

多功能 2 @2 GaAs/ GaAlAs 多模干涉型光开关分析

肖金标, 孙小菡, 蔡 纯, 张夕飞, 朱建彬, 张明德

(东南大学电子工程系, 江苏南京 210096)

摘 要: 提出了一种基于深刻蚀脊形光波导带模斑转换器的多功能 2@2 GaAs/ GaAlAs 多模干涉型光开关, 并用变量变换级数展开法及三维有限差分束传播法对其进行了模拟分析与优化设计. 结果表明, 通过控制多模波导中央的两段 Schottky 电极, 器件可实现交叉态、直通态及 3dB 耦合器功能, 并有较大的制作容差、较宽的工作带宽, 只须一个多模波导, 器件结构紧凑. 采用深刻蚀脊形光波导能够满足多模干涉型器件的精确自镜像要求, 并使输入/ 输出光波导在单模工作下有较大的横截面, 较低的弯曲损耗及较小的耦合串扰. 通道末端引入的模斑转换器可方便地与单模光纤连接耦合.

关键词: 光开关; 多模干涉; GaAs/ GaAlAs; 变量变换级数展开法; 三维有限差分束传播法

中图分类号: TN291.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 08-1201-04

Analysis of Multifunctional 2 @2 GaAs/ GaAlAs Optical Switch Based on the Multimode Interference

XIAO Jinbiao, SUN Xiaohan, CAI Chun, ZHANG Xifei, ZHU Jianbin, ZHANG Mingde

(Dept. of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: A multifunctional 2@2 multimode interference optical switch based on the deepetched GaAs/ GaAlAs optical rib waveguide with spotsize converter is proposed and analyzed by using the variable transformed series expansion method and three-dimensional finite difference beam propagation method. As a result, the present device can operate in various kinds of output schemes including cross and bar state as well as 3dB coupler by controlling the Schottky electrode located in the center of the only multimode waveguide with the advantages of compactness, high design tolerance, and large optical bandwidth. Moreover, the deepetched optical rib waveguide satisfies the requirement of the accurate selfimaging, greatly reduces the bent loss, and has large cross section under the single mode condition. In addition, the spotsize converter introduced in the ends of the input/ output channels can be conveniently coupled with the singlemode fiber.

Key words: optical switch; multimode interference; GaAs/ GaAlAs; variable transformed series expansion method; three-dimensional finite difference beam propagation method

1 引言

光开关是 DWDM 光网络中实现光交叉连接(OXC)、光分插复用(OADM)和自愈保护等功能的关键器件. 传统的波导型光开关^[1]主要有定向耦合器型光开关、X/ Y 分支数字光开关及使用定向耦合器或 X/ Y 分支作为 3dB 分束器的马赫-曾德尔型光开关等. 其中, 定向耦合器型光开关对耦合波导的间距要求有很高的加工精度. 由于一般采用浅刻蚀波导结构, 单模工作时其波导截面与光纤截面在竖直方向上严重失配, 插入损耗大, 同时水平方向对光场的限制很弱, 弯曲损耗大; X/ Y 分支光开关要求分支角很小, 光刻难度大, 并且器件有较大的尺寸. 基于自镜像效应(SIE)的多模干涉(MMI)型器件^[2]具有结构紧凑、带宽大、制作容差性好等优点, 已广泛应用于

各种光子器件^[2], 如光功分器、模式分离器、光分波/ 合波器、环形激光器及马赫-曾德尔光开关等. 然而, 多模干涉型马赫-曾德尔光开关需要两个多模波导, 虽然通过控制两多模波导之间的相移器可实现光场从任一输入端到任一输出端的交换, 但器件结构复杂, 不易操作.

为此, 本文提出一种只须一个多模波导的多功能 2@2 GaAs/ GaAlAs 多模干涉型光开关(MMIOS). 在多模波导中央引入两段 Schottky 电极并控制这两段电极, 器件可实现交叉态、直通态及 3dB 耦合器的功能. 采用深刻蚀 GaAs/ GaAlAs 脊形光波导^[3], 可满足多模干涉器件的精确自镜像要求, 并使输入/ 输出单模光波导有较大的横截面、较低的弯曲损耗及较小的耦合串扰, 从而提高器件性能. 同时 GaAs/ GaAlAs 具有良好的电光特性, 且不易受 DC 漂移及光损伤的影响, 较 LiNbO₃

材料更容易实现各种光子器件的单片集成,是制作集成化光子器件的理想材料之一^[4]. 本文采用变量变换级数展开法^[5](VTSEM)及三维有限差分束传播法^[6](3D FDBPM)进行模拟分析与优化设计.

2 原理与结构

自镜像效应是 MMI 型器件的基本工作原理. 其本质是输入场在多模波导中将激励起多个模式,各模式间相互干涉,结果沿波的传播方向周期性地产生输入场的一个或多个像. 由导模展开法^[2],输入场 $W(x, y, 0)$ 传播 L 距离后变为

$$W(x, y, L) = \sum_{m=0}^{N-1} c_m U_m(x, y) e^{j \frac{m(m+2)L}{3L_P}} \quad (1)$$

其中

$$c_m = \frac{\int_{-1}^{+1} W(x, y, 0) U_m(x, y) dx dy}{\int_{-1}^{+1} U_m(x, y) U_m^*(x, y) dx dy} \quad (2)$$

式中 $U_m(x, y)$ 为多模波导承载的第 m 阶导模, N 为导模总数, c_m 为展开系数, L_P 为拍长, 定义为

$$L_P = \frac{P}{B_0 - B_1} \quad (3)$$

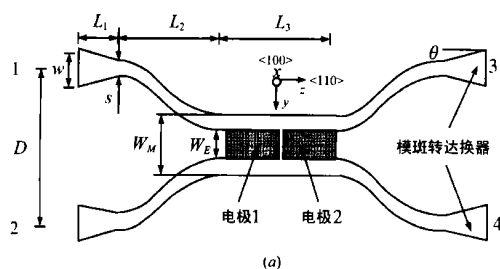
其中 B_0 和 B_1 分别为基模与次高阶模的传播常数. 式(1)略去了作为公因子的基模相位项.

因此,当 $L = 3L_P$ 时,偶阶模与奇阶模的相位改变量分别为 P 的偶数倍与奇数倍,输出场为输入场关于 $y = 0$ 的镜像,可实现交叉态;当 $L = 3L_P/2$ 时,式(1)变为

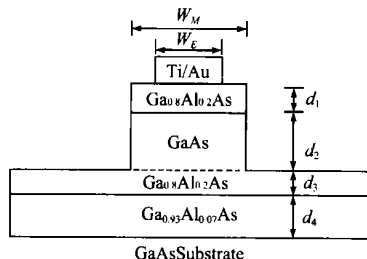
$$W\left(x, y, \frac{3L_P}{2}\right) = \frac{1-i}{2} W(x, y, 0) + \frac{1+i}{2} W(x, -y, 0) \quad (4)$$

右边二项分别代表输入场的原像与镜像,幅度均为输入场的 $1/\sqrt{2}$ 倍,可实现 3dB 耦合器的功能.

图 1(a) 为本文设计的 2@2 MMIOS 结构, 由一个长宽分



(a)



(b)

图 1 (a) 多功能 MMIOS 结构示意图;

(b) 深刻蚀 GaAs/GaAlAs 脊形光波导结构

别为 L_3 及 W_M 多模光波导和四条输入/输出通道构成,它们均采用如图 1(b) 所示的深刻蚀 GaAs/GaAlAs 脊形光波导,其中上包层为 $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ 、芯层为 $GaAs$ 、第一下包层为 $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ 、第二下包层为 $Ga_{0.93}Al_{0.07}As$. 由于上包层及芯层被完全刻蚀掉,光场在水平方向有较强的限制,能够满足多模干涉器件的精确自镜像要求,输入/输出单模光波导有较低的弯曲损耗及较小的耦合串扰,并且单模工作时第二下包层的折射率小于基模的有效折射率而大于其它各高阶模的有效折射率,高阶模则成为泄漏模,可获得低损耗的单模工作状态. 输入/输出通道为圆弧 S 形弯曲光波导,由两段曲率半径相同的圆弧光波导相切构成. 为使输入/输出通道与光纤连接耦合时有较小的插入损耗,在通道末端引入了线性模斑转换器(SSC).

多模波导中央的阴影部分为两段长宽分别为 $L_3/2$ 及 W_E 的 Ti/Au Schottky 电极,背面为欧姆电极. 器件的外延层生长方向为 $3100A$ 、光波传播方向为 $3\bar{1}10A$,仅考虑 Pockels 效应,加上偏压后 TE 波的折射率改变量 Δn 近似为^[7]

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_r^3 C_{41} E \quad (5)$$

式中 n_r 为波导层的折射率, C_{41} 为电光系数, E 为加偏压后引起的场强. 当电极加负偏压时,场强沿 $+x$ 方向,波导层的折射将减小. 选择多模波导的长度 $L_3 = 3L_P$,电极未加偏压时犹如传统的多模干涉耦合器,从 $1/2$ 通道输入的光场可交换至 $4/3$ 通道输出而获得交叉态;当两段电极均加负偏压时,多模波导中央的折射率将小于波导两侧的折射率,多模波导则变为两并列波导,由于采用了深刻蚀脊形光波导,两并列光波导耦合串扰很弱,从 $1/2$ 输入的光场传播至 $3/4$ 通道输出而获得直通态;当第一段电极加负偏压而第二段电极不加偏压时,多模波导的前端为两并列波导,后端为长度等于 $3L_P/2$ 的多模波导,如前所述,该器件将成为 3dB 耦合器. 综上所述,适当地控制多模波导中央的两段 Schottky 电极,该 MMIOS 可实现交叉态、直通态及 3dB 耦合器的功能.

3 器件分析与优化设计

本文运用 3D FDBPM 来模拟分析该 MMIOS 的光波传输特性,并用 VTSEM 来分析如图 1(b) 所示的光波导结构. 为了节省计算时间,开始分析时不考虑图 1(a) 所示的弯曲光波导及 SSC,而用长为 $100L_m$ 的直单模脊形光波导作为输入/输出通道,传播步长及横截面剖分的点阵间距均为 $0.05L_m$,初始激励为单模脊形光波导的基模并从通道 2 输入,参考折射率为该基模的有效折射率. 分析模拟结果后,选择多模波导及电极的优化参数,最后考虑弯曲光波导及 SSC,给出该 MMIOS 的交叉态、直通态及 3dB 耦合器的光场分布.

3.1 波导参数

选择 $d_1 = d_3 = 0.4L_m$ 、 $d_2 = 2.4L_m$ 和 $d_4 = 2.8L_m$,工作波长 $\lambda = 1.55L_m$. 由 VTSEM 分析可知,当脊宽 $s = 3.0L_m$ 时为单模波导,因此选择输入/输出通道的径向脊宽为 $3L_m$. 输入/输出端的中心间距 $D = 125L_m$. 图 2 为 S 形弯曲光波导的归一化输出功率与长度 L_2 的关系,兼顾器件尺寸及弯曲损耗,选择

$L_2 = 500 \mu\text{m}$. SSC 的初始脊宽 $w = 8 \mu\text{m}$ 与单模光纤的芯径相当, 末尾脊宽 $s = 3 \mu\text{m}$, 选择其长度 $L_1 = 300 \mu\text{m}$ 即 SSC 的张角 $2H$ 等于 1° 以确保有较高的转换效率.

3.1.2 交叉态分析

图 3(a) 为通道 3 的归一化输出功率与多模波导长度 L_3 的关系曲线, 其中多模波导脊宽 $W_M = 10 \mu\text{m}$, 可承载四个导模, 满足多模波导的自镜像要求. 从图

中可看出, 当 $L_3 = 886 \mu\text{m}$ 时有最大输出功率, 并且器件对多模波导的长度有比较大的制作容差, 偏离中心长度 $\pm 16 \mu\text{m}$ 后仍有 89% 功率输出. 选择 $L_3 = 886 \mu\text{m}$ 后, 图 3(b) 给出通道 3 的归一化输出功率与多模波导脊宽 W_M 的关系, 在 $W_M = 10 \mu\text{m}$ 有最大输出功率, 并且输出功率对脊宽敏感, 偏离中心宽度 $\pm 1 \mu\text{m}$ 后仅剩下 7% 的输出, 所以制作时对多模波导的脊宽必须精确控制. 在以下分析中, 选择 $L_3 = 886 \mu\text{m}$ 、 $W_M = 10 \mu\text{m}$.

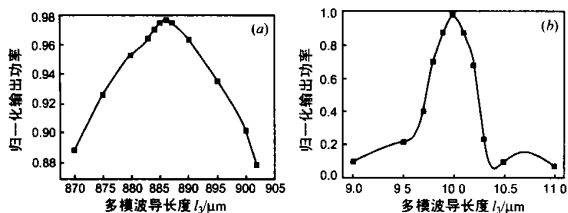


图 3 (a) 归一化输出功率与多模波导长度 L_3 的关系;
(b) 归一化输出功率与脊宽 W_M 的关系

3.1.3 直通态及 3dB 耦合器分析

图 4(a) 为直通态时通道 4 的归一化输出功率与折射率减少量 Δn 的关系, 其中 Δn 从 0.005 至 0.05 变化, 电极宽度 $W_E = 4 \mu\text{m}$. 开始时通道 4 的输出功率随 Δn 的增加急剧上升, 至 0.025 后平缓增加, 为使直通态时有较小的串音, Δn 应大于 0.025. 图 4(b) 为 3dB 耦合器的功分比与折射率减少量 Δn 的关系, 当 Δn 大于 0.02 后, 功分比接近 1:1.

接下来分析电极宽度对直通态及 3dB 耦合器的影响, 从图 5(a) 可以看出, 直通态对电极宽度较为敏感, 并且通道 4

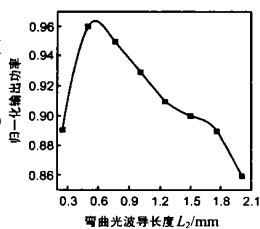


图 2 归一化输出功率与 S 形弯曲光波导长度 L_2 的关系

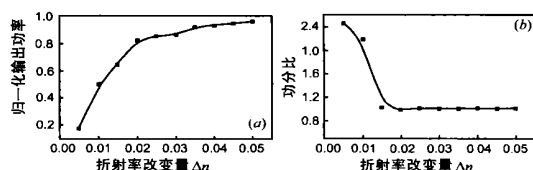


图 4 (a) 直通态的输出功率与折射率减少量 Δn 的关系;

(b) 3dB 耦合器的功分比与折射率减少量 Δn 的关系

的输出不随 W_E 的增加而单调增加, 当 $\Delta n = 0.03$ 及 0.05 时, 在 $W_E = 5 \mu\text{m}$ 处有最大输出, 分别为 98% 及 99%. 图 5(b) 为 3dB 耦合器功分比与电极宽度 W_E 的关系, 可见当 $\Delta n = 0.03$ 及 0.05 时, W_E 大于 $4.5 \mu\text{m}$ 后功分比接近于 1:1.

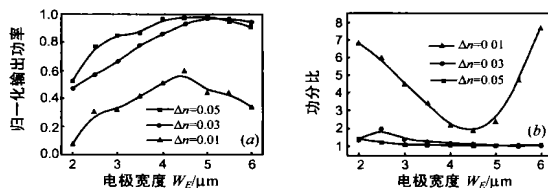


图 5 (a) 直通态的输出功率与电极宽度 W_E 的关系;

(b) 3dB 耦合器的功分比与电极宽度 W_E 的关系

3.1.4 工作波长与器件性能的关系

对于直通态及 3dB 耦合器, W_E 及 Δn 分别为 $5 \mu\text{m}$ 、0.03. 由图 6(a) 可知, 交叉态时偏离中心波长 ($1.55 \mu\text{m}$) $\pm 40 \text{nm}$ 后仍有 85% 的输出, 有较宽的工作带宽; 而直通态对波长几乎不敏感, 且短波长相对长波长有较大的输出. 图 6(b) 为 3dB 耦合器的功分比随波长的变化关系, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 处输出最均匀, 偏离中心波长后起伏变化, 但仍接近 1:1, 因此对波长的依赖性很小.

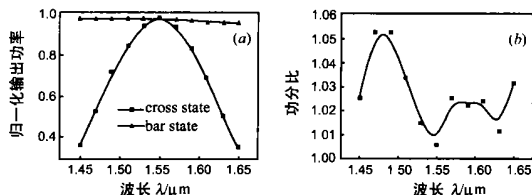


图 6 (a) 交叉态与直通的输出功率及波长 λ 的关系;

(b) 3dB 耦合器的功分比与波长 λ 的关系

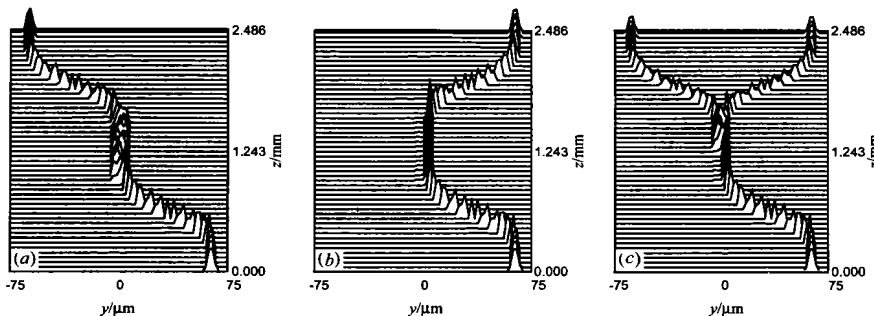


图 7 MMZOS 光场分布 (a) 交叉态; (b) 直通态; (c) 3dB 耦合器

3.1.5 器件整体分析

根据上述分析结果, 我们优化选择出该 MMZOS 的相关参数, 分别为: 多模波导长度 $L_3 = 886 \mu\text{m}$, 脊宽 $W_M = 10 \mu\text{m}$, 电极宽度 $W_E = 5 \mu\text{m}$, 兼顾器件的工作电压及直通态与 3dB 耦合器的性能, Δn 选则为 0.03, 工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. 考虑了弯曲波导及 SSC 后, 分析获得交叉态与直通态的串音分别为 -221 dB 及 -231.5 dB , 3dB 耦合器的输出均匀度达 0.02 dB , 其中初始激励为

束腰半径等于 3λ 的高斯光束. 图 7 为交叉态、直通态及 3dB 耦合器在 MMZOS 中央的光场分布, 可见器件成功地实现了交叉态、直通态及 3dB 耦合器的功能.

4 结论

基于自镜像效应, 本文提出一种只须一个多模波导即可实现交叉态、直通态及 3dB 耦合器功能的光开关模型. 采用变量变换级数展开法及三维有限差分束传播法对其进行了模拟分析与优化设计. 结果表明, 交叉态与直通态的串音分别达 -22.1 dB 及 -23.5 dB, 3dB 耦合器的输出均匀度达 0.02 dB, 并且具有制作容差性好、工作带宽大等优点, 其中直通态及 3dB 耦合器有几乎可以忽略的波长依赖性, 但至少需要 0.025 的折射率减少量, 驱动电压较高. 引入了圆弧弯曲波导及线性模斑转换器, 可方便地与光纤对接耦合. 深刻蚀脊形光波导的使用可满足多模干涉器件的精确自镜像要求, 并使输入/输出光波导在单模工作下有较大的横截面, 较低的弯曲损耗及较小的耦合串扰.

参考文献:

- [1] Renaud M, Bachmann M, Emar M. Semiconductor optical space switches[J]. IEEE J Select Topics in Quantum Electron, 1996, 2(2): 277-288.
- [2] Soldano L B, Pennings C M. Optical multimode interference devices based on self imaging: principles and applications[J]. J Lightwave Technol, 1995, 13(4): 615-627.
- [3] Heaton J M, Bourke M M, Jones S B, et al. Optimization of deep etched, singlemode GaAs/AlGaAs optical waveguides using controlled leakage into the substrate[J]. J Lightwave Technol, 1999, 17(2): 267-280.
- [4] Walker R. High speed 0.2V semiconductor intensity modulators[J]. IEEE J Quantum Electron, 1991, QE27(3): 654-667.
- [5] 肖金标, 孙小茜, 张明德, 等. 基于变量变换级数展开法的光波导矢量本征模分析[J]. 中国工程科学, 2001, 3(11): 49-53.
- [6] Lee P C, Schulz D, Voges E. Three-dimensional finite difference beam propagation algorithms for photonic devices[J]. J Lightwave Technol, 1992, 10(12): 1832-1838.
- [7] Namba S. Electro-optical effect of zincblende[J]. J Opt Soc Am, 1961, 51(1): 76-79.

作者简介:

肖金标 男, 1969 年 11 月生于江西于都, 东南大学电子工程系讲师, 2003 年在东南大学获电子科学与技术专业工学博士学位, 现主要从事光子学与器件等方面的研究.

孙小茜 女, 1955 年 6 月生于安徽黄山, 东南大学电子工程系教授, 博士生导师, 主要研究领域为光子学、光通信系统及网络技术.