

# GaAs $1 \times 2$ Mach-Zehnder 波导开关/调制器

冯浩 王明华

(浙江大学 信息与电子工程学系 杭州 310027)

**摘要** 本文报道了 GaAs  $1 \times 2$  MZ 波导开关/调制器的研究结果,并分析了该器件的工作原理. 这种器件利用 Y 分支作为 3dB 耦合器,非对称 X 结作为干涉器. 在波长  $1.15 \mu\text{m}$  下测试,得到了串音比小于 -16dB 和开关电压 19V 的开关特性. 预计该器件可广泛应用于 GaAs  $1 \times n$  开关列阵及高速光调制等方面.

**EEACC:** 4140, 4130

## 1 前言

在集成光学中,光开关和光调制器是基本器件之一,不仅广泛应用于光通信、光计算及光信息处理系统,而且是光开关列阵的基本单元. 近年来, GaAs 光调制器/光开关有较快的发展. 其中采用光电效应的 Mach-Zehnder(MZ) 干涉型调制器/开关的速率达到了  $26.4\text{GHz}^{[1]}$ , 相位调制器的调制速率达到了  $110\text{GHz}^{[2]}$ . 在采用电光效应的调制器/开关中,主要有以下几种结构: 1) Y 分支型和三波导耦合型 MZ 调制器/开关<sup>[3,4]</sup>, 2) 定向耦合调制器/开关<sup>[5]</sup>, 3) BOA 型光开关/调制器<sup>[6]</sup>, 4) 非对称 MZ 开关/调制器<sup>[7,8]</sup>. 这些不同结构的器件各有特点,已被广泛的研究及应用. Y 分支 MZ 波导调制器,采用了两个 Y 分支耦合器做为输入输出端,因为只有一个输入端和一个输出端,一般只能作为调制器. 在文献[8]中,我们首次报道了 GaAs  $2 \times 2$  非对称 M-Z 开关/调制器,在这个  $2 \times 2$  开关中,我们采用了两个非对称 X 结代替 Y 分支调制器中的 Y 分支耦合器,构成了  $2 \times 2$  光开关. 由于这种开关的两个调制波导的宽度不同,存在着传播常数差,在脉冲光输入情况下,将产生脉冲走离现象,因此该器件不能工作在脉冲状态. 本文首次报道的 GaAs  $1 \times 2$  MZ 波导光开关/调制器,只用了一个非对称 X 结代替 Y 分支调制器中的干涉器,这样,该器件既具有了 Y 分支耦合器较好的 3dB 分光特性,又具有  $1 \times 2$  的开关特性,并且其调制波导对称,解决了  $2 \times 2$  非对称 MZ 开关在脉冲工作状态下存在的问题,使 Y 分支 MZ 波导调制器有更广泛的使用范围.

## 2 基本原理

一般的单模 Y 分支调制器结构如图 1 所示。当一束偏振光从调制器输入端输入后，经 Y 分支耦合器等分为两束光，这两束相等功率的光分别经两个电光作用区后，得到相对相位差，并在另一个 Y 分支耦合器中干涉，产生的基模从单模输出波导输出；产生的一次模由于在单模输出波导中截止而散射到衬底或平板波导中未被利用。在文献[9]中，作者论述了非对称 X 结的工作原理。在 X 结的分支角  $\theta < \Delta\beta/\gamma$

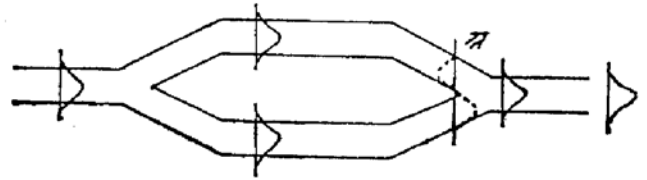


图 1 单模 Y 分支调制器工作原理

时，非对称 X 结起模式分离作用。图 2 表示了这个 X 结作为干涉器的基本工作原理。当两束同相偏振光从对称端输入时，经干涉区叠加产生偶模从宽波导中输出，(图 2 (b) 所示)；当两束反相偏振光从对称端输入时，经干涉区叠加产生奇次模，并从窄波导中输出 (图 2 (c) 所示)。

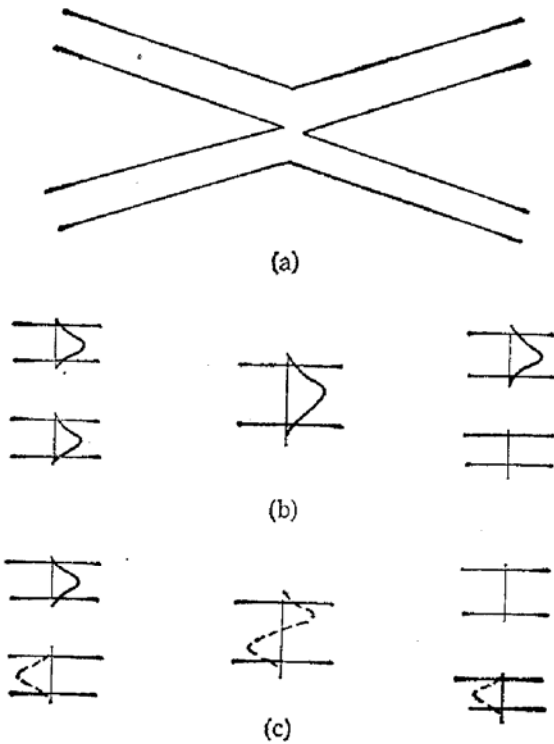


图 2 X 结作为干涉器的工作原理

根据以上分析，用这种 X 结代替 Y 分支干涉器构成的 M-Z 调制器，既可以保持 MZ

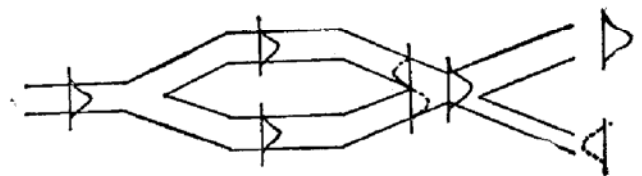


图 3 1×2 开关的工作原理

调制器的优点，如高速调制特性等，也可以作为  $1 \times 2$  开关单元，构成开关列阵，图 3 所示为该开关的工作原理。

一束偏振光经 Y 分支 3dB 耦合器等分为两束相等功率的光，这两束光经过电光作用区调制，得到了相对相位差，并在非对称 X 结分支区干涉，产生的偶次模从宽波导中输出。产生的奇次模从窄波导中输出。即

$$P_{out1} = P_{in} \cos^2(\Delta\Phi/2), \tag{1a}$$

$$P_{out2} = P_{in} \sin^2(\Delta\Phi/2), \tag{1b}$$

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_e + \Delta\Phi_0, \tag{1c}$$

式中  $\Delta\Phi_0$  为初始相位差， $\Delta\Phi_e$  由电光效应产生的相对相位差。

在(1)式中，与外加电压  $V$  有关的参数只有  $\Delta\Phi_e$ ，即

$$\Delta\Phi_e = (\pi/\lambda)r_{41}n^3LV/d, \tag{2}$$

式中  $L$  为电极长度,  $d$  为波导厚度,  $\Gamma$  为重叠积分,  $n$  为折射率,  $r_{41}$  为电光系数。

### 3 高速开关特性分析

采用电光效应作为调制方式的器件, 其高速调制或开关特性主要受到两个方面的限制。

对于集总电极 (lumped electrode) 器件, 调制带宽为:

$$\Delta f_0 \cong 1/(2\pi R_S C L), \quad (3)$$

其中,  $C$  为单位长度结电容,  $L$  为电极长度,  $R_S$  为匹配电阻。

从上式可知, 其调制带宽受到电极结电容的限制; 因此, 减小结电容是提高集总电极器件开关速率的主要途径。

对于行波器件, 调制速率受到光场和电场速度失配的限制。调制带宽为:

$$\Delta f_c = 1.4c/\pi L(n_0 - n_u) \quad (4)$$

式中  $n_0, n_u$  分别为光波和微波的折射率,  $L$  为作用区长度。

目前, 集总电极的 MZ 调制器 3dB 带宽达到了 8.4 GHz, 行波电极的 MZ 调制器 3dB 带宽达到了 24.6GHz。

### 4 串音分析

在非对称 MZ<sub>1</sub> × 2 开关中, 串音主要来自两个方面。一方面是 Y 分支 3dB 耦合器的两个分支波导的不对称性等因素造成的两个分束光功率不相等。

设这两束光功率分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 通过调制区后得到  $\Delta\Phi/2$  的相对相位延迟, 则由其引起的串音为:

$$(I_{out1})_{min}/(I_{out2})_{max} = [(\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})(\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})]^2. \quad (5)$$

另一方面是非对称 X 结分支角较大, 造成模式分离不完全, 产生串音。在文献[9]中, 作者计算了在不同角度下模式分离的幅度比。

### 5 器件的设计与制作

我们采用了有效折射率法计算了单模波导尺寸, 并根据(2)式得到了 X 结的角度。图 4 所示为该器件的参数。该器件制做在  $n^-/n^+$ GaAs 外延片上, 外延片通过气相外延方法生长。器件制作采用了剥离工艺, 用湿法腐蚀波导, 腐蚀液为  $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O = 1:1:10$ , 在 25°C 下腐蚀约 2'30", 脊高 1.2 μm。图 5(a) 所示为脊波导的参数。调制方式采用了集总电极形, 上电极为 AL-Schottky 势垒接触, 下电极为 Au-Ge-Ni 欧姆接触电极。电极参数如

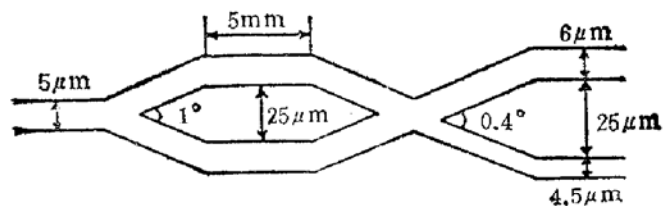


图 4 1×2 开关结构参数

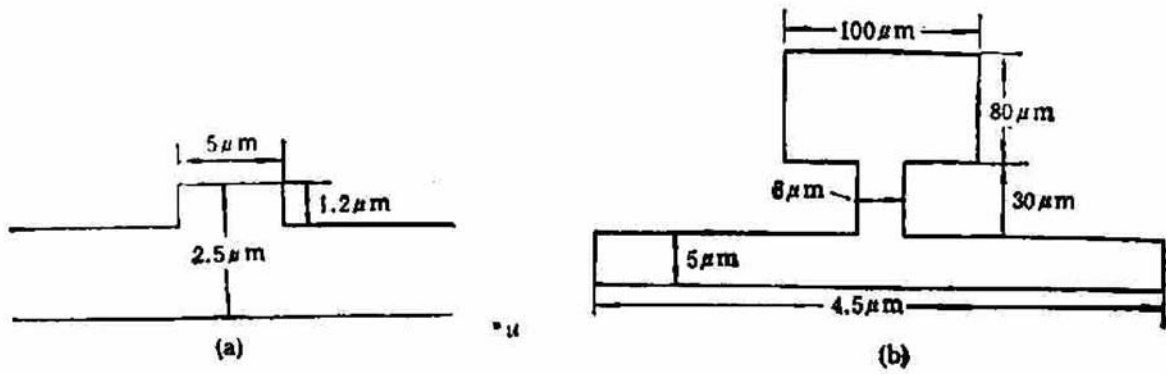


图 5 脊波导参数 (a) 和电极参数 (b)

图 5 (b) 所示。

### 6 测试与结果

一束偏振光经透镜耦合入波导端面,从波导输出的光再由透镜准直,由红外摄像机接收,监视器显示光斑,选行存储器记录光场分布。图 6 所示为不同电压下光斑和光场分布。如开关电压定义为:一输出波导的输出光功率由最大或最小变为最小或最大所需外加电压差。则在  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  下测量得到 19V 的开关电压和 -16dB 的串音比。图 7 所示为两个输出端口的光功率随调制电压的变化特性,调制电极采用了集总型电极,在零偏压下测量电极的电容约 4 pF,如匹配电阻为 50  $\Omega$ ,预计该器件带宽大于 1.8 GHz。波导传输损耗的测量采用了衰减系数测量法<sup>[10]</sup>,即:在相同输入光功率下,测量不同长度的波导的输出光功率,再由下面公式求得传输损耗。

$$\alpha = \ln(I_1/I_2)/(Z_2 - Z_1),$$

$$\text{传输损耗} = 4.3\alpha(\text{dB/cm}),$$

其中,  $Z_i$  是波导长度 ( $i = 1, 2, \dots$ );  $I_i$  是输出光强。这样,通过测量大量的样品,可准确地求得传输损耗。在上述波导结构参数下,测得传输损耗约 7 dB/cm。

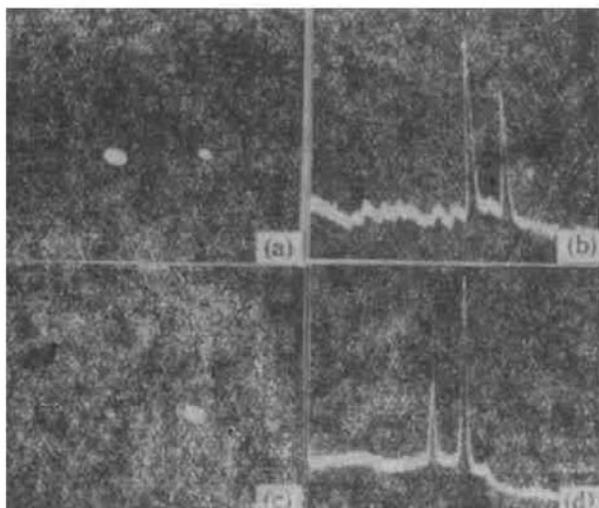


图 6 在 10V(a)(b) 和 18V(c)(d) 时的光斑和光场分部

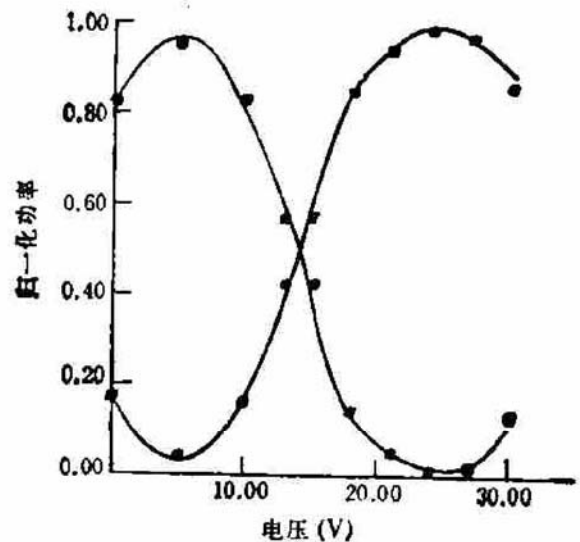


图 7 输出端口的光功率随调制电压的变化特性

## 7 结果讨论

由图 7 可以看出,在无偏压时,两个输出波导的光功率比约为 4:1. 说明分别通过两个调制波导的偏振光产生了相对相位差,也就是说这两个平行波导的传播常数不相等. 在波导完整的情况下,说明这两个波导存在着微小的不对称,这一不对称主要来自于制版过程. 对于 Y 分支耦合器来说,两个分支臂的微小不对称,都会严重影响分光比. 前面我们已分析了分光比不相等情况下的传音比.

另外,由于我们采用的波导是  $n^-/n^+$  同质结波导,这种结构对光场的限制较弱,大量的光场分布在低阻衬底里,这不仅使光的传输损耗增加,而且使光场和电场的重叠积分 ( $\Gamma$ ) 减小,半波电压增大. 解决这个问题的有效方法是采用 GaAs/GaAlAs 双异质结结构. GaAlAs 限制层与 GaAs 波导层的折射率差较大(约  $10^{-2}$ ),可有效地把光场限制在波导内,从而减小衬底和金属电极的吸收损耗,提高重叠积分. 并且,这种结构的波导层厚度较小 ( $< 1 \mu\text{m}$ ),半波电压也可以大大降低. 目前, GaAs 异质结波导的传输损耗小于  $0.2\text{dB}/\text{cm}^{[11]}$ ,采用电光效应的调制器半波电压小于  $5\text{V}^{[1]}$ .

## 8 总结

本文报道的 GaAs  $1 \times 2$  非对称 M-Z 波导开关/调制器采用了 Y 分支耦合器和非对称 X 结,并得到了  $19\text{V}$  的开关电压和  $-16\text{dB}$  的串音比. 该器件可作为  $1 \times n$  开关阵列的开关单元和高速调制器.

### 参 考 文 献

- [1] R.G. Walker, IEEE J. Quantum Electron., 1991 **27**(3):654.
- [2] J.Nees, S. Williamson, and G. Mourou, Appl. Phys. Lett., 1989, **54**(20): 1962.
- [3] P. uchmann, H. Kaufann, H. Melchior, and G.Guekos, Appl. Phys. Lett., 1985 **46**(5):462.
- [4] R.G. Walker, J. Lightwave Technol., 1987, **LT-5**(8):1444.
- [5] K.Tada and K.Hirose, Appl. Phys. Lett., 1974, **25**(10), 561
- [6] R.Papuchon, A. Roy and D.B.Ostrowsky, IEEE J. Quantum Electron., 1977 **QE-31**(4): 266.
- [7] M. Izutsu, A. Enokihara, and T.Sueta, Optics Letters, 1982, **7**(11):549.
- [8] 冯浩,李锡华,杨佐娅,王明华,光学学报,1992,12,9.
- [9] W.K.Burns and A.F. Milton, IEEE J. Quantum Electron., 1975, **QE-11**(1): 32.
- [10] 陈益新等编译,《集成光学》,上海交通大学出版社1985,51.
- [11] H. Inoue, K. Hiruna, K. Ishida and H. Matsumura, IEEE T. Electron Devices, 1985, **ED-32**(12):2662.

## GaAs $1 \times 2$ Mach-Zehnder Waveguide Switch/Modulator

Feng Hao and Wang Minghua

(*Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310008*)

**Abstract** The first GaAs  $1 \times 2$  Mach-Zehnder waveguide switch modulator is reported, and the mechanism of the device is analyzed. In this device, a Y-branch coupler is used at input side, and a asymmetric X-junction at output one. The characteristic of the extinction ratio of  $-16\text{dB}$  and a switching voltage of  $19\text{V}$  are achieved at an operating wavelength of  $1.15\mu\text{m}$ . It is shown that this device could be applied to  $1 \times n$  switching array and high-speed modulation.

**EEACC:** 4140, 4130