

# GaAs 三波导耦合 Mach-Zehnder 干涉型强度调制器\*

冯 浩 李慧娟 王明华

浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310008

(1991年9月26日收到; 1991年1月25日收到修改稿)

本文报道了一种 GaAs  $n^-/n^+$  脊型 M-Z 波导调制器, 这种调制器用三波导耦合器作为分束器和干涉器。运用 GaAs 的电光特性, 在  $\lambda = 1.15\mu\text{m}$  下测量, 得到半波电压 14V, 调制深度大于 95%, 3dB 带宽大于 1GHz 的调制特性。

EEACC: 4140, 4130

## 1. 前言

高速光调制器是信号处理、光通信等领域里的重要元件。用  $\text{LiNbO}_3$  材料制作的集成 M-Z 光调制器在七十年代中期就开始研制了<sup>[1-3]</sup>, 而在 GaAs 材料上制作集成 M-Z 光调制器则是在八十年代中期才开始的<sup>[4-6]</sup>。三波导耦合 M-Z 干涉型调制器是其中的一种重要的干涉型调制器。这种干涉型调制器利用材料的电光效应, 可以得到高速调制特性, 并可以利用行波电极得到大于 20GHz 的 3dB 带宽<sup>[7]</sup>。另外, 该调制器采用了三波导耦合器可以减小器件的散射损耗。因此, 研究三波导耦合 M-Z 干涉型强度调制器是一件很有意义的工作。

## 2. 基本原理

GaAs 三波导 M-Z 干涉型调制器的结构如图 1 所示, 输入, 输出区是由两个三波导耦合器构成的<sup>[8]</sup>。当一束光从左边耦合器中间那根波导输入后, 经过这个耦合器, 光被分为旁边两个波导, 如果这两个波导不对称的话, 那么分入的两束光就不相等, 这将影响调制器的消光比。因此, 设计和制作性能良好的三波导耦合器是提高调制器性能的重要因素之一。我们采用了平板波导有效折射率近似以及耦合模理论来设计三波导耦合器。根据耦合模理论, 如果输入(或输出)耦合器两边的两个波导完全对称, 则两个波导有相同的耦合系数, 其 3dB 耦合长度约为:

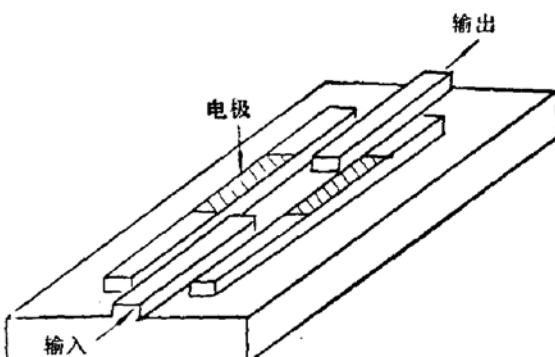


图 1 结构原理图

\* “八六三”高技术计划资助项目, 并得到“八六三”光电子主题专家组的支持。

$$L_{3dB} = L_c/2 = \pi/4K_{12} \quad (1)$$

其中,  $L_c$  为完全耦合长度,  $K_{12}$  为耦合器中间波导与旁边波导之间的耦合系数。由于完全耦合长度与波导参数有关, 微小的工艺偏差都将影响耦合长度  $L_c$ , 因此, 在实际制作中很难得到完全耦合的 3dB 耦合器。不完全的耦合长度, 将造成功率损耗。如果耦合器长度能保持在  $L_c$  的  $\pm 15\%$  以内, 则每个耦合器的功率损耗将小于 6%<sup>[4]</sup>。

被 3dB 耦合器分成相等功率的两束光, 分别进入两个调制区(即电光作用区), 单独地进行光相位调制, 产生相位延迟。根据 GaAs 材料的电光特性, 当调制器被制作在(100)面时, 经过电光作用区的光产生的相位延迟  $\Gamma$  为:

$$\Gamma = \pi/\lambda \cdot l/d \cdot n_0 r_{41} \cdot V, \quad (2)$$

式中  $d$  是波导厚度,  $l$  是电极长度,  $r_{41}$  是电光系数,  $n_0$  为折射率。

不同相位的两束光在第二个三波导耦合器(即干涉器)中进行干涉后输出。假如一个电极加电压, 另一电极接地, 则两束光经调制区产生一个相对相位差  $\Gamma$ , 则输出光强为:

$$I_0 = I_i \cos^2(\Gamma/2) = I_i \cos^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \frac{V}{V_s} \right) \right].$$

式中,  $V_s$  为半波电压。

### 3. 器件的设计与制作

我们采用的 GaAs 脊型波导是在(100) GaAs  $n^+$  衬底 ( $n^+ \geq 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 上, 用汽相外延生长的  $n^-$ -GaAs 外延层 ( $n \leq 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) 上制作的。由于外延层与衬底之间存在着不同的载流子浓度, 载流子浓度差产生了折射率差(约  $5 \times 10^{-4}$ )。因此, 在  $n^+$  衬底上形成了平板波导, 再通过化学腐蚀而形成脊型波导。

我们运用有效折射率近似方法和耦合模理论设计三波导耦合器, 并计算其单模波导参数。考虑到该器件与光纤耦合的效率及调制电压<sup>[9]</sup>, 我们选取宽为  $5 \mu\text{m}$ , 厚度为  $2.3 \mu\text{m}$ , 脊高为  $1.2 \mu\text{m}$  的单模波导, 选取电极长度为  $5 \text{ mm}$ 。通过计算(1)式, 若耦合波导间距为  $3 \mu\text{m}$ , 工作波长为  $1.15 \mu\text{m}$ , 则 3dB 耦合长度为  $3.4 \text{ mm}$ 。在调制区, 我们采用 Al-Schottky 整流电极, 其反向击穿电压大于  $30 \text{ V}$ , 下电极的欧姆接触采用 Au-Ge-Ni 合金, 合金温度为  $420^\circ\text{C}$ 。器件制作采用了剥离工艺和电极的自对准技术, 波导腐蚀采用了  $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:10$  溶液, 在  $25^\circ\text{C}$  下, 腐蚀时间为 2 分钟。

### 4. 器件特性测试与结果

我们采用波长为  $1.15 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器对器件特性进行测试。偏振光通过透镜聚焦, 从波导端面耦合入波导, 从波导另一端面输出的光再由另一透镜准直, 最后, 由红外摄像机接收, 在显示器上显示其光近场分布, 或直接由 Ge 探测器探测。图 2(见图版 I) 所示为  $0 \text{ V}$  和  $8 \text{ V}$  电压下的输出光斑。图 2(a) 中, 平板波导较弱, 光能量主要集中于一个光点, 说明光能主要是从耦合器中间的波导输出的。图 2(b) 中, 原光点减弱, 平板波导效应增强, 这是由于两束不同相位的光经干涉器干涉后, 只有一部分光能从耦合器中间的波导输出, 另一部分光能经旁边的两个波导散射到平板波导中(因为这两个波导没有延伸到解理面, 见图 1), 使平板波导效应增强。

经测试, 我们得到器件的调制特性为: 半波电压  $14 \text{ V}$ , 消光比  $-13 \text{ dB}$ , 调制深度  $95\%$ (调制深度定义为:  $\eta = (I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}$ )。图 3 所示为输出光功率随外加电压

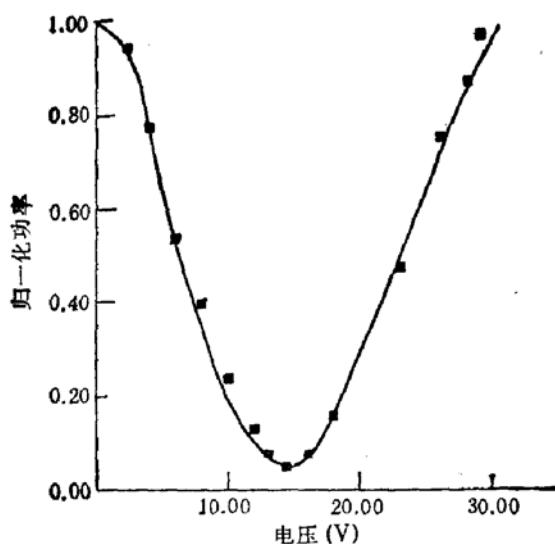


图 3 输出光功率随外加电压的变化特性

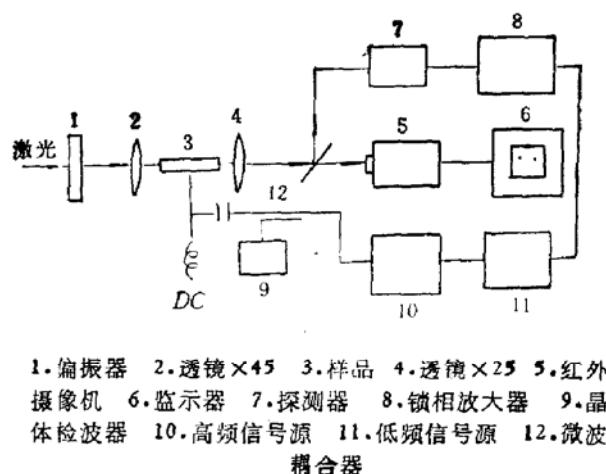


图 4 频率测试框图

的变化特性。频带测量采用了小信号测量方法<sup>[10]</sup>。图 4 所示为频带测试框图, 测得器件的 3dB 带宽大于 1GHz, 如图 5 所示。测试时, 工作点预置在 14.5V 处, 这样就能使从低频 Ge 探测到的低频调制信号的平均值不为零。当探测到的平均值下降到最大值的一半时的高频调制频率即为 3dB 带宽频率。波导损耗测量采用了吸收系数测量方法<sup>[11]</sup>, 测得波导传输损耗小于 0.7dB/mm。

## 5. 总结

我们研制的三波导耦合 M-Z 干涉型强度调制器, 测试结果表明, 这种器件具有半波

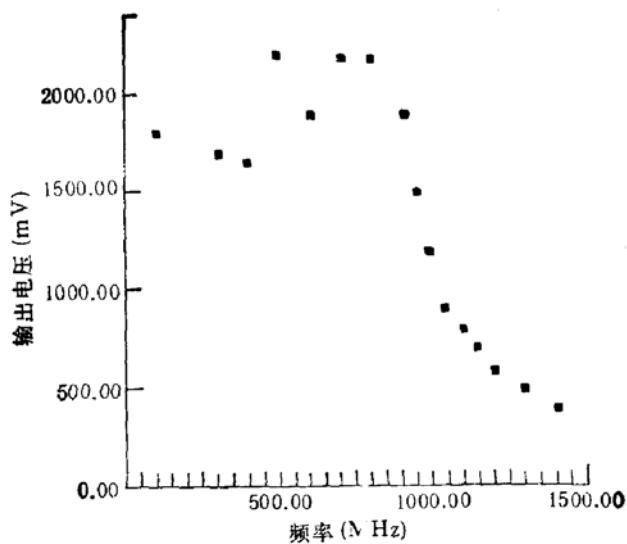


图 5 频率特性曲线

电压为 14V, 调制深度为 95%, 调制带宽大于 1GHz, 波导传输损耗小于 0.7dB/mm 的调制特性。由于我们使用的是同质结材料, 传输损耗不易降低, 当我们增加波导厚度至 3.5—4μm 时, 传输损耗只降至 0.4—0.5dB/mm, 半波电压却高达 40V 以上。由于传输损耗主要来自衬底的载流子吸收损耗, 所以采用 GaAs/GaAlAs 异质结材料可以使传输损耗降到 0.02dB/mm 以下<sup>[12]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] Y. Ohmachi and J. Noda, *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 544(1975).
- [2] F. Auracher and R. Keil, *Wave Electron.*, **4**, 129(1980).
- [3] F. J. Leonberger, *Opt. Lett.*, **5**, 312(1980).
- [4] J. P. Donnelly, N. L. Demeo, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 360(1984).
- [5] P. Buchmann, H. Kanfmann, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 462(1985).
- [6] R. G. Walker, *J. Lightwave Tech.*, **LT-5**, 1444(1987).
- [7] S. Y. Wang, S. H. Lin and Y. M. Hwang, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 83(1987).
- [8] H. A. Haus and C. G. Foustad, Jr., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, 2321(1981).
- [9] H. Inoue, K. Hiruma, et al., *IEEE Trans. Electron. Devices*, **ED-32**, 2662(1985).
- [10] S. Vehara, *Appl. Opt.*, **17**, 68(1978).
- [11] 冯浩, 李锡华, 王明华, 电子测量与仪器学报, **6**(3), 40(1992).

## GaAs Three Waveguides Coupling Mach-Zehnder Interference Intensity Modulator

Feng Hao, Li Huijuan and Wang Minghua

*Department of Information & Electron Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310008*

*(Received 26 September 1991; revised manuscript received 25 December 1992)*

### Abstract

A ridge-waveguide M-Z modulator via electro-optic effect has been fabricated in  $n^-/n^+$ -GaAs. Two three-waveguide couplers were used as 3dB-coupler and interferometer. An extinction of about 13dB of the output signal from the center waveguide is obtained with 14V half waveguide voltage at  $1.15\mu m$ . The optic signal bandwidth of the modulator was measured to exceed 1GHz.

**EEACC:** 4140, 4130