

# GaAs $1 \times 4$ Mach-Zehnder 型光开关列阵研究\*

杨建义 冯浩 周强 江晓清 周伟勤 孙一翎 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘 要** 采用非对称 X 结耦合器设计并研制了 GaAs  $1 \times 4$  Mach-Zehnder 型光开关列阵。简述了非对称 X 结和相应的光开关列阵的工作原理及器件的设计和制作过程。在波长为  $1.15 \mu\text{m}$  的光波下测量单元器件, 得到了小于  $-20 \text{ dB}$  的串音和小于  $12 \text{ V}$  的开关电压, 器件的光波导传输损耗约为  $7 \text{ dB/cm}$ 。文中最后分析了导致器件中串音和损耗的各因素, 并提出了可能的改进方法。

**关键词** 非对称 X 结, GaAs, 光开关列阵

## 1 引 言

在光学信息处理和光学信息传送中, 光开关列阵是关键器件。在利用电光效应的光开关列阵中, 光开关单元所采用的器件结构主要有以下几种: 定向耦合器型<sup>[1]</sup>、全内反射型 (TIR)<sup>[2]</sup>、BOA 型<sup>[3]</sup> 和非对称 Mach-Zehnder 干涉型<sup>[4]</sup>。

非对称 Mach-Zehnder 干涉型器件是在八十年代中期由 Izutsu 等人提出<sup>[4]</sup>, 并在  $\text{LiNbO}_3$  材料上研制成功的。它先用两个非对称 X 结耦合器代替传统的 Y 分支耦合器, 使之能够进行推挽操作, 有效地降低器件的开关电压, 同时 M-Z 高速调制器的所有研究成果都可以直接用于这种开关, 得到高速  $2 \times 2$  开关及相应的高速开关列阵。作者利用 GaAs 材料温度系数小、器件尺寸小、可集成性好等优点<sup>[5, 6]</sup>, 在 GaAs 外延材料上设计并制作了  $1 \times 4$  非对称 M-Z 干涉型光波导开关列阵。

## 2 器件的工作原理

一般的 M-Z 型光调制器均由 Y 分支器完成  $3 \text{ dB}$  耦合与干涉。通过控制光波在两臂上的传输相位完成对光的强度调制。这种两臂的光波可以分开调制, 进行推挽, 从而降低器件的半波电压。这样, 在对光波进行强度调制时, 不会象定向耦合器等器件结构那样伴有光波的相位调制。但是, 这种结构的端口一进一出, 无法制成开关。

非对称 M-Z 型光波导开关单元的关键是应用了非对称 X 结耦合器以代替 Y 分支器。非对称 X 结的工作原理是利用了光波在对称渐分波导中传输时的功率均分原则和在非对称渐分波导(要求分支角  $\theta \ll \Delta\beta/\beta$ ) 中传输时的模式分离原则, 将这两者有机地结合, 从而完成  $3$

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年10月30日; 收到修改稿日期: 1996年3月26日

dB 耦合功能和干涉功能。由于它具有两个输入端和两个输出端，因此可方便地用于制成光开关。在文献[ 7, 8]中，详细说明了非对称 X 结的工作原理，并报道了在 GaAs 外延材料上制作非对称 X 结的研究工作。

非对称 M-Z 型光开关单元由两个非对称 X 结耦合器代替传统的 Y 分支器，如图1所示。当从输入端某一端口输入一束光时，激励产生基模，并在传输至 X 结分支处时变换为功率相等的基模和一次模。由于非对称端的模式分离原则，两模式分别进入两调制臂，从而完成3 dB 耦合功能。通过调制区后，两调制臂的光分别变换为功率依然相等的基模和一次模，在 X 结分支处相遇，并按对称端的功率均分原则均分，随后，光波在两渐分波导中变换为不同相位的基模，相互消长，完成干涉功能。从分析中可以知道，假设器件的输入端 b 中有输入光  $P_{in}$ ，器件的输出表达式为：

$$\text{输出端 c: } P_c = \frac{P_{in}}{2} (1 - \cos\Delta\varphi) \tag{1a}$$

$$\text{输出端 d: } P_d = \frac{P_{in}}{2} [1 - \cos(\pi\Delta\varphi)] \tag{1b}$$

式中  $\Delta\varphi$ 包括固有相位差  $\Delta\varphi_0$ 和电场作用产生的调制相位差  $\Delta\varphi_m$ ，即  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi_m$ 。通常器件制作在 GaAs 外延材料的(100)面上，有：

$$\Delta\varphi_m = \frac{\pi}{\lambda} \gamma_{41} n_0^3 \frac{VL}{d} \Gamma \tag{2}$$

式中， $\lambda$ 为工作光波波长， $\gamma_{41}$ 为 GaAs 材料的电光系数， $n_0$ 为 GaAs 材料的折射率， $V$ 为驱动电压， $L$ 为调制区长度， $d$ 为外延材料波导层厚度， $\Gamma$ 为光场和电场的重叠积分。

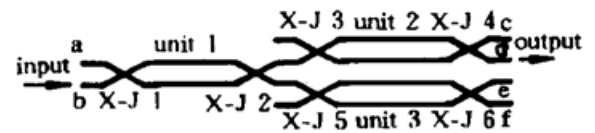
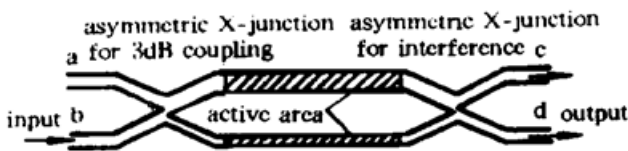


Fig. 1 The configuration of the asymmetric X-junction Mach-Zehnder optical switch

Fig. 2 The configuration of the 1× 4 M-Z optical switch array (X-J: X-junction)

1× 4光开关列阵是光交换系统所要求的基本单元中结构最简单的列阵单元，既可集成，也可分立组合，形成1× N，进而 N× N 的光开关列阵。作者选用三个2× 2光开关单元组成1× 4树状开关列阵。其结构如图2所示。图中的3个单元是如图1中所示的非对称 X 结 M-Z 型光开关单元，单元的两对输入和输出端口均为对称等宽度波导，当器件向外与光纤等耦合时，能有相同的耦合效率。由开关单元的输入输出关系表达式可推得此时光开关列阵的输入输出关系表达式：

$$\text{输出端 c: } P_c = \frac{P_{in}}{4} [1 - \cos\Delta\varphi][1 - \cos\Delta\varphi_0] \tag{3a}$$

$$\text{输出端 d: } P_d = \frac{P_{in}}{4} [1 - \cos\Delta\varphi][1 - \cos(\pi - \Delta\varphi_0)] \tag{3b}$$

$$\text{输出端 e: } P_e = \frac{P_{in}}{4} [1 - \cos(\pi - \Delta\varphi)][1 - \cos(\pi - \Delta\varphi_0)] \tag{3c}$$

$$\text{输出端 f: } P_f = \frac{P_{in}}{4} [1 - \cos(\pi - \Delta\varphi)] [1 - \cos\Delta\varphi] \quad (3d)$$

式中  $P_{in}$  为  $b$  端输入的光强,  $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\varphi$  和  $\Delta\varphi$  分别为三个单元中由于非对称 X 结在进行光束的 3 dB 耦合和干涉时引入器件单元的固有相位差和电场作用产生的调制相位差的总和。调制相位差由(2)式给出。

### 3 器件的设计和制作

单元器件的设计, 除结合了以往光波导器件实验制作与测试结果外, 还运用了有效折射率法与耦合模理论的分析结果<sup>[7, 8]</sup>。文献[9]表明, 在非对称耦合器结构中, 为了实现模的分离, 分支角  $\theta$  必须满足

$$\theta \ll \Delta\beta/\gamma \quad (4)$$

式中  $\Delta\beta$  为非对称波导的传播常数差,  $\gamma$  为两波导中心区平板波导的传播常数。若分支角取得过大, 波导传播方向上的折射率变化所引起的光波模式变换, 会使得非对称 X 结中的模式分离原则逐渐失效, 导致器件的开关消光比下降; 分支角过小则器件的制作难度较高, 同时器件也会被拉得过长。当选取对称波导宽度为  $5 \mu\text{m}$ , 非对称波导宽度分别为  $5.5 \mu\text{m}$  和  $4.5 \mu\text{m}$ , 脊高  $1.2 \mu\text{m}$ , 波导厚度  $2.3 \mu\text{m}$  时, 分支角应小于  $1^\circ$ <sup>[7, 8]</sup>。因此, 选取非对称边分支角为  $0.4^\circ$ , 对称边分支角为  $0.8^\circ$ 。有源调制区波导间距取  $14 \mu\text{m}$ , 有源调制区长度取  $5 \text{mm}$ 。该开关阵列总长度为  $2 \text{cm}$ 。

器件制作于同质结 GaAs 外延片上。(100)面衬底 ( $n^+ \geq 10^{18} \text{cm}^{-3}$  Si 掺杂), 高阻外延层 ( $n^- < 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ), 采用剥离技术制作 Al-Schottky 电极, 并用湿法腐蚀法腐蚀出脊形波导。所用腐蚀液为磷酸系列腐蚀液  $\text{H}_3\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} = 1 \cdot 1 \cdot 10$ 。器件的下电极采用 AuGeNi 合金形成欧姆接触电极。

### 4 器件的测试结果与结果讨论

对于上述结构的 GaAs 1×4 M-Z 型光开关阵列, 单元器件的性能用  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器作为光源测试, 测量获得开关电压小于  $12 \text{V}$ , 串音比小于  $-20 \text{dB}$ 。器件的调制电极采用集总型电极, 测得在零偏压下电极的电容约为  $4 \text{pF}$ , 如取匹配电阻为  $50 \Omega$  预计器件的调制带宽大于  $1.8 \text{GHz}$ 。波导的传输损耗采用了衰减系数测量法, 测得传输损耗约为  $7 \text{dB/cm}$ 。

器件单元的串音主要来源于非对称 X 结中由于模式间的耦合所引起不完全 3 dB 耦合功能和干涉功能。假设 3 dB 耦合不完全, 则在有源调制区两臂中的光功率分别为  $P_1$  和  $P_2$ , 通过调制和干涉后, 器件单元最后的串音为:

$$\frac{(P_{o1})_{\min}}{(P_{o2})_{\max}} = \left[ \frac{\sqrt{P_1} - \sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2}} \right]^2 \quad (5)$$

式中的  $P_{o1}$  和  $P_{o2}$  分别指单元的两个输出端的输出光功率,  $(P_{o1})_{\min}$  指  $P_{o1}$  在单元经调制后可能输出的最小值,  $(P_{o2})_{\max}$  则是  $P_{o2}$  可能输出的最大值。从(4)式可以看出, 3 dB 耦合时功率分配越均匀越有利于降低串音。而非对称 X 结不可避免地存在模式间耦合<sup>[10]</sup>, 3 dB 耦合时也就总会有光功率分配的微小不均。同理在干涉时, 由于非对称 X 结中的模式间耦合, 也同样要引入串音现象。

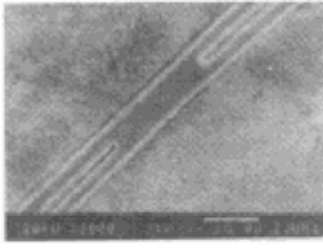


Fig. 3 The SEM photograph of the asymmetric branch

从工艺上看, 由于分支角的分支处在光刻后, 光刻胶较其它部位要薄, 再加上分支处本身两侧的脊波导区的间距很小, 使得分支处的剥离不易成功, 影响脊形波导腐蚀过程中分支角的完好形成。从理论上定性分析可以知道, 分支角的分支不完善必然会加强非对称 X 结中模式间的耦合, 加大器件中的串音现象。为了有利于剥离过程, 同时也为了能够加厚器件的电极铝膜, 在器件工艺的制作过程中首次采用了预刻蚀工艺, 在铝的热蒸发前, 将器件的脊形波导区(光刻后裸露区)预腐蚀一定深度(一般限在 $0.5 \mu\text{m}$ 以内)。这样, 使得器件制作中的剥离过程相当顺利。由于器件中的分支角相

当小, 在制版和光刻过程中作者发现分支角的分支处并非呈尖锐状, 尤其是在光刻后可以看到, 分支角分支处已呈现小圆尖状, 如图3所示。这有利于工艺中的剥离过程, 然而它同样会增加非对称 X 结中模式间的耦合, 加大器件中的串音现象。无论是采用图形发生器制版还是采用电子束制版, 都不可能获得完美分支结构, 同样在光刻中, 精度的极限情况也会限制分支结构的完美性。不过根据测试结果, 只要工艺上控制得当, 可以获得令人满意的结果。

除了非对称 X 结中模式间的耦合效应所引入的器件串音(包括理论分析给出的固有因素和工艺过程引入的附加因素)外, 还注意到, 由于在有源调制区两调制臂的光波导宽度不同会导致两臂的波导损耗不一致。使得干涉处两臂的光功率不一致, 因而引起串音现象加强。要消除这一因素引起的串音, 必须提高工艺质量, 同时降低材料本身的损耗。

器件整体的传输损耗主要是由同质结材料中衬底的载流子吸收引起的。增加器件中波导层的厚度可以减小传输损耗, 但调制电压也将相应增大。有效的解决方法是采用异质结材料, 这种结构下的波导传输损耗已达到 $0.2 \text{ dB/cm}^{[1]}$ 。同时也可以优化器件结构, 缩短器件长度, 降低开关电压。另外, 非对称 X 结、脊形波导侧臂等对光的散射也会增加光在器件传输中的损耗, 不过这些并不是主要因素, 工艺质量的提高可以降低由此带来的影响。

**总结** 本文采用非对称 X 结耦合器, 设计并制作了 GaAs  $1 \times 4 \text{ M-Z}$  型光开关列阵。单元器件测量得到了小于 $-20 \text{ dB}$ 的串音和小于 $12 \text{ V}$ 的开关电压, 器件的波导传输损耗约为 $7 \text{ dB/cm}$ 。文中定性分析了引起器件串音和损耗的因素, 并给出了可能的解决方法。

器件有待进一步提高可靠性能、增加开关速率、降低开关电压、减小插入损耗和串音, 使其能实际应用于高速光交换系统中。

### 参 考 文 献

- [1] K. Tada, Hirose. A new light modulator using perturbation of synchronism between two coupled guides. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(10) ·561~ 562
- [2] C. S. Tai, B. Kim, F. R. El-Akkari. Optical channel waveguide switch and coupler using total internal reflection. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1978, **QE-14**(7) ·513~ 517
- [3] M. Papuchon, A. Roy, D. B. Ostrowsky. Electrically active optical bifurcation: BOA. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**(4) ·266~ 267
- [4] M. Izutsu, A. Enokihara, T. Sueta. Optical-waveguide hybrid coupler. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(11) ·549 ~ 551
- [5] R. Alferness. Waveguide electrooptic modulators. *IEEE T. Microwave Theory & Technol.*, 1982, **MTT-30**(8) ·1121~ 1137

- [6] R. Walker. High-speed III-V semiconductor intensity modulators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(3) ·654~ 667
- [7] 王明华, 冯浩, 杨左娅等. GaAs 非对称波导形耦合器研究. *激光·光电子*, 1992, **3**(1) ·41~ 45
- [8] 冯浩, 王明华, 胡小文等. GaAs 非对称 X 结波导混合耦合器的研究. *光学学报*, 1994, **14**(3) ·327~ 330
- [9] W. K. Burns, A. F. Milton. An analytic solution for mode coupling in optical waveguide branches. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(4) ·446~ 454
- [10] 杨建义, 冯浩, 王明华. Y 分支器单元的有限差分光束传输法分析. *光子学报*, 1994, **23**(4) ·335~ 343
- [11] H. Inone, K. Hiruma, K. Ishida *et al.*. Low loss GaAs optical waveguides. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1985, **DE-32**(12) ·2662~ 2668

## $1 \times 4$ GaAs Mach-Zehnder Optical Waveguide Switch Array

Yang Jianyi Feng Hao Zhou Qiang Jiang Xiaoqin

Zhou Weiqing Sun Yilin Wang Minghua

(Department of Information & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 30 October 1995; revised 26 March 1996)

**Abstract** The asymmetric X junction was applied in the GaAs Mach-Zehnder optical switch instead of the traditional Y branch, and a  $1 \times 4$  switch array was designed and fabricated. The basic mechanism of the asymmetric X-junction and, then, of the switch array was briefly narrated. The consideration for the designing and fabricating process were presented. The switch unit in this device operating at  $1.15 \mu\text{m}$  has a switching voltage of 12 V and a crosstalk of less than -20 dB. The propagation loss in the waveguide of this device is about 7 dB/cm. The factors causing the crosstalk and the loss in this device were analyzed.

**Key words** asymmetric X junction, GaAs, optical switch arrays