

文章编号: 0253-2239(2003)10-1187-4

# 扩展多模波导全内反射型 Y 分叉开关的分析\*

占恒正 江晓清\*\* 陈克坚 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘要:** 利用全内反射和波导理论,分析了多模波导反射区全内反射(Total Internal Reflection, TIR)型光开关的物理模型和降低串音和损耗的原因,给出改进 Y 分叉全内反射型光开关特征的近似计算方法。数值模拟表明,扩展多模波导的 Y 分叉全内反射开关的串音和损耗可分别下降 15.5 dB 和 0.65 dB 以上。

**关键词:** 集成光学; 光开关; 全内反射(TRI); 多模波导

中图分类号: TN256 文献标识码: A

## 1 引 言

光开关与光开关阵列作为各种网络中光交换的重要器件,人们对它的研究已经有二十多年的历史。近年来采用全内反射(TIR)结构的光波导开关得到越来越多的重视,全内反射光开关具有器件尺寸小,与偏振无关,易于与半导体有源器件单片集成,有较强的工艺兼容性,尤其全内反射所形成的开关为数字型光开关,使得全内反射型光波导开关发展很快。利用半导体材料载流子注入而引起的等离子效应,以及量子阱中的量子限制斯塔克(Stark)效应等,可以产生较大的折射率变化,使得这种小尺寸交叉型全内反射型光波导开关成为可能。然而传统的 X 结或 Y 分叉全内反射开关(图 1)的明显缺点是开关消光比小、串音和损耗大,使得传统的 X 结和 Y 分叉全内反射波导型光开关很难达到实用的标准。改进全内反射光开关的方法主要有优化注入区的结构<sup>[1]</sup>、优化分支波导结构<sup>[2]</sup>、扩展反射区的波导宽度<sup>[3,4]</sup>。其中扩展多模波导反射区的波导宽度方法可有效降低开关的串音和损耗,但文献只给出结果,并没给出优化的分析方法。本文结合全反射理论和

波导理论分析了传统 Y 分叉全内反射高串音的原因,并提出了优化开关特性的近似计算方法。

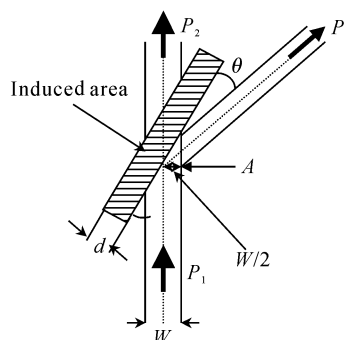


Fig. 1 Structure of Y-branch based on TIR  $\theta = 1.5^\circ$ ,  $n_0 = 3.3839, n_1 = 3.3923, d = 5 \mu\text{m}, W = 3 \mu\text{m}$

## 2 理论分析

传统 Y 分叉全内反射的基本结构如图 1。图中阴影部分为注入反射区,其厚度为  $d$ ,进入全反射状态时,该区的折射率为  $n_2$ ,波导区的折射率为  $n_1$ ,其他区域的折射率为  $n_0$ ,反射角为  $90^\circ - \theta$ ,依据文献[5],其全内反射的反射率和透射率为

$$R = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^2 \text{sh}^2 k_q d}{(n_1^2 - n_2^2)^2 \text{sh}^2 k_q d + 4n_1^2 \cos^2(90^\circ - \theta) [n_1^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]}, \quad (1)$$

$$T = \frac{4n_1^2 \cos^2(90^\circ - \theta) [n_1^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]}{(n_1^2 - n_2^2)^2 \text{sh}^2 k_q d + 4n_1^2 \cos^2(90^\circ - \theta) [n_1^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]}, \quad (2)$$

式中  $k_q = \frac{2\pi}{\lambda} [n_1^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]^2$ 。

由于(1)式、(2)式为均匀平面波传播的反射和透射公式,但光在波导中传播并不是均匀平面波,而是以该波导的本征模传播,因此(1)式、(2)式中的

\* 国家自然科学基金(60177012)、国家重点基础研究发展规划(G1999033104)和国家教育部骨干教师资助课题。

\*\* E-mail: iseejq@zju.edu.cn

收稿日期: 2002-05-30; 收到修改稿日期: 2002-10-25

波导的折射率  $n_1$  应由有效折射率  $n_{\text{eff}}$  代替,即

$$R = \frac{(n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)^2 \text{sh}^2 k_q d}{(n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)^2 \text{sh}^2 k_q d + 4n_{\text{eff}}^2 \cos^2(90^\circ - \theta) [n_{\text{eff}}^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]}, \quad (3)$$

$$T = \frac{4n_{\text{eff}}^2 \cos^2(90^\circ - \theta) [n_{\text{eff}}^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]}{(n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)^2 \text{sh}^2 k_q d + 4n_{\text{eff}}^2 \cos^2(90^\circ - \theta) [n_{\text{eff}}^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]}, \quad (4)$$

同样式中的  $k_q = \frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff}}^2 \sin^2(90^\circ - \theta) - n_2^2]^2$ 。根据(3)式、(4)式可知:当  $n_{\text{eff}} = n_2$  (没有设置反射区)时,  $R = 0, T = 1$ 。当  $n_{\text{eff}} > n_2$  时,  $R \neq 1, T \neq 0$ , 表明光一部分从反射端射出,一部分从直通端射出,即在满足全反射条件时,由于格斯-亨兴(Göss-Hänchen)位移的存在和有限束宽等因素<sup>[6]</sup>,光仍有一部分透射,折射率差( $\Delta n = n_{\text{eff}} - n_2$ )越大,反射率也越大(图2)。

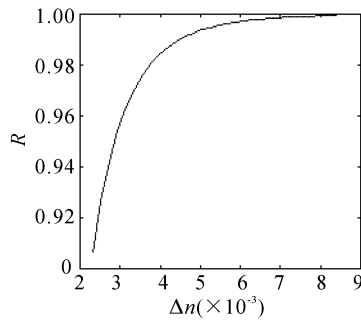


Fig. 2 Relation curve between  $R$  and  $\Delta n$ ,  $\theta = 1.5^\circ$ ,  $n_2 = 3.3839$ ,  $d = 5 \mu\text{m}$

另一方面根据波导的本征方程和波导色散曲线可方便知道,对同一阶模式,波导的宽度越宽,波导的有效折射率越大,并且在宽度一定时,高阶模的有效折射率比低阶模小,因此结合图2就很容易理解为什么扩展多模波导反射区有利于提高开关的特性。在文献[7]中利用高斯光束的特性,即增大光波的腰斑大小可以有效地减小衍射角的半宽值,减小发散来解释该现象,但没有量化的参量。扩展波导提高反射率同时也易激励出多模,所以并非越宽越好,须分析它的最佳扩展波导宽度。

实际Y或X全内反射型开关的交角 $\theta$ 一般不超过 $1.5^\circ$ ,由图1可以看出,在全反射状态时波导中不同反射位置波导有效宽度是不一样的,最小波导宽度在A处为 $W/2$ ,因而在(3)式、(4)式中波导的有效折射率应取什么位置波导宽度为好?本文认为可以A处的波导宽度为基准(宽度为 $W/2$ ),因为该处宽度最小,它的大小可直接限制反射到反射端波

导的模式,若把传播常量看作一矢量,则它的方向在A处附近才发生变化。另外由波导中基模的能量分布可知入射光波在中心能量最集中。因此(3)式、(4)式中的有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 在本文中被认为是宽度为 $W/2$ 波导所对应的的有效折射率。

### 3 近似计算和模拟

设想多模波导区传输多模光束,根据以上分析,并利用RSoft公司的BeamPROP软件,采用有限差分-光束传输(FD-BPM)方法我们计算了多模光束经多模波导区反射的反射率(图3),计算模拟以GaAs/GaAlAs半导体波导开关为例,其中光开关的结构参量为: $\theta = 1.5^\circ$ ,  $n_0 = n_2 = 3.3839$ ,  $n_1 = 3.3923$ ,  $d = 5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 。图中可明显看出各次模反射率有一个较明显突变区,位置在比该次模高一次模的截止点附近,如在图3的计算条件下波导一次模的截止厚度( $W_{c1}$ )为 $2.81 \mu\text{m}$ ,而图中一次模反射率明显变化位置在 $5 \sim 6 \mu\text{m}$ 附近,即厚度约等于 $2W_{c1}$ 。

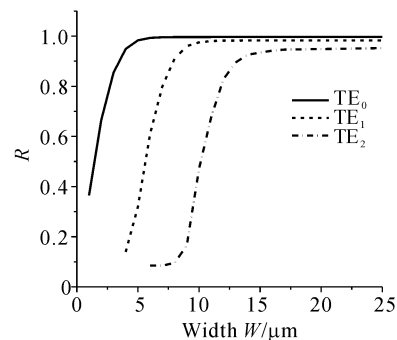


Fig. 3 Reflectivity as a function of width.  $\theta = 1.5^\circ$ ,  $n_0 = 3.3839$ ,  $n_1 = 3.3923$ ,  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 3.3839$ ,  $d = 5 \mu\text{m}$

图4和图5是图1结构的光开关的串音和损耗与波导宽度的关系(参量与图3相同),其中光开关串音及损耗的定义为

反射端的串音  $C_r$

$$C_f = \ln \frac{P_{3(\text{on})}}{P_{2(\text{on})}} = \ln \frac{T}{R} = \ln \frac{1-R}{R}. \quad (5)$$

反射端的损耗  $L_f$

$$L_f = \ln \frac{P_{1(\text{on})}}{P_{3(\text{on})}} = \ln \frac{1}{R}, \quad (6)$$

式中,  $P_{i(\text{on})}$ 、 $P_{i(\text{off})}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别表示有载流子注入和无载流子注入时各个端口的光强。

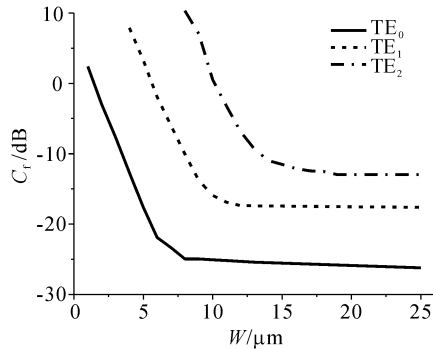


Fig. 4 Crosstalk as a function of  $W$ .  $\theta = 1.5^\circ$ ,  $n_0 = 3.3839$ ,  $n_1 = 3.3923$ ,  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 3.3839$ ,  $d = 5 \mu\text{m}$

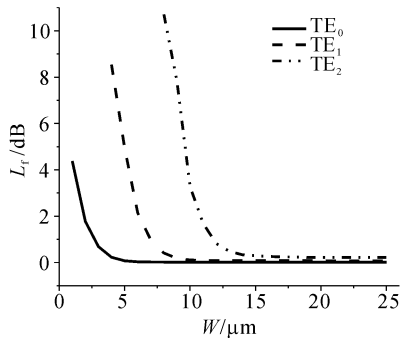


Fig. 5 Loss as a function of  $W$ .  $\theta = 1.5^\circ$ ,  $n_0 = 3.3839$ ,  $n_1 = 3.393$ ,  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 3.3839$ ,  $d = 5 \mu\text{m}$

从图中可以看出,波导的宽度越宽,开关的串音和损耗越小,并且在同等宽度下,低阶模的串音和损耗比高阶模小,同时图中可明显看出各次模有一个较明显突变区,位置也在比该次模高一次模的截止点附近。表 1 是给定一个串音数值,根据(3)式、(4)式求出波导的基模有效折射率  $n_{\text{eff}}$ ,然后通过波导本征方程求出波导的等效宽度。表中第二列为直接采用公式(3)、(4)的结果,第三列的厚度为第二列的 2 倍。同模拟结果(第四列)比较可知,修正后的结果非常接近理论模拟的结果(表中第二行厚度正好为一次模截止厚度的情况)。表 1 中的计算结果(第三列)与模拟结果存在误差,主要原因是因为在计算模拟时,认为反射到分支波导中的光不存在损耗,而实际中光在反射进入分支波导时中仍会存在一定的损耗引起的。

Table 1 Width of calculation vs Width of simulation

Crosstalk $C_f/\text{dB}$	Width of calculation	Width of calculation	Width of simulation $W/\mu\text{m}$
	without modification $W_1/\mu\text{m}$	with modification $2W_1/\mu\text{m}$	
-23.2	2.81*	5.62	6.55
-15	1.76	3.52	4.36
-20	2.22	4.44	5.35
-25	3.56	7.12	8.09

\* Cutoff width ( $W_{c1}$ ) of the 1<sup>st</sup> mode

**结论** 在优化 Y 分叉或 X 结全内反射型光开关时,可增加反射区波导宽度提高开关性能,若同时还要保证反射后波导中只有基模传输,则在结构设计时,可近似按  $W/2$  厚度为一次截止厚度来设计。在实际设计时,当然在单模波导与多模波导之间可采用平滑过渡区,用以避免在多模波导中激发高阶模<sup>[3,4]</sup>。图 6 是根据以上分析,采用“牛角”结构的过渡区优化的 Y 分叉全内反射光开关,在同等条件下 ( $\theta = 1.5^\circ$ 、 $n_0 = 3.3839$ 、 $n_1 = 3.3923$ 、 $d = 5 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ,注入区的折射率  $n_2 = 3.3839$ ),经过改进后扩展多模波导( $W = 6.55 \mu\text{m}$ )的 Y 分叉的串音比传统的 ( $W = 3 \mu\text{m}$ ,单模传播)Y 分叉降低 15.5 dB(改进前 -7.67 dB,改进后 -23.2 dB),损耗降低将近 0.65 dB(改进前 0.685 dB,改进后可达 0.026 dB)。我们将展宽波导反射区结构用于  $2 \times 2$  全内反射型有机聚合物热光开关,消光比已经达到 27 dB 的实验结果<sup>[8]</sup>。图 7 是应用 BeamPROP 软件模拟的改进前与改进后的效果比较图,图 7(a)是改进前直通效果图(关状态),图 7(b)为改进前的旁通效果图(开状态),图 7(c)是改进后直通效果图(关状态),图 7(d)为改进后的旁通效果图(开状态)。从效果图可以看出,改进后的效果有了明显的提高。

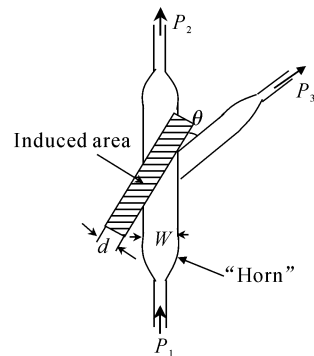


Fig. 6 The structure of improved Y branch based on TIR

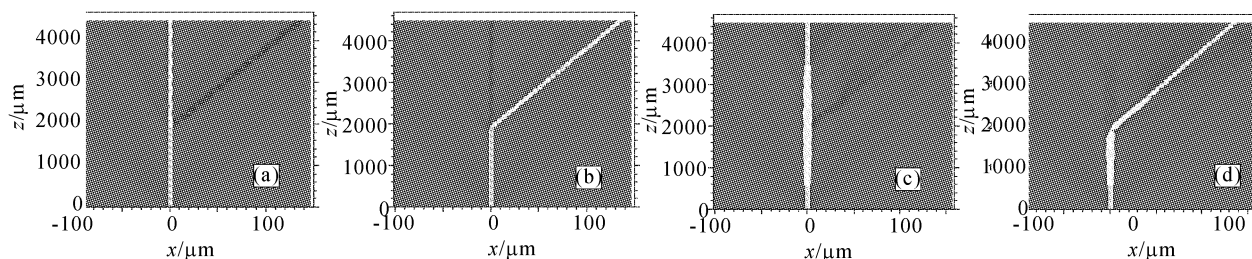


Fig. 7 Compare of effect between normal and improved Y branch

### 参 考 文 献

- 1 Jamshid Nayyer, Kaveh Niayesh. Influence of Absorption Loss and Synchronization on Reflection Quality of Optical Total-Internal-Reflection Switch/Modulators with Curved Electrodes. *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 1999, Proceeding, 49th, 1135~1139
- 2 Jiang Xiaoqing, Zhan Hengzheng, Wang Minghua. Analysis of the switch characteristic with improved asymmetry Y furcation. *Acta Photonica Sinica (光子学报)*, 2002, **31**(2):183~186 (in Chinese)
- 3 Yang M S, Noh Y O, Won Y H *et al.*. Very low crosstalk  $1 \times 2$  digital optical switch integrated with variable optical attenuators. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(9):587~588
- 4 Noh Y O, Yang M S, Won Y H *et al.*. PLC-type variable optical attenuator operated at low electrical power. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(24):2032~2033
- 5 Jia Yubing, Kang Shouwan, Zhuang Wanru. Theoretical analysis for TIR optical waveguide switch. *Acta Photonica Sinica (光子学报)*, 1995, **25**(6):541~545 (in Chinese)
- 6 Zhao Cezhou, Li Guozheng, Liu Yuliang *et al.*. Modeling study of SOI optical waveguide switch based on total internal reflection. *Acta Optical Sinica (光学学报)*, 1995, **15**(12):1702~1706
- 7 Sheem S. Total internal reflection integrated-optics switch; a theoretical evaluation. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(22):3679~3687
- 8 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*.  $2 \times 2$  total-internal-reflection optical switches using thermo-optic effect of polymer. *Chin. J. Lasers (中国激光)*, 2003, **30**(2):137~140 (in Chinese)

## Analysis of Y Branch Switch Based on Total Internal Reflection of Multimodes Waveguide

Zhan Hengzheng Jiang Xiaoqing Chen Kejian Wang Minghua  
(Department of Information Science and Electronic Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 30 May 2002; revised 25 October 2002)

**Abstract:** The reason that multimode waveguide of total internal reflection (TIR) based Y-branch switch has less cross-talk and less loss are analyzed by utilizing waveguide theory. A physical model of TIR is given and an approximate calculation method of improved TIR Y-branch switch is obtained. Simulation shows that the cross-talk and loss of the multimode waveguide of TIR Y-branch switch decrease by 15.5 dB and 0.65 dB respectively.

**Key words:** integrated optics; optical switch; total internal reflection; multimode waveguide