

大截面单模半导体脊形交叉波导传输特性

刘育梁 刘恩科 刘志敏* 罗晋生

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

摘 要 运用光束传播法和有效折射率法分析了大截面单模半导体脊形交叉波导结构的传输特性,对Y形,X形和加宽X形结构进行了比较.结果表明,在小交叉角时,三种结构具有相似的传输特性;在大交叉角时,它们表现出较大的差异.而在Y型结构中,不存在模式干涉.

关键词 半导体波导,交叉,传输,光束传播法

1 引 言

人们做了大量工作来研究半导体电光开关及其阵列,但至今所研制的此类开关的性能并不理想,插入损耗高、串音大以及功耗过高使其无法得到实际应用^[1].其主要原因之一是有关半导体交叉波导结构的传输特性并不十分清楚.尽管已经发表了不少关于交叉波导结构的文章^[2,3],报道交叉波导以及相应开关的工作机理,但至今尚无不同结构的传输特性的比较,而这一点对于研制实际开关起着重要的指导作用.作者认为,对于复杂的半导体交叉波导结构,光束传播法(BPM)是一种有效的分析方法.它起始于1976年,最近已由Clauberg^[4]和Huang^[5]将其由标量形式发展到了矢量形式.因此,它能够处理具有突变折射率界面的脊形半导体波导.一般说来,半导体波导器件总涉及强导特征,需用三维矢量光束传播法分析.但在许多实际应用中(比如本文所要讨论的脊形交叉波导),为了保证单模特性、低的耦合损耗和研制中的易于控制,往往采用大截面单模波导.在这种情况下,脊形波导具有很小的腐蚀深度,表现出弱导特征,因此可用标量光束传播法分析.而且单模波导的大截面意味着脊外区域也可承载基模,因此,有效折射率法(EIM)也是有效的.

本文采用二维标量光束传播法结合有效折射率法来分析单模大截面半导体脊形波导构成的交叉结构,并着重于三种不同的结构,即Y形,X形和加宽X形结构(如图1所示)的传输特性的比较.考虑到有关硅光波导器件的研究日益增多,本文的分析针对硅交叉波导.

2 基本方法

光束传播法分析复杂的波导结构需消耗大量CPU时间.为了克服这一缺陷,首先利用有效折射率法将实际的三维器件等效于二维器件,然后再采用光束传播法求解二维标量亥姆霍兹(Helmholtz)方程.

一般来说,脊形波导(如图1(b))的模式可分为 EH_y 模和 HE_y 模.许多文献表明,如果波导

收稿日期:1992年11月18日;收到修改稿日期:1993年3月22日。

*西安交通大学人工智能与机器人研究所。

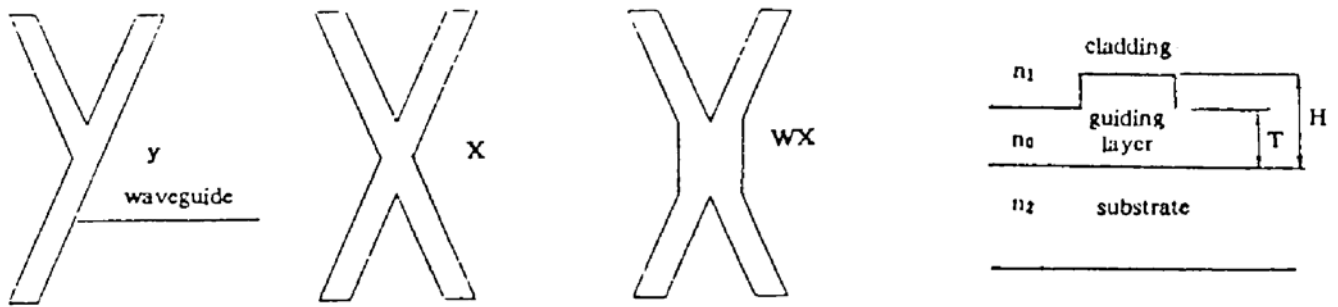


Fig. 1 (a) A schematic diagram of *y*- junction, X- structure and widened X- structure Fig. 1 (b) A crosssection of branching waveguide of one device shown in (a)

中能量集中的区域其 *x* 方向的折射率变化很小的话, EH_y 模和 HE_y 模可近似为 *q*-TM 模和 *q*-TE 模. 而对弱波导, *q*-TE 模和 *q*-TM 模之间没有明显的模式转换, 因此, 可分别根据 *q*-TE 模或 *q*-TM 模运用有效折射率法, 所得到的等效折射率分布对应于二维弱导器件. 为此, 求解缓变振幅近似下的标量波方程

$$-2ik_0n_e(\partial\psi/\partial z) = (\nabla^2\psi/\partial x^2) + k_0^2[n^2(x,z) - n_e^2]\psi \tag{1}$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空波矢, $n(x,z)$ 为等效折射率分布, n_e 为参考折射率. (1) 式中 *z* 为光束传播法的求解方向. 选用基于 Crank-Nicolson 格式的有限差分技术求解(1)式, 得到

$$\psi_{j\pm 1}^{s+1} + \alpha_j^{\pm} \psi_j^{s+1} + \psi_j^{s\pm 1} = -\psi_{j\pm 1}^s + \alpha_j^{\mp} \psi_j^s - \psi_{j\mp 1}^s \tag{2}$$

$$\alpha_j^{\pm} = \mp 2 \pm k_0^2(n^2 - n_e^2)(\Delta x)^2 + 4ik_0n_e(\Delta x)^2/\Delta z, \quad \psi_j^s = \psi(j\Delta z, s\Delta z) \tag{3}$$

(2)式对应于三对角线性方程组, 可简单而稳定地快速求解. 为了获得与实际问题相一致的物理解, 需给定适当的边界条件. 本文采用简单的吸收边界, 即给求解窗口的传播振幅乘以一个吸收函数. 如果求解窗口足够大, 引入的数值微扰也相当小.*

为了检验方法的准确性, 首先计算直波导中基模的传输损耗. 如果方法是准确的, 那么将观察不到本征模的损耗. 但由于数值法本身的近似性, 总存在一定的数值损耗. 结果表明, 本文的方法其损耗小于 10^{-14} dB/cm. 对于分析交叉波导结构, 这样小的误差可忽略不计.

分析初始光束

$$\psi = \psi_0 \exp [i\beta x \sin \theta] \tag{4}$$

入射到器件的某一支中, 参考折射率选为

$$n_e = \beta \cos \theta / k_0 \tag{5}$$

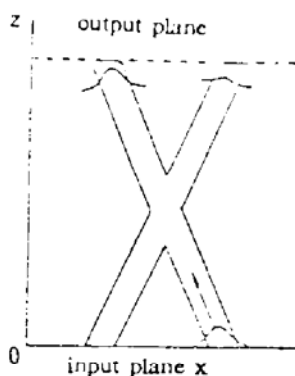


Fig. 2 Beam propagation in X-structure

式中 ψ_0 为由折射率分布 $n(x,0)$ 所表示的平板波导的本征模, β 为该模的传播常数, θ 为分支波导与求解方向的夹角, (4) 式中的指数是不同位置的光场的位相较正. 在输出端, 本文没有通过计算传播光束与本征场的重叠积分来确定本征模成分, 而是简单地对与各分支相关的能量进行积分以求取器件串音和交叉引起的辐射损耗. 其原因是, 在实际应用中, 该器件输出的辐射成分也同时耦合入下一器件, 甚至耦合为导模. 图 2 以 X 形结构为例表示了光束的输入输出以及求解方向.

* (1)式基于傍轴近似, 但若选定合适的参考折射率 n_e , 它也能用来分析广角光传输^[6]. 因此本文未采用广角波方程.

3 结果分析

图 1 是这些结构的图示. 与 X 结构相比, 加宽 X 结构仅在交叉区域有所不同. 该种结构的交叉区宽度为固定值, 即总是分支波导宽度的两倍. 波导芯的厚度, 脊外平板芯层厚度, 导层和包层折射率对不同器件都是相同的. 表 1 给出了这些参数, 它们经过仔细挑选以确保波导的单模特性, 并且是实验中常采用的实际参数. 其中包层和衬底的折射率分别对于 SiO_2 和 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ n}^+$ 重掺硅. 图 3(a) 是 Y 形交叉波导的串音随交角的变化. 该种结构具有简单的变化规律. 当分支波导宽度恒定时, 串音随交角增加而减小, 最终趋于饱和, 当交角一定时, 串音随波导宽度增加而减小, 但交角很小时 ($< 1.2^\circ$), 对不同的波导宽度, 串音趋于相同值. 而 X 结构和加宽 X 结构的变化规律则较为复杂, 如图 3(b) 和图 3(c) 所示. 对于大交角 ($> 5^\circ$), 串音特性与上述相似. 但对于较小的交角, 随着角度增加, 串音达到一极小值然后又上升到一极大值.

Table 1 Some parameters used for calculation (q-TE mode)

n_0	n_1	n_2	T	H	λ
3.480	1.50	3.476	2.5 μm	4.0 μm	1.5 μm

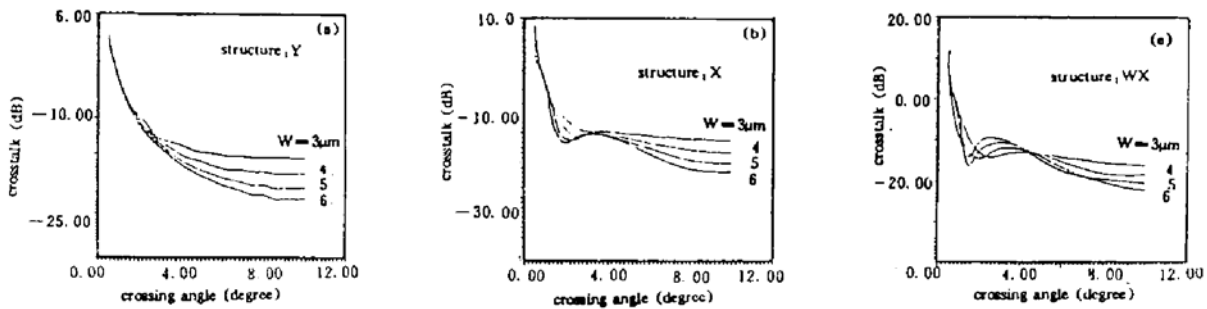


Fig. 3 Crosstalk versus crossing angle of three structure for different waveguide width

图 4 为对一定波导宽度 ($w = 5 \mu\text{m}$) 时, 三种不同结构的特性比较, 可以看到 X 和加宽 X 的串音曲线围绕着 Y 结构的串音曲线振荡并随交角增加而趋于相同.

不同结构的辐射特性示于图 5, 三种结构具有类似的变化规律. 当波导宽度一定时, 辐射损耗随着交角的增加呈衰减振荡, 而当交角一定时, 辐射损耗随着波导宽度增加而减小. 从图 6 可以看出, 在一定波导宽度 ($w = 5 \mu\text{m}$) 时, 当交角大于 5° 时, 三种结构具有一致的变化规律和相同的辐射损耗, 但交角较小时, 差异较大.

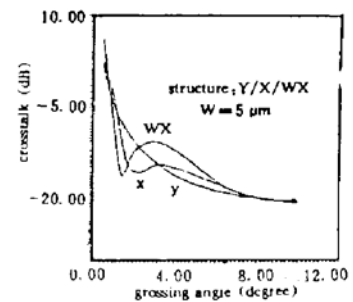


Fig. 4 Crosstalk versus crossing angle of different structure for waveguide width 5 micrometers

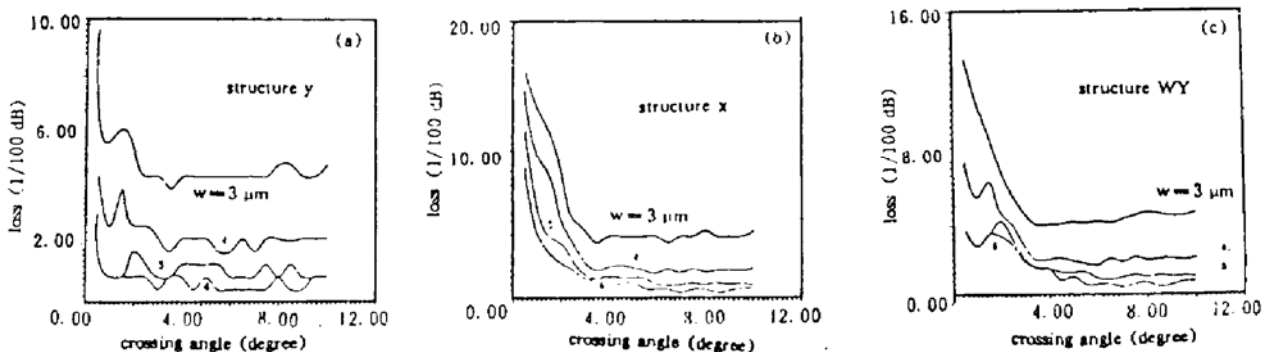


Fig. 5 Loss versus crossing angle of three structure for different waveguide width

鉴于目前尚无有关不同交叉结构的传输特性的系统的实验数据. 要给出本文结果与实验结果的详细对比是困难的, 但本文的结果与 McCaughan^[3] 采用多重散射对 X 形交叉结构分析所得结果在变化规律上基本相同. McCaughan 的分析考虑了广角传播、模式耦合与转换, 在已有的一些分析中较为严格, 并得到了有限的实验验证, 因此, 在某种程度上佐证了本文的结果. 限于篇幅, 不再对其中的差异作进一步的剖析, 但应当指出 McCaughan 的方法未能计入辐射模耦合为导模的过程. 而光束传播法对模式之间的各种转换作了统一处理. 另外, 和加宽 X 结构的串音曲线在小交角时, 存在着振荡, 这与模式干涉理论是一致的, 基于这一点, 可以说, Y 形结构中并不存在模式干涉, 因为其串音不存在振荡特性.

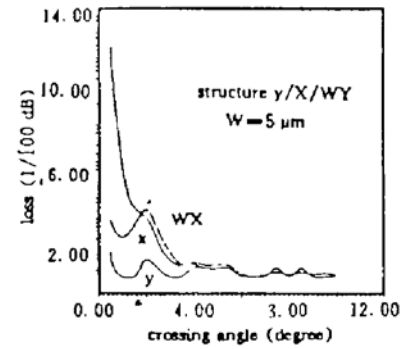


Fig. 6 Loss versus crossing angle of different structure for waveguide width $w = 5 \mu\text{m}$

参 考 文 献

- [1] J. P. Lorenzo, R. A. Soref, 1.3 μm electro-optic silicon switch, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(1) : 6~8
- [2] G. E. Betts, W. S. C. Chang, Crossing-channel waveguide electro-optic modulators, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(7) : 1027~1038
- [3] L. McCaughan, N. Agrawal, Novel physical effects in intersecting waveguide, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(18) : 1389~1391
- [4] R. Clauberg, P. V. Allmen, Vectorial beam-propagation method for integrated optics, *Electron. Lett.*, 1991, 27(8) : 654~655
- [5] W. P. Huang, C. L. Xu, S. T. Chu *et al.*, A vectorial beam propagation method for guided-wave optics, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(10) : 910~913
- [6] D. Yerick, M. Glasner, An analysis of forward wide-angle light propagation in semiconductor rib waveguides and integrated optic structures, *Electron. Lett.*, 1989, 25(20) : 1611~1613

Transmission Characteristic of Crossing Waveguide Structure Constructed by Large Single-Mode Rib Semiconductor Waveguide

Liu Yuliang, Liu Enke, Liu Zhiming*, Luo Jinsheng

(Electronic Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(* AI & R Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 18 November 1992; revised 22 March 1993)

Abstract This paper presents a general theoretical investigation of the crossing waveguide structures constructed by large-size single-mode rib semiconductor waveguides. The theoretical model is based on beam propagation method and effective index method. Three kinds of structure are analysed and compared. The numerical results show that these structures exhibit similar characteristics at large crossing angles but divergences exist at small crossing angles. It is found that mode-interference does not exist in Y-junction.

Key words semiconductor waveguides, intersection, transmission, beam propagation method