

GaAs/ GaAlAs 定向耦合器型行波调制器: 1. 设计*

杨建义 周 强 吴志武 吴通锡 王明华
(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

高桥芳浩 多田邦雄
(日本东京大学工学部电子工学科)

摘 要 从理论上重点分析和研究了器件行波电极的微波特性, 在半绝缘 GaAs 衬底上设计了具有 n^+ 重掺杂外延层和共平面电极的 GaAs/ GaAlAs 定向耦合器型行波调制器。针对实验中发现的行波电极上微波的高传输损耗问题, 分析了起因并提出了器件的改进设计方案, 从而设计出可达到 35 GHz 带宽的高速调制效应的光波导调制器。

关键词 GaAs/ GaAlAs, 光波导调制器, 集成光学。

1 引 言

高速光波导调制器是高速光通信系统和高速光信号处理系统中不可缺少的器件。虽然半导体激光器的直接调制方法相当有效, 但由于激光器的频谱展宽和啁啾(Chirping)现象等^[1, 2]阻碍了它的调制频带展宽。所以研究和用于外调制的高速光波导调制器是必需的。高速高效是光波导调制器的研究目标。目前, 人们对 LiNbO₃ 材料已经做了大量研究工作, 并取得了一定的成果^[3~5]。而 GaAs/ GaAlAs 材料较 LiNbO₃ 材料更具优点^[6, 7], 故备受重视。人们用 GaAs/ GaAlAs 外延材料制作了各种类型的调制器^[6~9]。

集总参数型光波导调制器由于受器件集总电极的电容特性限制, 调制带宽无法提高, 为此人们提出了行波型电极结构。对于行波型光波导调制器, 欲获得尽可能大的器件调制带宽, 行波调制电极中微波的传输速率与器件波导中光波传输速率需尽可能相等, 趋于匹配, 而且微波传输损耗也要求能够尽可能小。可见, 在行波型光波导调制器中, 明确行波电极的微波特性是设计器件的关键。本文将在 GaAs/ GaAlAs 异质结构外延材料上设计定向耦合型行波调制器。首先给出基于理论的一般性考虑, 针对行波型器件微波特性的重要性, 作了特别考虑, 优化出器件的结构。在此基础上对器件进行了改进设计, 并根据初步的实验结果, 给出器件最终的设计结构。

* 国家自然科学基金和“863”高技术资助项目。

收稿日期: 1996 年 3 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 7 月 15 日

2 设计原理

基于光学特性的考虑, 文中将器件制作在 GaAs/GaAlAs 的异质结结构外延材料上。通常, 光波导调制器所用的材料是生长在 n^+ -GaAs 衬底上, 器件使用上下电极结构, 这样使得器件能够有较高的调制效率、较简单的工艺过程。

从行波电极电学特性出发, 通常调制器调制电压的频率衰减系数可以表示为

$$\eta(\omega_m) = \exp\left(-\frac{\alpha_m}{2}L\right) \left|\frac{\sin\Phi}{\Phi}\right| \quad (1)$$

式中

$$\Phi = \frac{\beta_m - \beta_0}{2}L = \frac{\Delta nk_0L - j\alpha_mL}{2}$$

$$\beta_m = k_0n_m - j\alpha_m, \quad \beta_0 = k_0n_0$$

$$\Delta n = n_m - n_0$$

n_m 和 n_0 分别为器件行波电极中的微波和波导中的光波的有效折射率, α_m 为微波在行波电极上的传输损耗, L 为器件的调制长度, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为光波在真空中的波矢, ω_m 为调制微波的角频率。由(1)式可以看到, 器件中微波和光波间传输速率(表现为有效折射率)的失配与微波传输损耗的大小对调制电压的频率衰减系数有着极大的影响。通常文献中所提到的行波调制器的(电)调制带宽便是由(1)式给出的, 而器件进一步的光调制带宽可以由(1)式进行推导获得^[10]。

对于 LiNbO₃ 材料的器件, 其行波电极为共平面型, 由于材料本身折射率的色散性和电极结构等原因, 使器件中微波和光波间的速率匹配几乎难以实现^[5, 6], 限制了器件调制带宽的提高。而 GaAs/GaAlAs 材料的器件, 在使用 n^+ -GaAs 衬底时, 将引入微波在行波电极传播中的慢波效应和极高的传输损耗^[11]。为了消除其中的不良因素, 人们也提出了在半绝缘 GaAs 衬底上利用类似 LiNbO₃ 材料的共平面电极制作器件^[12], 然而器件的速率匹配不仅依然无法达到, 而且由于没有 n^+ 重掺杂层对调制电场的限制作用, 使得器件调制效率也变得极低。

由于 n^+ 重掺杂层对调制电场的限制作用, 以及在微波特性中存在的慢波效应, 人们进而提出在 GaAs 波导层与半绝缘 GaAs 衬底间加入 n^+ 重掺杂层^[13]。通过恰当地优化材料参数, 可以使得器件在低光波传输损耗的同时, 做到电极中尽可能低的微波传输损耗和与光波间的传输速率的匹配, 获得高速的光波导调制器。

因此本文设计了如图 1 所示的调制器结构。器件选用了定向耦合器型。图中在 n^+ 重掺杂层下加入 n^- 层是出于波导光学性质的考虑, 可有效地限制波导中光场分布。器件中关于光学特性的设计可以参考文献[14]。图 2 给出了随调制频率变化器件的微波有效折射率和微波传输损耗的直线法^[15]分析结果, 此时微波的有效折射率几乎不随调制频率而改变, 与波导中光波间的传输速率近似匹配; 微波的传输损耗随频率上升而上升, 这一损耗与电极中引

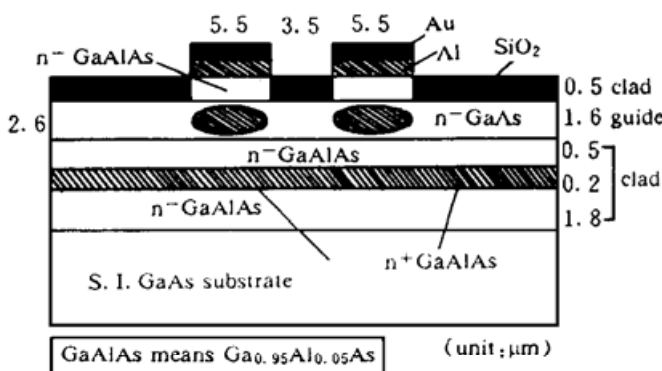


Fig. 1 The structure design of a traveling-wave directional coupler modulator

入的微波损耗(直线法的分析中尚未计入)将是限制器件调制带宽的主要因素。图 3 给出了调制器的理论分析带宽, 计算中计入了电极损耗 $1/\sqrt{f}$ (GHz) (dB/cm), 其中 f 是微波频率。器件的行波电极匹配阻抗设计在 $50\ \Omega$ 。

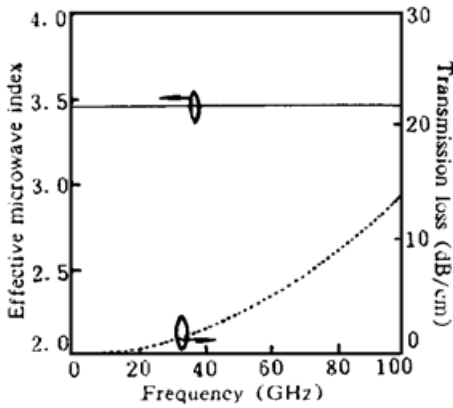


Fig. 2 Dispersion curves of the effective index and the transmission loss of the microwave in the traveling-wave electrode by means of the Method of Lines

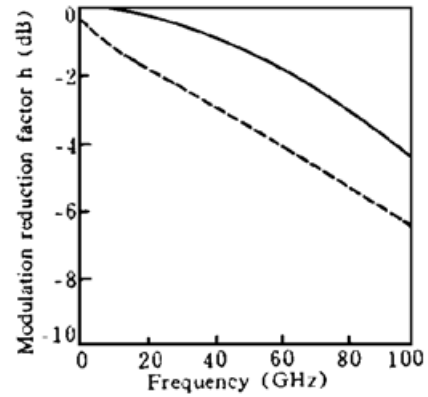


Fig. 3 The calculation results of the frequency responses of the modulator. The solid line is for assuming the electrodes as perfect conductor, and the dashed line is for assuming the electrodes have a loss of $1/\sqrt{f}$ (GHz) (dB/cm)

3 设计的改进

通过对如图 1 所示调制器的制作和测试, 发现器件行波电极的微波传输损耗相当大, 严重限制了器件调制频带的展宽。为了分析微波高损耗的起因, 作了一些初步的实验。

首先, 直接在半绝缘 GaAs 衬底上制作行波调制电极。经测试, 微波传输损耗极低, 如图 4(a) 中所示的 S_{21} 参数, 说明损耗不是来自器件的调制电极和衬底材料。图中关于 S_{11} 和 S_{12}

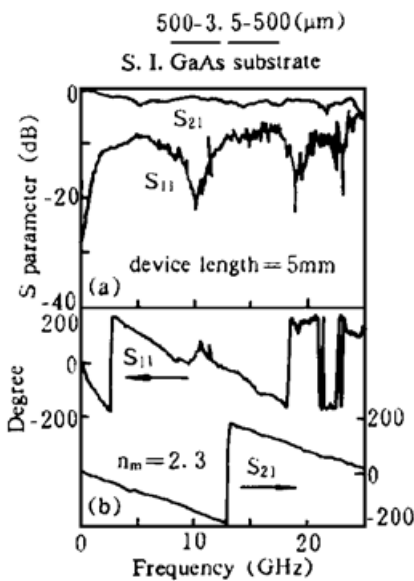


Fig. 4 The transmission characteristics of the electrodes on S. I. GaAs. (a) The Frequency characteristics of the amplitude of the S-parameter. (b) The Frequency characteristics of the phase of the S-parameter

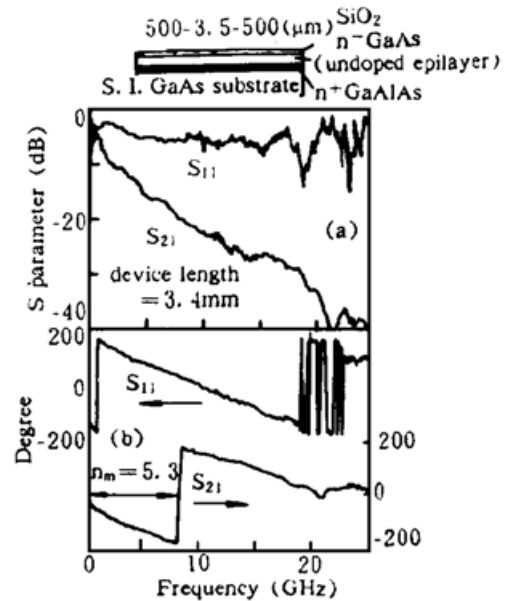


Fig. 5 The transmission characteristics of the electrodes on the epilayer which grown on S. I. GaAs. (a) The Frequency characteristics of the amplitude of the S-parameter. (b) The Frequency characteristics of the phase of the S-parameter

的物理意义以及器件的测试方法另文讨论。

接着又在含 n^+ 重掺杂层的外延材料上进行了行波电极制作并进行测试。结果如图 5 所示。由 S_{21} 参数曲线可以知道, 此时的微波传输损耗相当大。显然损耗来源于外延材料中 n^+ 重掺杂层与未耗尽 n^- 层。在理论分析中, n^+ 重掺杂层已被考虑并分析, 而对 n^- 层则是假设为完全耗尽。这与实际情况存在一定的差异: 在器件材料的生长中, 由于 n^+ 层的存在, 使得 n^- 层中的杂质必然保持有一定的浓度。这样, 即使在器件加上一定的偏置电压后, n^- 层中的载流子仅在电极下面局部区域能够被耗尽, 未被耗尽区域的载流子则会对微波产生吸收, 引入微波传输损耗。

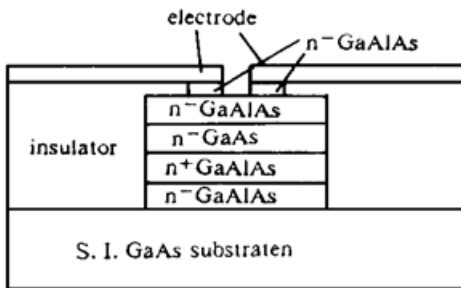


Fig. 6 GaAs/GaAlAs traveling-wave directional coupler optical waveguide modulator

为了进一步减小微波传输损耗, 作者设法去除不必要的 n^+ 重掺杂层和 n^- 层, 设计出的新器件结构如图 6 所示。图中的器件结构仅是在必要的地方留下了一个 GaAs/GaAlAs 外延层的台面。基于调制器行波电极的设置与对外连接的考虑, 对去除外延层的部分将用高分子绝缘材料予以填充。这样光波导调制器就既能够利用 n^+ 重掺杂层对电场的限制作用和对微波的慢波效应, 又能够尽可能地避免由于未耗尽外延层而引入的微波传输损耗, 从而获得尽可能大的调制带宽。

总 结 本文从理论出发针对器件行波电极的微波特性, 进行分析研究, 给出了 GaAs/GaAlAs 异质结构定向耦合型行波调制器的设计考虑。基于实验中遇到问题, 对器件进行了测试、分析和改进, 设计了具有宽调制频带的光波导调制器。

参 考 文 献

- [1] J. Bower, B. Hemenway, A. Gnauck *et al.*, High-speed InGaAsP constricted-mesa lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(6): 833~ 843
- [2] R. Vodhanel, A. Elrefnie, M. Iqbal *et al.*, Performance of directly modulated DFB laser in 10 GB/s ASK, FSK, and DPSK lightwave system. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(9): 1379~ 1386
- [3] K. Kubota, J. Nova, O. Mikami, Traveling-wave optical modulator using a directional coupler LiNbO₃ waveguide. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(7): 754~ 760
- [4] G. K. Gopalakrishnam, W. K. Burns, C. H. Bulmer, Electrical loss mechanisms in traveling wave LiNbO₃ optical modulators. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(1): 207~ 208
- [5] K. Noguchi, H. Migazawa, O. Mitomi, 75 GHz broadband Ti: LiNbO₃ optical modulator with ridge structure. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12): 949~ 951
- [6] R. Walker, High speed III-V semiconductor intensity modulators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(3): 654~ 667
- [7] R. C. Alferness, Waveguide electrooptic modulators. *IEEE T. Microwave Theory & Technol.*, 1982, **MTT-30**(8): 1121~ 1137
- [8] K. Tada, K. Hirose, A new light modulator using perturbation of synchronism between two coupled guides. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(10): 561~ 562
- [9] P. Buchmann, H. Kaufmann, H. Meichior *et al.*, Reactive ion etched GaAs optical waveguide modulators with low loss and high speed. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(7): 295~ 297
- [10] 吴志武, III-V 族半导体行波调制器研究. (博士论文), 杭州, 浙江大学, 1995, **1**: 11~ 17

- [11] S. H. Lin, S. Y. Wang, Y. M. Houng, GaAs pin electrooptic traveling-wave modulator at 1.3 μm . *Electron. Lett.*, 1986, **22**(18): 934~ 935
- [12] S. Y. Wang, S. H. Lin, High speed III-V electrooptic waveguide modulators. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 758~ 771
- [13] T. Hayashi, The research of traveling wave directional coupler modulator on semiconductor. (Doctor paper), Tokyo University, 1988: 14~ 20
- [14] P. Sansonetti, E. Caquot, A. Carencio, Design of semiconductor electrooptic directional coupler with the beam propagation method. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(2): 385~ 389
- [15] R. Pregla, W. Pascher, The method of lines. In *Numerical Techniques for Microwave and Millimeter Wave Passive Structure*, T. Itoh Ed., New York: Wiley, 1989: 381~ 446

GaAs/ GaAlAs Traveling-Wave Directional Coupler Optical Modulators: I. Design

Yang Jianyi Zhou Qiang Wu Zhiwu Wu Tongxi Wang Mingkua
(Department of Information & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)
Yoshihiro Takahasi Kunio Tada
(Department of Electronic Engineering, University of Tokyo)

(Received 26 March 1996; revised 15 July 1996)

Abstract The GaAs/ GaAlAs traveling-wave directional coupler optical modulator on S. I. GaAs substrates with a n^+ epilayer and the coplanar microstrip electrode are designed based on theoretical analysis and especially the analysis and study of the microwave characteristics of the traveling-wave electrodes in the device. Then, the problem of high transmission loss of the microwave in traveling-wave electrode, which was found during the experiments, is analyzed and the related modified structure of the traveling-wave directional coupler modulator with a 35 GHz bandwidth is designed.

Key words GaAs/ GaAlAs, optical waveguide modulator, integrated optics.