

# GaAs $2\times 2$ Mach-Zehnder 光波导开关调制器

冯 浩 李锡华 王明华 杨佐娅

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 316008)

## 提 要

报道了 GaAs  $2\times 2$  非对称 Mach-Zehnder 光波导开关调制器的研制结果, 分析了这种开关的工作原理和产生串音的因素. 采用两个非对称 X 型耦合器代替传统的 Y 分支耦合器, 得到了性能良好的 X 型 3dB 耦合器.  $\lambda=1.15\mu\text{m}$  时, 器件的串音比小于  $-22.4\text{dB}$ , 开关电压约 1.2V.

关键词 集成光学, 光开关.

## 1 引 言

$2\times 2$  光波导开关是集成光学中的基本器件之一, 是光开关列阵的主要单元器件. 它主要有普通定向耦合型<sup>[1,2]</sup>; 全内反射型(TIR)<sup>[3]</sup>; 对称定向耦合型(BOA)<sup>[4~6]</sup>; 非对称 Mach-Zehnder (M-Z)干涉型光波导开关<sup>[7]</sup>. 非对称 M-Z 开关是在八十年代中期由 Izutsu 等人提出, 在 LiNbO<sub>3</sub> 材料上制作. 它用两个非对称 X 型耦合器代替传统的 Y 分支耦合器, 能够进行推挽操作, 可有效地减小开关电压, 以往对 M-Z 高速调制器的研究成果也可以直接用于这种开关, 得到高速  $2\times 2$  开关及与之相应的高速开关列阵. 目前这种器件主要是制作在 LiNbO<sub>3</sub> 材料上, 非对称 X 型耦合器也有制作在玻璃材料上的<sup>[8]</sup>, 作者在文献[9]中首次报道了 GaAs 非对称 X 型耦合器的研究工作. 本文首次报道了由两个非对称 X 结构成的 GaAs $2\times 2$  非对称 M-Z 光波导开关/调制器的研制工作.

## 2 原 理

非对称 M-Z 开关由两个非对称 X 结耦合器代替传统的 Y 分支 M-Z 调制器中的 Y 分支耦合器, 结构如图 1(a)所示. 当一束偏振光从左边“1”结中任一单模波导(如  $a$  波导)输入时激励产生基模. 根据耦合模理论, 会在同一分支区内的另一输入单模波导(如  $b$  波导)中激励产生两个基模, 由于它们幅度相等, 相位相反而互相抵消. 由两个输入单模波导构成的这个分支系统, 称同相位模为偶模(或称对称模), 反相位模为奇模(或称反对称模). 奇模和偶模沿  $z$  正方向传播, 在分支区内这两个模相互叠加[图 1(b)], 在“1”结右边两个非对称单模波导中分离输出, 偶模从宽波导输出, 转变为波导的基模; 奇模从窄波导输出, 同样转变为该波导的基模, 而这两个基模的相位相反. 这时的“1”结起到了 3dB 耦合器的作用. 从 3dB 耦合器出来的两束等能量光分别经过有源区进行相位调制. 在这个区域内, 由于两个非对称单模波导间距足够大, 波导之间不会发生模耦合. 这两个基模分别通过有源区产生

$\Delta\varphi$  的相对相位差, 然后进入右边的 X 结“2”结)耦合器. 这两束不同相位的光在这里干涉, 产生的零次模从“2”结的输出端上方波导(c波导)输出,

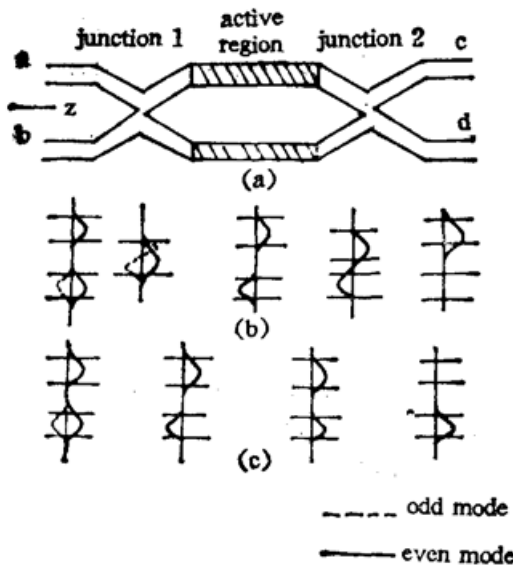


Fig. 1 Structure of the asymmetric M-Z switch (a), and the optical field distributions in any regions at the applied voltage of 0V and  $V_{\pi}$  (b)、(c)

一次高阶模从下方波导(d波导)输出. 这时的“2”结起到了干涉器的作用. 图 1(b)和(c)分别表示理想状态下相位差为零和 $\pi$ 时的开关的各个区域的光场分布. 实际上, 在零偏压下, 开关两个输出端, 可能同时有光输出. 这是因为在开关的非对称波导区域内, 两个非对称波导有不同的有效折射率, 因此, 两个基模有不等的传播常数. 模经过距离  $l$  ( $l$  为非对称单模波导长度) 传输会产生一个相对初相位差  $\Delta\varphi_0$ , 经干涉器后两个输出端均有输出. 只有当  $\Delta\varphi = n\pi$  ( $n$  为整数) 时, 全部光能量才会从干涉器的一个输出波导输出. 它们的输出表示式为:

$$c \text{ 端输出: } P_c = (P_{in}/2) (1 - \cos \Delta\varphi); \quad (1)$$

$$d \text{ 端输出: } P_d = (P_{in}/2) [1 - \cos(\pi - \Delta\varphi)] \quad (2)$$

(2) 式中  $\pi$  是从 3dB 耦合器输出的两个基模的相位差 [图 1(b)].  $\Delta\varphi$  包括初相位差  $\Delta\varphi_0$  和电场作用产生的相位差  $\Delta\varphi_m$ , 即  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi_m$ . 如开关制作在 GaAs 的 (100) 面上, 则:

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

式中  $\lambda$  为光波长,  $\gamma_{41}$  为 GaAs 材料的电光常数,  $n_0$  为折射率,  $V$  为驱动电压;  $L$  为有源区长度,  $d$  为波导宽度;  $\Gamma$  为光场和电场的重叠积分.

### 3 影响串音的因素

在光波导开关中, 串音的大小将直接影响器件的开关特性. 而引起串音的因素主要有: 1) 非等模激励; 2) 由于输入端的不对称性引起的不同模式之间的耦合; 3) 波导的不同散射损耗.

非等模激励是指当两个输入单模波导间距较小, 偏振光被耦合入  $a$  波导的同时, 对  $b$  波导输入端也产生影响 (如产生波导间耦合等), 从而导致非等模激励, 即奇偶模幅度不等的激励. 一般来讲, 如果输入波导间距大于几个波导宽度 (如 4~5 个波导宽度) 就可以得到满意的等模激励. 文献 [5] 的作者通过计算, 得到在输入波导间距为 2 倍波导宽度时, 奇偶模幅度比大于 40 dB.

在“1”结输入分支区, 由于光刻版或工艺过程的误差, 会引起两个单模波导的不对称, 如几何尺寸的误差、折射率的误差等; 或绝热条件得不到满足, 都可能造成奇、偶模之间的模式耦合, 引起分光后两个基模幅度的不相等, 从而导致串音. 在文献 [5] 中, 作者讨论了由于两个输入波导的不对称性对奇偶模的影响, 得出了输入波导的任何微小的不对称性都将限制串音比的结论. 因此, 消除光刻版及工艺过程的误差, 是得到低串音的基础. 另外, 在开关的

有源区,两个单模波导间距也必须足够大,否则也将造成两个波导之间模的相互耦合,引起串音。但是,有源区的两个波导宽度不等,会产生较大的有效折射率差。因此,即使波导间距相应减小,也不会产生波导之间模的相互耦合。一般取波导间距约为2个波导宽度,就可满足要求。因此,非对称性可减小器件尺寸,这是非对称 M-Z 开关的主要优点之一。

如果在工艺过程中产生误差,或有源区的两个波导出现不同的缺陷,这些缺陷就会产生不同的散射损耗,从而产生不同的传输损耗而引起串音。

事实上,上述诸因素的直接作用只是引起分光后的两个基模能量的不相等而导致串音,假设从 3 dB 耦合器输出的两束光能量分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 经过作用区后,两个波导中的光束均获得  $\Delta\varphi/2$  的相位差,则输出光为:

$$I_o = \left| \frac{\sqrt{I_1}}{\sqrt{2}} e^{i\Delta\varphi/2} - \frac{\sqrt{I_2}}{\sqrt{2}} e^{-i\Delta\varphi/2} \right|^2 = \frac{1}{2} (I_1 + I_2) - \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi)$$

同理可得: 
$$I_d = \frac{1}{2} (I_1 + I_2) - \sqrt{I_1 I_2} \cos(\pi - \Delta\varphi),$$

器件的串音比为:

$$[I_o]_{\min} / [I_d]_{\max} = \left( \frac{\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2}}{\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}} \right)^2. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,  $I_1$  和  $I_2$  越接近,串音越小。因此,能否制作性能良好的 3 dB 耦合器对开关的性能有很大的影响。

## 4 器件的设计与制作

在器件的设计中,运用了有效折射率法和耦合模理论。在文献[8, 10~12]中,作者说明了在非对称耦合器结构中,为了实现模的分离,分支角  $\theta$  必须满足的条件为:

$$\theta \ll \Delta\beta/\gamma$$

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。在设计脊型 GaAs 波导开关时,通过有效折射率法计算,当选取对称波导宽度为  $5 \mu\text{m}$ , 非对称波导宽度及分别为  $5.5 \mu\text{m}$  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  $1^\circ$ 。因此,选取非对称边分支角为  $0.4^\circ$ , 对称边分支角为  $0.8^\circ$ 。有源区波导间距为  $14 \mu\text{m}$ , 有源区长度为  $5 \text{mm}$ 。

器件制作在 GaAs 外延片上。在 (100) 面  $n^+$  GaAs ( $n^+ \geq 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) 衬底上用汽相外延法生长厚度为  $2.3 \mu\text{m}$  的  $n$ -GaAs ( $n \leq 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ) 外延层,采用剥离技术制作 Al-Schottky 电极,并用湿法腐蚀出脊波导。采用磷酸系列作腐蚀液。  $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:10$ 。图 2 所示为脊波导照片。下电极采用 Au:Ge:Ni 合金形成欧姆接触电极。



Fig. 2 The SEM picture of the asymmetric ridge waveguides

## 5 器 件 测 试

采用  $\lambda=1.15\mu\text{m}$  波长的 He-Ne 激光器为光源,光经过透镜聚焦从波导端面耦合入波导,其输出光再经透镜准直,用红外摄像机摄取输出光斑,由显示器显示其近场分布(光斑),再用快速波形存贮器进行纪录.器件的测试系统原理图如图 3 所示.经解理 X 结测试,得到了小于  $-2.9\text{dB}$  的功率分配.图 4 显示了非对称 3dB 耦合器的输出光斑和场分布,说明这个 3dB 耦合器性能良好.图 5 为在不同电压下的光斑和光场分布.经测量,得到了串

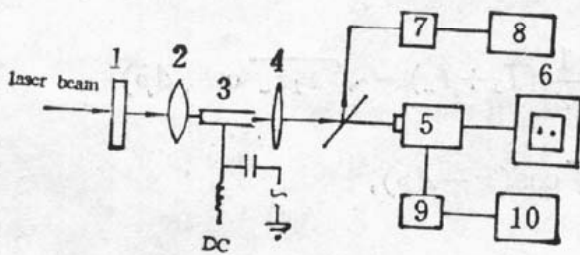
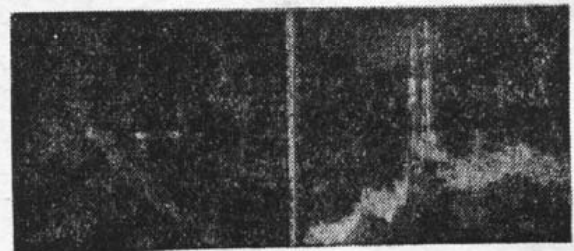


Fig. 3 Schematic of the measuring system

1—polarizer 2, 4—len 3—sample 5—IR camera 6—monitor 7—detector 8, 10—osillograph 9—choosing line memory

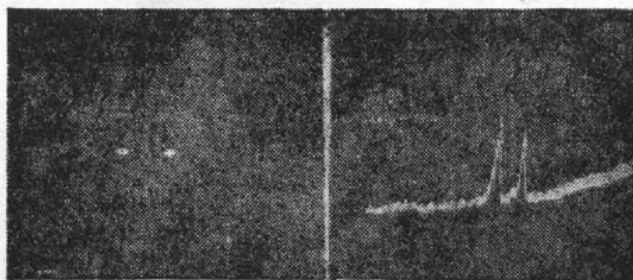


(a) (b)

Fig. 4 The optical spots (a) and the optical field distributions (b) of the 3dB coupler



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 The output optical spots and optic field distributions at the applied voltage of 13V (a), 16.5V (b) 18.5V (c)

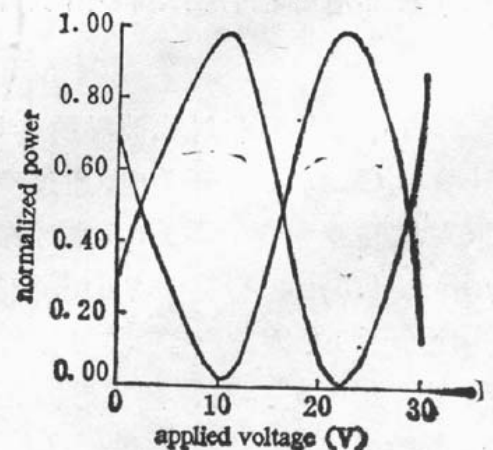


Fig. 6 Power variation versus the applied voltage

音比小于  $-22.4$  dB, 开关电压约  $12$  V 的  $2 \times 2$  开关特性。(这里指的开关电压是任一输出波导输出光功率为最大和最小时的调制电压差)。图 6 为输出端口光功率随驱动电压的变化情况。

## 6 总 结

本文研制的 GaAs M-Z  $2 \times 2$  光开关, 采用了非对称 X 型 3dB 耦合器(干涉器), 得到了小于  $-22.4$  dB 的串音比和  $12$  V 左右的开关电压, 波导传输损耗小于  $0.7$  dB/mm。波导传输损耗主要来自衬底载流子的吸收损耗。虽然增加波导厚度可以减小传输损耗, 但调制电压也相应增大。如我们把波导厚度增加到  $3.5 \sim 4 \mu\text{m}$ , 波导传输损耗下降到  $0.5$  dB/mm 左右, 而调制电压(半波电压)却提高到  $30 \sim 40$  V。所以, 降低传输损耗的有效方法是采用异质结结构, 这种结构波导的传输损耗达到  $0.02$  dB/mm 以下<sup>[13]</sup>。因此, 这种 GaAs 非对称 M-Z 开关可以在 GaAs 开关列阵中运用。

## 参 考 文 献

- [1] K. Tada, K. Hirose, A new light modulator using perturbation of synchronism between two coupled guides. *Applied Physics Letters*, 1974, **25** (10): 561~562
- [2] 王明华, 多田邦雄. 定向耦合波导型 GaAs 光调制器的研究. 浙江大学学报, 无线电专辑, 1985: 37~44
- [3] C. S. Tai, B. Kim, F. R. El-Akkari, Optical channel waveguide switch and coupler using total internal reflection. *IEEE, J. Quantum Electron.*, 1978, **EQ-14** (7): 513~517
- [4] M. Papuchon, Am. Roy, D. P. Ostrowsky, Electrically active optical bifurcation: BOA. *IEEE, J. Quantum Electron.*, 1977, **31** (4): 266~267
- [5] R. A. Forber, E. Marom, Symmetric Directional coupler switches. *IEEE, J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22** (6): 911~919
- [6] 王明华, 冯浩, 李锡华等. GaAs 对称定向耦合光开关的研究. 激光光子, 已录用, 1992:
- [7] M. Izutsu, A. Enokihar, T. Sueta, Optical-waveguide hybrid coupler *Optic Letters*, 1982, **7** (11): 549~552
- [8] C. P. Hussell, R. Ramaswamy, R. Srivastava, Wavelength and polarization insensitive 3dB cross-coupler power dividers by ion exchange in glass. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56** (24): 2381~2383
- [9] 王明华, 冯浩, 李锡华等. GaAs 非对称波导型耦合器的研究. 激光光子, 已录用, 1992:
- [10] Y. Silberberg, P. Perlmutter, J. E. Earan, Digital optical switch. *Appl. Phys. Lett.*, 1987 **51** (16): 1230~1232
- [11] W. K. Burns, A. F. Milton, Mode conversion in planar-dielectric separatin $\bar{3}$  waveguides. *IEEE, J. Quantum Electron.* 1975, **QE-11** (1): 32~39
- [12] W. K. Burns, A. F. Milton. An analytic solution for mode coupling in optical waveguide branches. *IEEE, J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16** (4): 446~454.
- [13] H. Inone, K. Hiruma, K. Ishida *et al* , Low loss GaAs optical waveguides. *IEEE, Trans. Electron Devices*, 1985, **DE-32** (12): 2662~2668

## CaAs $2 \times 2$ Mach-Zehnder optic waveguide switch/modulator

FENG HAO    LI YANGHUA    WANG MINGHUA    YANG ZUOYA

*(Dept. of Information & Electronic Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310008)*

(Received 14 October 1991; revised 20 December 1991)

### Abstract

This paper reports the research result of GaAs  $2 \times 2$  asymmetric Mach-Zehnder waveguide switch/modulator. The mechanism of this device and the factors of crosstalk are analyzed. Instead of traditional Y-branches, two asymmetric X-junctions have used in the switch. An 3dB coupler with good performance is obtained. The device operating at  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  has a 12V switching voltage and a crosstalk ratio less than  $-22.4 \text{ db}$ . This kind of switch will find application in the switching arrays.

**Key words** integrated optics, optical switch.