

# 全内反射型半导体光波导开关 器件模型分析

林雯华 庄婉如 王德煌

集成光电子学国家联合实验室半导体实验区, 北京 100083  
中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 北京大学物理系, 北京 100 871  
(1991年11月4日收到; 1992年2月11日收到修改稿)

本文提出了一种简便可行的全内反射交叉型半导体光波导开关模型分析方法。该方法采用波动光学的原理, 分析了全内反射型 (TIR) 开关中导波模式的传输和反射特性, 采用反射率和透射率计算了开关的消光比、串话、损耗等性能与波导结构参数之间的关系, 并考虑了波导吸收系数对开关性能的影响。对全内反射条件下 Coos-Haenchen 位移也做了讨论。

PACC: 4080L, 4282.

## 一、引言

光波导开关阵列是宽带网络光交换技术及光纤通信系统中的关键部件, 也是光电集成 (OEIC) 与光集成 (PIC) 中的基本元件。为了提高光交换系统以及光纤通信系统的速率及可靠性, 要求光波导开关阵列满足高速、低耗、小体积、可单片集成及实用化的要求, 而且要求开关阵列有很好的特性: 消光比高、插入损耗低、串话低、开关工作电压或电流低、工艺兼容等。因此近几年采用半导体材料制作的光波导开关得到了越来越多的重视。特别是在半导体材料中由于载流子注入引起的能带填充效应 (Bandfilling) 以及量子阱材料中量子限制 Stark 效应, 这两种效应可产生较大的折射率变化<sup>[1,2]</sup>, 利用这些效应可做成一种小尺寸的交叉型全内反射型 (TIR) 光波导开关。这类开关可以有较大的交叉角, 因此器件尺寸很小; 同时器件工艺难度比定向耦合型器件小, 易于半导体有源器件单片集成, 在 OEIC 与 PIC 中有较强的工艺兼容性, 这使得 TIR 型半导体光波导开关发展得很快<sup>[3-4]</sup>。因此对 TIR 开关进行器件模型分析, 在器件设计上保证其具有很好的开关性能是十分重要的。

光波导开关器件模型分析有许多方法。对定向耦合型开关一般采用耦合模理论来分析<sup>[5]</sup>; 对交叉型光波导通常采用数值逼近法来分析, 比如光线传输法 (BPM)<sup>[6]</sup>; 对交叉角小于 $1^\circ$ 的情况, 可采用本征模式的相互作用来分析<sup>[7]</sup>。这些方法结果正确可行, 物理图像清楚, 但计算过程复杂繁琐。

本文针对 TIR 开关提出了一种简单可行的波动光学理论分析方法。该理论采用波动光学的原理, 分析了 TIR 开关中导波模式的传输与反射特性, 采用反射率与透射率计算了全内反射条件下开关的消光比、损耗等性能, 并首次对 TIR 开关串话与波导结构参

数之间的关系给予了考虑。该理论还分析了波导吸收系数对开关性能的影响。对全内反射条件下 Goos-Haenchen 位移也做了讨论。

采用上述 TIR 开关器件模型分析方法,进行了器件设计及器件研制,实验测量结果与理论分析结论相吻合<sup>[4]</sup>,证明了该模型分析方法的正确。

## 二、器件物理模型分析

该模型考虑了波导层的吸收作用,以及电场作用或电流注入作用所引起的吸收系数变化及折射率变化。

TIR 开关示意图见图 1。两个宽为  $W$  的单模波导交叉成  $\theta$  角,总长度为  $L$ ,中央交叉区为由电场作用或电流注入引起的折射率变化区,其长度为  $l_{c.l.c}$ ,宽为  $d_{c.l.c}$ ,且设 1 端为入射端,2 端为直通端,3 端为反射端。

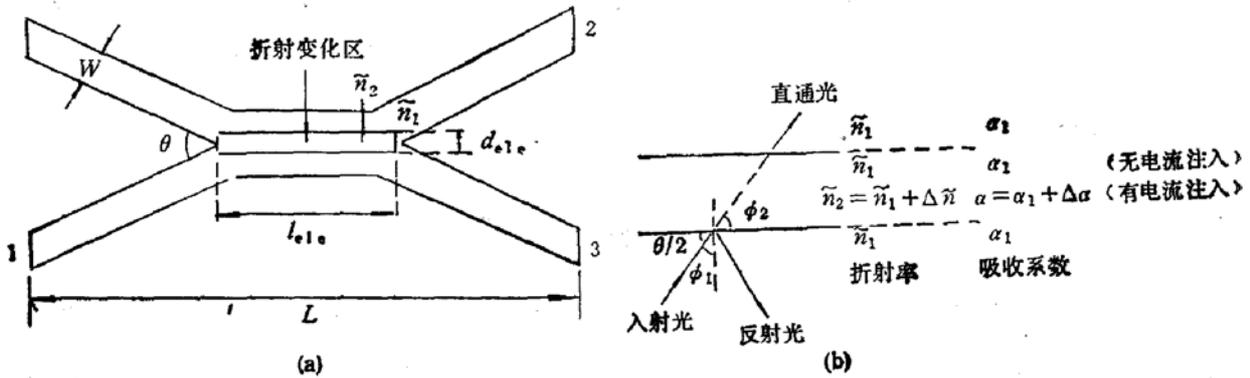


图 1 全内反射 (TIR) 交叉型开关

(a) 结构示意图 (b) 光路传输与反射示意图

设波导的吸收系数为  $\alpha_1$ , 其复数折射率为:

$$\tilde{n}_1 = n_1 - i \frac{\lambda}{4\pi} \alpha_1 \quad (1)$$

由于电场作用或电流注入作用引起的交叉区折射率变化为  $\Delta\tilde{n}$ , 吸收系数变化为  $\Delta\alpha$ , 则有:

$$\Delta\tilde{n} = \Delta n - i \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\alpha \quad (2)$$

有电场或电流作用时交叉区的复数折射率为:

$$\Delta\tilde{n}_2 = \tilde{n}_1 + \Delta\tilde{n} = n_1 + \Delta n - i \frac{\lambda}{4\pi} (\alpha_1 + \Delta\alpha) \quad (3)$$

其吸收系数为:

$$\alpha = \alpha_1 + \Delta\alpha \quad (4)$$

当入射光从 1 端以  $\phi_1$  入射到波导交叉区时, 在折射率变化界面上满足反射或折射定律, 有:

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{\tilde{n}_2}{\tilde{n}_1} = \frac{\tilde{n}_1 + \Delta\tilde{n}}{\tilde{n}_1} \quad (5)$$

当  $\sin \phi_1 < \left| \frac{\tilde{n}_2}{\tilde{n}_1} \right|$  时, 光从 1 端传输到 2 端.

当  $\sin \phi_1 \geq \left| \frac{\tilde{n}_2}{\tilde{n}_1} \right|$  时, 全内反射发生, 光从 1 端反射到 3 端, 实现了光路转换, 此时有

$$|\tilde{n}_1| \geq |\tilde{n}_1 + \Delta\tilde{n}|, \quad (6)$$

因此有:

$$\Delta n < 0. \quad (7)$$

全内反射发生时临界角为:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( 1 + \frac{\Delta\tilde{n}}{\tilde{n}_1} \right). \quad (8)$$

由图 1 可知,  $\theta/2$  与  $\phi_1$  互为余角, 有

$$\theta/2 = \frac{\pi}{2} - \phi_1 \quad (9)$$

为了能够采用波动光学原理分析全内反射条件下光波的传输与反射, 对开关模型进行简化, 假定:<sup>[9]</sup>

(1) 全内反射发生时, 只考虑光波与导波模式的耦合, 不考虑与辐射模式的耦合.

(2) 导波模式采用无限单色平面波展开.

(3) 上述 (1), (2) 只有当入射光在边界上的分布(即等效于折射率变化区长度  $l_{e1}$ ) 比入射光波长长许多时才成立, 因此设折射率变化区长度为无限长. 实际上在实际器件中  $l_{e1} \gg \lambda$ , 可用一定长度的边界代表无限边界.

在上述假设下, 解 Maxwell 方程, 利用边界条件, 得 Fresnel 公式, 得振幅反射率  $r$  与振幅透射率  $t$  分别为:

$$r = \left| \frac{\tilde{n}_1 \cos \phi_1 - \tilde{n}_2 \cos \phi_2}{\tilde{n}_1 \cos \phi_1 + \tilde{n}_2 \cos \phi_2} \right|, \quad (10)$$

$$t = \left| \frac{2\tilde{n}_1 \cos \phi_1}{\tilde{n}_1 \cos \phi_1 + \tilde{n}_2 \cos \phi_2} \right|. \quad (11)$$

由: 反射率

$$R = |r|^2, \quad (12)$$

光强透射率

$$T = \left| \frac{\tilde{n}_2}{\tilde{n}_1} \right| |t|^2. \quad (13)$$

将(1)(2)(3)(5)(9)式代入(12)(13)式中, 得:

$$R = \left\{ \left( (n_1 - jk_1) \sin \frac{\theta}{2} - [(n_1 + \Delta n) - j(k_1 + \Delta k)] \right) \cdot \sqrt{1 - \left[ \frac{(n_1 - jk_1) \cos \frac{\theta}{2}}{(n_1 + \Delta n) - j(k_1 + \Delta k)} \right]^2} \right\}^2$$

$$\left\{ (n_1 - ik_1) \sin \frac{\theta}{2} + [(n_1 + \Delta n) - i(k_1 + \Delta k)] \sqrt{1 - \left[ \frac{(n_1 - ik_1) \cos \frac{\theta}{2}}{(n_1 + \Delta n) - i(k_1 + \Delta k)} \right]^2} \right\}^2, \quad (14)$$

$$T = \left| \frac{(n_1 + \Delta n) - i(k_1 + \Delta k)}{n_1 - ik_1} \right| \left| \frac{2(n_1 - ik_1) \sin \frac{\theta}{2}}{(n_1 - ik_1) \sin \frac{\theta}{2} + [(n_1 + \Delta n) - i(k_1 + \Delta k)] \sqrt{1 - \left[ \frac{(n_1 - ik_1) \cos \frac{\theta}{2}}{(n_1 + \Delta n) - i(k_1 + \Delta k)} \right]^2}} \right|^2 \quad (15)$$

其中:

$$k_1 = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha_1, \quad \Delta k = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta \alpha. \quad (16)$$

定义 TIR 开关中几项性能参数有:

① 消光比  $E$ :

直通端消光比定义为:

$$E_t = 10 \log \frac{I_t(0)}{I_t(I)} = 10 \log \frac{1}{T}. \quad (17)$$

$I_t(0)$ ,  $I_t(I)$  分别表示  $\Delta \tilde{n} = 0$  和  $|\Delta \tilde{n}| < 0$  (有电场作用或电流注入作用时) 直通端的输出光强.

反射端消光比定义为:

$$E_r = 10 \log \frac{I_r(I)}{I_r(0)}. \quad (18)$$

$I_r(I)$ ,  $I_r(0)$  分别表示  $|\Delta \tilde{n}| < 0$  与  $\Delta \tilde{n} = 0$  时反射端的输出光强. 在计算中, 由假设 (1), 不考虑全内反射时导波模式与辐射模式的耦合, 而考虑反射损耗.

② 串话  $CT$ :

定义为两个输出端光强之比的最小值, 有

$$CT = \text{MIN} \left( 10 \log \frac{I_r(0)}{I_t(0)}, 10 \log \frac{I_t(I)}{I_r(I)} \right),$$

即

$$CT = \text{MIN} \left( 10 \log \frac{R}{T}, 10 \log \frac{T}{R} \right). \quad (19)$$

③ 吸收损耗  $L_a$ :

$L_a$  为  $\Delta \tilde{n} = 0$  时由于波导中自由载流子吸收引起的损耗, 有

$$L_a = 10 \log e^{-\alpha_1 L / \cos \theta / 2}. \quad (20)$$

④ 反射损耗  $L_r$ :

TIR 开关中, 由于反射面上反射率  $< 100\%$  而引起的损耗, 即反射损耗  $L_r$ , 定义为:

$$L_r = 10 \log \frac{1}{R} \quad (21)$$

三、数值计算结果

采用(14)(15)式, 对 TIR 开关的主要参量(17)(19)(20)(21)式进行了数值计算, 其

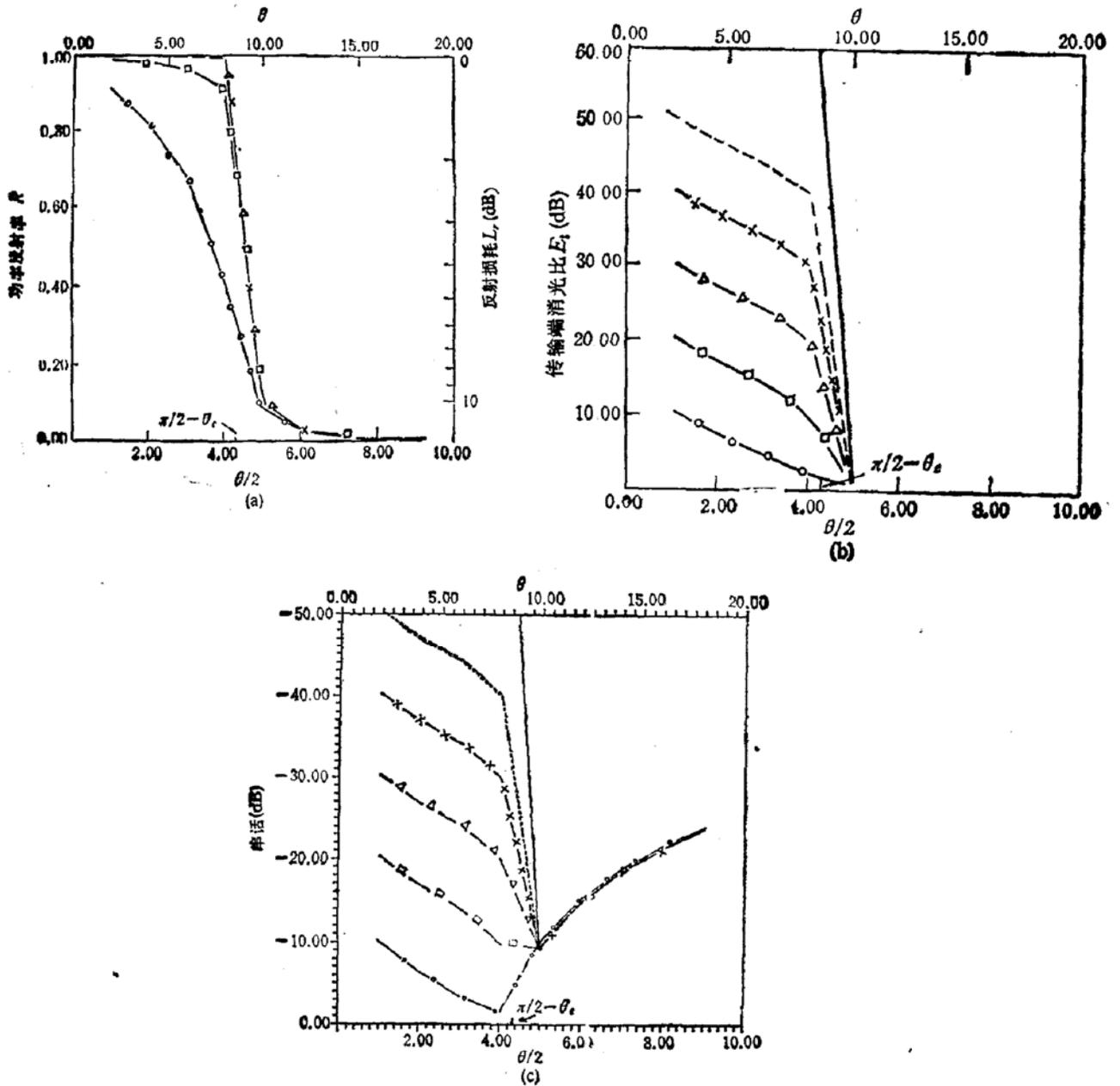


图 2 (a) 全内反射开关中, 功率反射率与交叉角  $\theta$  之间的关系 (b) 全内反射开关中, 传输端消光比与交叉角  $\theta$  之间的关系 (c) 全内反射开关中, 串话与交叉角  $\theta$  之间的关系

$n_1 = 3.55 \quad \Delta n = -0.01 \quad \lambda = 0.87 \mu\text{m}$

—  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$     —  $\Delta$  —  $\alpha = 10^3 \text{ cm}^{-1}$     - - -  $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$     —  $\square$  —  $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$   
 —  $\times$  —  $\alpha = 10^2 \text{ cm}^{-1}$     —  $\circ$  —  $\alpha = 10^5 \text{ cm}^{-1}$

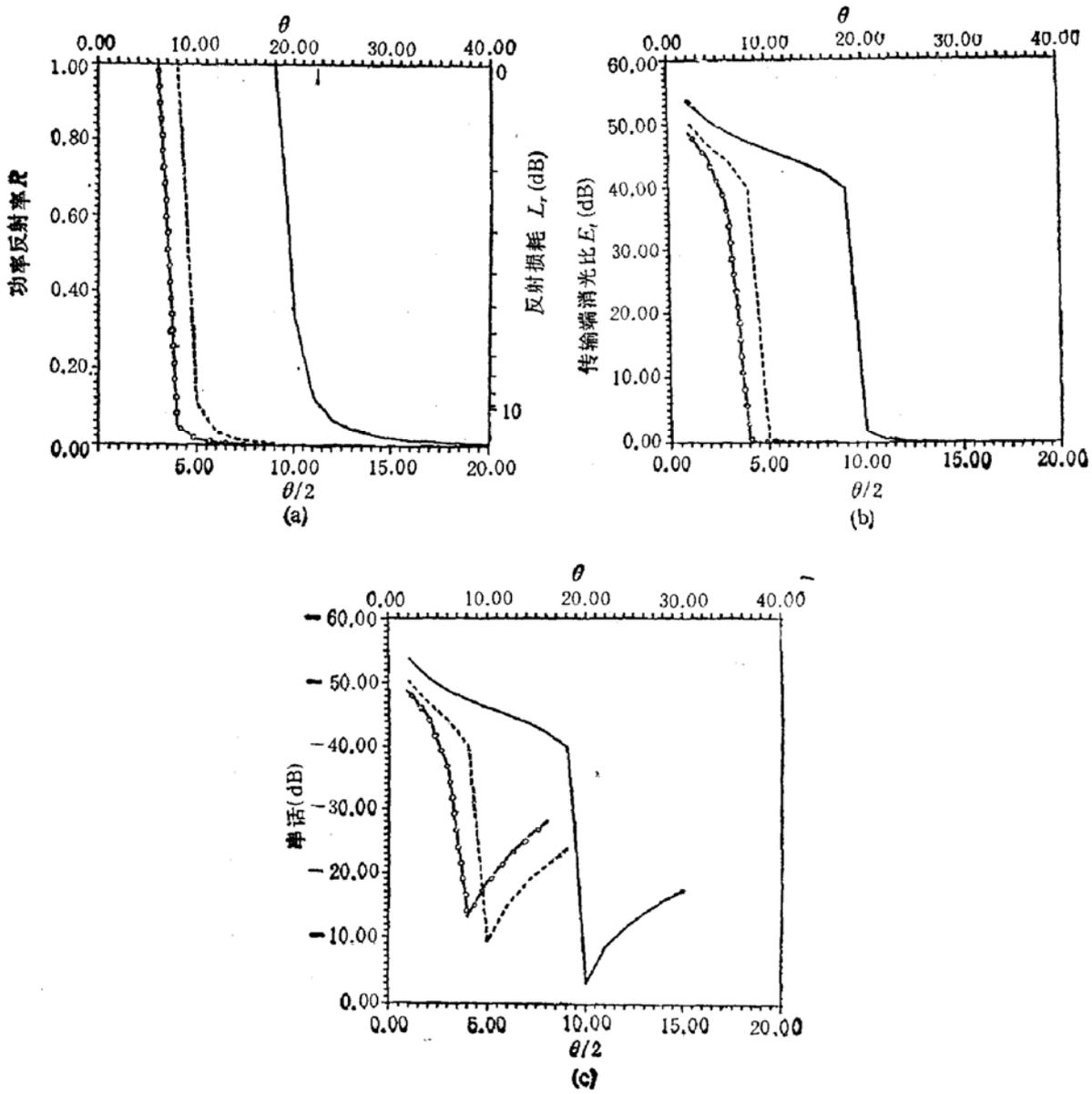


图 3 不同折射率变化下,反射率  $R$ (a)、传输端消光比  $E_t$ (b),串话  $CT$ (c) 与交叉角  $\theta$  之间的关系

$$n_1 = 3.55 \quad \alpha = 10 \text{ cm}^{-1} \quad \lambda = 0.87 \mu\text{m}$$

—  $\Delta n = -0.05$     - - -  $\Delta n = -0.01$     - o - o -  $\Delta n = -0.005$

结果见图 2(a)(b)(c), 图 3(a)(b)(c) 及图 4。

可以得出以下几点结论:

1. 从图 2 中可见,当  $\theta/2$  小于  $\frac{\pi}{2} - \theta_c$  时,角度越小,反射率越接近 1。当吸收系数  $\alpha$  小于  $10^2$  时,可以得到很高的传输端消光比 ( $> 30 \text{ dB}$ ) 和很小的串话 ( $< -30 \text{ dB}$ )。但  $\theta/2$  小于  $1^\circ$  时,导波模式发生耦合作用使串话增大,波动光学的方法在极小角度下不再适用,因此交叉角不能太小。此外从图 2(a) 中可以看出,吸收系数越小,反射损耗也越小;当吸收系数接近于 0 时,反射损耗可下降到 1 dB 以下。

2. 从图 3 可以看出,  $\theta/2$  小于  $\frac{\pi}{2} - \theta_c$  时,  $\Delta n$  变化越大,越有利于提高 TIR 开关

的各种性能,同时传输角  $\theta/2$  越大,发生全内反射时所需  $\Delta n$  也越大。从计算曲线上还可以看出在临界角处开关曲线陡直,呈阶跃变化;在  $\theta/2 = \frac{\pi}{2} - \theta_c$  时,虽发生全内反射现象,但变化陡变,不宜在此点工作。

3. 从图 2 中可以看出波导层吸收系数对 TIR 开关性能的影响,当波导层吸收系数小于  $10 \text{ cm}^{-1}$  时,对开关性能影响不大,但从图 4 中可以看出,对吸收损耗影响很大;当波导层吸收系数大于  $10 \text{ cm}^{-1}$  时,开关性能严重下降;当波导层吸收系数接近于  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  时,波导处于吸收区,开关性能极差。因此要选择入射光波长处于波导的带隙透明区,同时降低吸收系数,提高开关性能。

此外在 TIR 开关中,折射率变化区宽度  $d_{e1c}$  起着很重要的作用。减小  $d_{e1c}$  宽度,可以减小折射率变化区尺寸;但  $d_{e1c}$  过窄,就必须考虑 Goos-Hanenchén 位移的影响。在全内反射过程中,光能透过一定深度后再折回来,即发生 Goos-Hanenchén 位移现象,见图 5 所示,其透入深度可表示为<sup>[9]</sup>:

$$d_{pen}(\theta, \tilde{n}_1) = \frac{1}{r} \left| \frac{\lambda}{2\pi\tilde{n}_2 \sqrt{\left(\frac{\tilde{n}_1}{\tilde{n}_2} \cos \frac{\theta}{2}\right)^2 - 1}} \right| \quad (22)$$

为保证全内反射现象发生,要求折射率变化宽度大于透入深度,即

$$d_{e1c} > d_{pen}$$

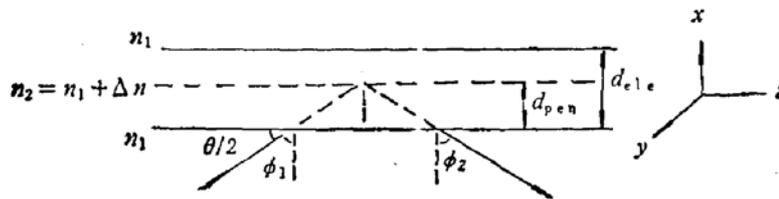


图 5 全内反射开关中, Goos-Hanenchén 位移示意图

因此在 TIR 开关设计时,取  $d_{e1c}$  为几个  $d_{pen}$  宽,以确保全内反射的进行。

## 四、结 论

上文中采用了波动光学原理的分析方法对 TIR 开关模型进行了分析,得到了开关的消光比、反射损耗、串话、吸收损耗等性能参数与波导结构参数之间的关系,并分析了波导吸收系数对开关性能的影响。数值计算结果表明,采用该方法,可以对 TIR 开关的各种

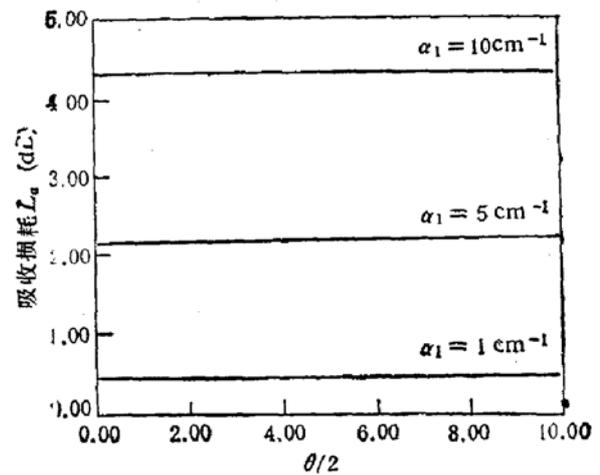


图 4 吸收损耗与交叉角,吸收系数之间的关系

性能做出较全面的理论解释,并进行定量分析,为器件设计与开关性能的改进提供了可靠的依据。

采用上述器件模型分析方法及数值计算结果,我们设计并研制了 GaAs 系的电流注入型 TIR 开关<sup>[1]</sup>,交叉角分别为  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ 。实验结果表明:在全内反射发生时, $4^\circ$  的开关比  $6^\circ$  的开关有较小的注入开关电流,这说明小角度 TIR 开关在较小的  $\Delta n$  下就可以发生全内反射现象,与理论计算结论一致。从开关性能测试结果看, $4^\circ$  的 TIR 开关串话比  $6^\circ$  开关大,这与图 3(c) 的结论相吻合。但由于实际工艺的限制,测量到的串话值达不到理论上的预期结果。

有一点需说明,上述波动光学的理论没有涉及导波模式。事实上,不管是多模还是单模光波导开关,只要开关是依靠全内反射原理来工作,都会获得同样较好的开关特性<sup>[1]</sup>。但这种模型分析方法不适用于小角度多模交叉 X 型波导开关,其工作原理是基于模式相干与模式转换原理<sup>[7]</sup>,不同阶的模式相干条件不一样,将会影响到消光比、串话等性能。

### 参 考 文 献

- [1] K. Ishida, H. Inoue, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **50**(3), 141(1987).
- [2] T. Kikugawa, *et al.*, *Proceedings of Europe Conference on Optical Communication*, 1988, Part 1, 288—291.
- [3] M. Renaud, *et al.*, *Proceedings of Europe Conference on Optical Communication*, 1990, 217—220.
- [4] Fumihiko Ito, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-25**(7), 1677(1989).
- [5] C. Vassallo, *J. Lightwave Tech.*, **LT-6**(2), 294(1988).
- [6] Andreas Neyer, *et al.*, *J. Lightwave Tech.*, **LT-3**(3), 635(1985).
- [7] Andreas Neyer, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20**(9), 999(1984).
- [8] 林雯华、庄婉如、杨培生、李任等, 91, 光电子器件与集成技术年会会议文集, 1991。  
庄婉如, 林雯华等, *半导体学报*, **14**(1), (1993)。
- [9] Kazuhiko Shimomura, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-26**(5), 883(1990).

## Modeling Analysis of Total-Internal-Reflection Semiconductor Optical Switch

Lin Wenhua, Zhuang Wanru

*Institute of Semiconductors, Academia Sinica, National Integrated Optoelectronics Laboratory, Beijing 100083*

Wang Dehang

*National Integrated Optoelectronics Laboratory, Beijing 100083*

*Department of Physics, Peking University, Beijing, 100871*

(Received 4 November 1991; Revised manuscript Received 11 February 1992)

### Abstract

A simply and practical modeling of the Total-Internal-Reflection (TIR) waveguide optical switch is carried out. The reflection phenomenon of the guided mode in optical switches with intersecting single-mode waveguide is investigated by the wave optics. Numerical results indicating variation of the reflectivity, extinction ratio and reflection loss with waveguide parameters are given. The crosstalk of TIR optical switch is presented. The various absorption coefficients as a function of the performance of TIR switch is calculated. Goos-Haenchen shift under the condition of TIR is also discussed.

**PACC:** 4080L, 4282