta = \operatorname{Re}(\hat{\beta}) \quad \alpha = -2\operatorname{Im}(\hat{\beta}) \quad (23)$$

我们则可由(12)(22)(23)式得到

$$\beta = k_0 \epsilon_1^{1/2} \left\{1 - \frac{(n+1)^2 \pi^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2\epsilon_1 [1 + k_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} b]^2} \left[1 - \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} \operatorname{Re}(\delta)}{(\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2} [1 + k_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} b]}\right]\right\} \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{2k_0(n+1)^2 \pi^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^{3/2} \operatorname{Im}(\delta^*)}{\epsilon_1^{1/2} (\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2} [1 + k_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)^{1/2} b]^3} \quad (25)$$

其中  $\delta^*$  为  $\delta$  的复共轭, 利用(12)(13)式  $\delta$  可表示为

$$\begin{aligned} \delta = & \{[(\epsilon_1 - \epsilon_m)^{1/2} + (\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2}] - [(\epsilon_1 - \epsilon_m)^{1/2} - (\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2}] \\ & \times \exp[-2k_0(\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2} h]\} / \{[(\epsilon_1 - \epsilon_m)^{1/2} + (\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2}] \\ & + [(\epsilon_1 - \epsilon_m)^{1/2} - (\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2}] \exp[-2k_0(\epsilon_1 - \epsilon_0)^{1/2} h]\} \end{aligned} \quad (26)$$

### 三、实算结果与讨论

作为实例我们对半导体集成光学中应用的 Al/SiO<sub>2</sub>/GaAs/AlGaAs 波导的光学特性进行了实算, 得到模有效折射率  $N (= \beta/k_0)$  和吸收损耗系数  $\alpha$  随氧化物缓冲层厚度  $b$  变化的曲线分别由图 2, 3 给出。有关参量选为: 真空中激光波长  $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$ , 在此波长下, SiO<sub>2</sub> 缓冲层折射率  $n_0 = 1.45$ , GaAs 波导层折射率  $n_1 = 3.48^{[2]}$ , Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As 下限制层折射率  $n_2 = 3.42^{[2]}$ , Al 金属包层折射率  $n_m = 1.75$ , 消光系数  $k_m = 8.5^{[3]}$ 。为了检验本文公式的精度, 复特征方程(6)的数值结果也在图中给出。可以看出波导层厚度  $b$  越大, (24)(25)式的计算结果越精确。

由图 2 可以看出金属包层对波导传输特性的影响较小, 由图 3 可以看出对吸收特性的影响较大, 当氧化物缓冲层厚度  $b$  增大时, 吸收损耗系数  $\alpha$  近于指数减小, 因此欲减小金属包层引起的吸收损耗必需增大氧化物缓冲层的厚度。如规定  $\alpha$  降至  $0.01 \text{ mm}^{-1}$  时认为金属包层引起的吸收损耗已消除, 对于波导层厚度分别为  $b = 1, 2, 3, 4 \mu\text{m}$  的上述 Al/SiO<sub>2</sub>/GaAs/AlGaAs 波导 TE<sub>0</sub> 模, 则所需 SiO<sub>2</sub> 缓冲层厚度分别为  $b = 1550, 1090, 780, 550 \text{ \AA}$ 。因此对于  $b \geq 1 \mu\text{m}$  的这种波导, 可选取 SiO<sub>2</sub> 缓冲层厚度为  $1600 \text{ \AA}$  即可把金属层对 TE<sub>0</sub> 模引起的吸收损耗消除掉。

此外从波导电学特性来看, MOS 型结构中氧化物缓冲层厚度的选择要适当, 既要保

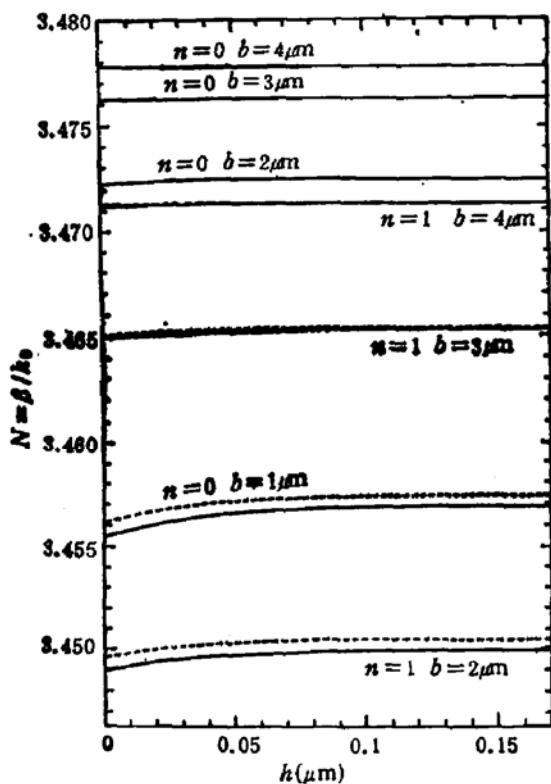


图 2 有效折射率  $N = n / n_0$  随氧化物缓冲层厚度  $h$  变化的曲线  
 — (24)式的结果    - - - (6)式的数值结果

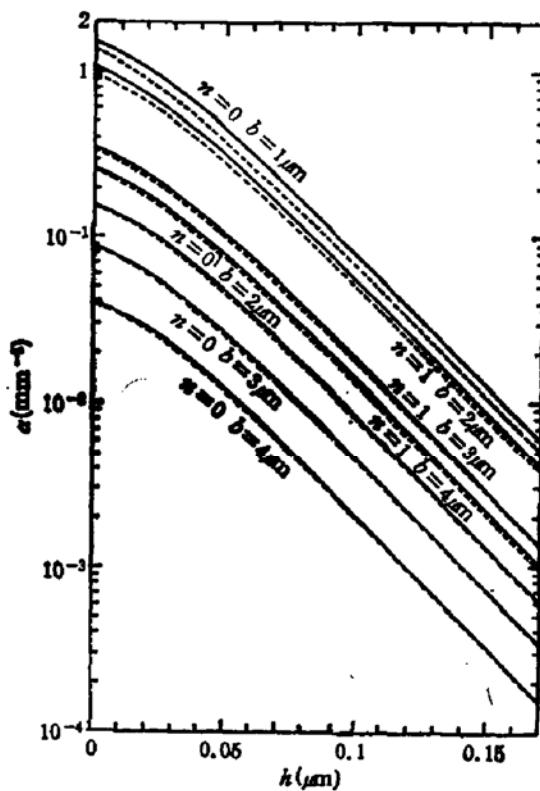


图 3 吸收损耗系数  $\alpha$  随氧化物缓冲层厚度  $h$  变化的曲线  
 — (25)式的结果    - - - (6)式的数值结果

证施加其上的偏压能够发生调制或开关作用, 又要低于击穿电压。如果氧化物缓冲层太薄, 当加上偏压时有可能在发生调制或开关作用之前氧化物缓冲层就被击穿。如果氧化物缓冲层太厚, 则发生调制或开关作用所需的偏压有可能变得很大。厚度为  $h$  的  $\text{SiO}_2$  层的击穿电压为

$$BV = E_{\max}h \quad (27)$$

式中  $E_{\max} \approx 8 \times 10^6 \text{ V/cm}$  为  $\text{SiO}_2$  击穿时的临界电场强度。由(27)式可以算出  $h = 1600 \text{ \AA}$  的  $\text{SiO}_2$  层相应的击穿电压约为 128V。J. C. Shelton 等人设计的 MOS 型  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  波导开关的波导层厚度约为  $0.7-0.8 \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  缓冲层厚度约在  $1500-2000 \text{ \AA}$  之间<sup>[4-6]</sup>, 十分接近我们的理论计算值  $1600 \text{ \AA}$ , 发生开关作用时施加的偏压可达  $-20 \text{ V}$ , 远小于击穿电压。这说明我们给出的  $\text{SiO}_2$  缓冲层厚度的理论计算值从波导的电学特性上看也是十分合理的。

上述氧化物缓冲层的厚度是针对  $\text{TE}_0$  模而选取的。对于  $\text{TE}_1$  及其他高阶模, 由于其吸收损耗比  $\text{TE}_0$  模大, 因此当  $\text{TE}_0$  模的吸收损耗消除时,  $\text{TE}_1$  及其他高阶模的吸收损耗还未完全消除, 当光场在波导中传输时可利用这一点减弱  $\text{TE}_1$  及其他高阶模的强度, 因此经过波导的输出光中  $\text{TE}_0$  模的成分必定大些。如果适当选择波导层和氧化物缓冲层的厚度, 有可能实现  $\text{TE}_0$  模的选择。

本文虽然仅用  $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  一种结构参数的 MOS 型波导检验了近似计算公式(24)(25)的精度和适用范围, 但对于其他各种不同结构参数的 MOS 型波导(24)(25)式具有一定的普适性。在(24)(25)式导出过程中曾采用了  $V_b \gg 1$ ,  $|P|$ ,

$Q_0, |\hat{Q}_m| \ll 1$  的近似, 其中  $|\hat{P}|$  取决于  $V_b$ ,  $V_b$  越大, 则  $|\hat{P}|$  越小, 因此(24)(25)式的精度取决于  $V_b, Q_0, |\hat{Q}_m|$ ,  $V_b$  越大,  $Q_0, |\hat{Q}_m|$  越小, 则(24)(25)式的精度越高, 计算结果越精确。对于各种不同结构参数的 MOS 型波导, 半导体波导层与半导体下限制层的相对介电常数之差  $\epsilon_1 - \epsilon_2$  较小, 而与氧化物缓冲层及金属包层的相对介电常数之差  $\epsilon_1 - \epsilon_0, |\epsilon_1 - \epsilon_m|$  较大, 因此由(13)式定义的  $Q_0, |\hat{Q}_m|$  很小, 由此可知(24)(25)式的精度主要取决于  $V_b$ 。当波导层厚度  $b$  给定后, 由(12)式可知  $\epsilon_1 - \epsilon_2$  越大, 则  $V_b$  越大, (24)(25)式的精度越高。考虑到波导对光场的限制,  $\epsilon_1 - \epsilon_2$  不能很小。 $\epsilon_1 - \epsilon_2 \approx 2n_1\Delta n$ , 实验表明, 当半导体波导层和半导体下限制层的折射率差  $\Delta n = n_1 - n_2 \geq 0.05$  时运用(24)(25)式对各种不同结构参数的 MOS 型波导的计算结果, 当  $b \geq 1\mu\text{m}$  时都是比较精确的, 而这一范围的折射率差  $\Delta n$  亦能满足波导对光场限制的要求。

综上分析, 对于波导层厚度  $b \geq 1\mu\text{m}$ , 波导层和下限制层折射率差  $\Delta n \geq 0.05$  的各种不同结构参数的 MOS 型波导, 运用本文的分析方法和计算公式均能得到其光学特性较为精确的计算结果, 与特征方程的数值结果相比, 大大简化了分析和计算过程, 为 MOS 型波导调制器和功率开关的设计提供了一种简便实用的计算方法。

### 参 考 文 献

- [1] Y. Suematsu, M. Hakuta, K. Furuya, K. Chiba and R. Hasumi, *Appl. Phys. Lett.*, 21(6), 291—293, (1972).
- [2] H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers*, Academic Press, New York, San Francisco, London, 43—44, (1978).
- [3] W. G. Driscoll and W. Vaughan, *Handbook of Optics*, McGraw-Hill Books Company, New York, 7—150, (1978).
- [4] J. C. Shelton, F. K. Reinhart and R. A. Logan, *IEEE Trans. Electron. Devices*, ED-24 (9), 1198, (1977).
- [5] J. C. Shelton, F. K. Reinhart and R. A. Logan, *Appl. Opt.*, 17(6), 890—891, (1978).
- [6] J. C. Shelton, F. K. Reinhart and R. A. Logan, *Appl. Opt.*, 17(16), 2548—2555, (1978).

## Optical Characteristic Analysis of MOS-type Waveguides

Ma Chunsheng and Liu Shiyong

(Jilin University, Changchun)

### Abstract

The effect of the metal clad layer on the optical characteristics in the MOS-type waveguide is analyzed, and the approximate expressions are given for calculating the propagation constant and absorption loss coefficient of TE mode. In order to eliminate the mode losses caused by the metal clad layer, the method for selecting the necessary thickness of the oxide buffer layer is presented and discussed.

**KEY WORDS:** Integrated optics, MOS-type waveguide, Propagation constant, Absorption loss