

具有分光功能的电吸收调制器分析*

刘叶新 陈晓文 邢晓波 吴添洪 傅思镜 文锦辉 林位株

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室/物理系, 广州 510275)

摘要 利用有限差分光束传播法和导模传输分析法, 对 GaAs/AlGaAs 多量子阱波导型电吸收调制器和多模干涉型分束器的光传播特性进行了理论分析, 提出了制作具有分光功能的电吸收调制器的设想, 并进行了模拟和实验验证.

关键词 电吸收调制器; 多模干涉型分束器; 有限差分光束传播法; 导模传输分析法

中图分类号 TN814 **文献标识码** A

0 引言

点对点 and 点对多点连接的多路光调制是光电集成回路中用于信号发送的重要组成部分. 如果采用耦合方式把单个电吸收调制器(EAM)^[1]和光分束器连接起来, 会导致器件整体性能下降, 而且尺寸也较大, 不利于集成. 为了获得结构紧凑、性能良好的集成光学器件, 需要有适当的调制器单元直接完成光调制和光分束功能, 提高器件的集成度.

本文提出了制作具有分光功能的电吸收调制器的设想. 利用有限差分光束传播法(FD-BPM)^[2]和导模传输分析法(MPA)^[3]分别对电吸收调制器和多模干涉型分束器的光传播特性进行了理论分析和实验测试. 这种器件具有制作工艺简单、结构紧凑等优点, 为设计具有分光功能的电吸收调制器提供了参考依据.

1 器件结构与分析

波导型电吸收调制器设计的目的是获得最佳的消光比 ER、光限制因子 Γ 、耦合效率 η 和低驱动电压; 而多模干涉型分束器设计的目的是获得低损耗和输出端各光束的均匀度. 我们在这里讨论的是脊宽较大的多量子阱脊型波导电吸收调制器以实现器件的调制和分光功能, 如图 1.

1.1 电吸收调制器波导的分析

EAM 的消光比和光限制因子分别定义为^[4]

$$ER = 4.343 \cdot \Gamma \cdot \Delta\alpha(V) \cdot L \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{\int_{WG} |E_{wg}|^2 dx dy}{\int_{All} |E_{wg}|^2 dx dy} \quad (2)$$

式中 E_{wg} 是脊型波导的模场分布, WG 为波导层积分区域, All 为整个波导的积分区域, $\Delta\alpha(V)$ 是与驱动电压有关的调制器调制前后吸收系数的变化,

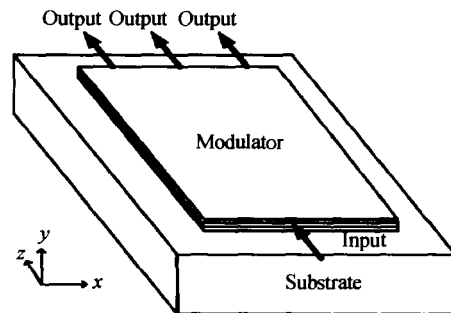


图 1 电吸收调制器/分束器结构
Fig. 1 Perspective view of electroabsorption modulation/splitter

L 为调制器的波导长度. 高斯光束-波导的耦合效率公式可以近似为^[5]

$$\eta = \frac{|\int E_{in}^* \cdot E_{wg} dx dy|^2}{\int |E_{in}^*|^2 dx dy \cdot \int |E_{wg}|^2 dx dy} \quad (3)$$

式中 E_{in} 是入射高斯光场分布.

图 2 是用 FD-BPM 方法模拟波导 TE 基模光斑大小以及光限制因子随波导几何尺寸大小的变化关系, W_x 和 W_y 分别是波导模在 x 和 y 方向上的半高全宽(FWHM). 入射光场是波长为 860 nm 的高斯光束. 从图 2 可以看出, 波导层厚度对波导基模的大小影响很大. 波导层很薄时, 波导在 y 方向上对光的限制较弱, 光斑较大. 随着波导层厚度的增加, 波导层对光的限制开始增强, 光斑很快变小. 当波导层厚度增加到 $0.25 \mu\text{m} \sim 0.3 \mu\text{m}$ 时, 光斑最

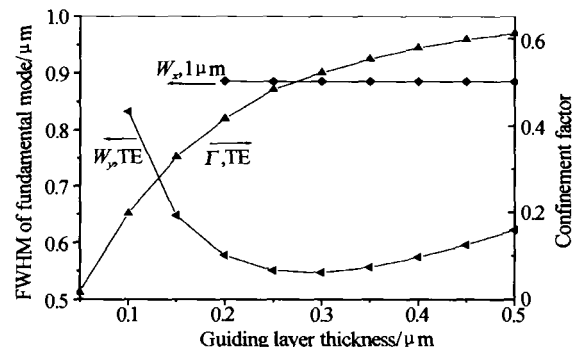


图 2 波导 TE 模的基模光斑和光限制因子随波导几何尺寸大小的变化关系
Fig. 2 Mode size and confinement factor of fundamental mode versus different guiding layer thickness, for TE mode

*国家自然科学基金(批准号:60178020,10274107)和广东省自然科学基金(批准号:011204,2002B11601)资助项目
Tel:020-84110042 Email:stslwz@zsu.edu.cn
收稿日期:2004-10-19

小;继续增加波导层厚度,光斑亦随之变大,但变化不很明显.

Γ 表示导波模被限制在波导层的程度.从图2可以看出,随着波导层厚度的增加(即MQW的周期数增加),更多的光功率被限制在波导层区域, Γ 随之增大.根据式(1)可知 Γ 对调制器的ER影响很大.当波导层厚度增加时, Γ 增大,ER增加,但在相同的驱动电压下,电场强度降低,限制了ER的增加.因而需要增加驱动电压以实现相同的电吸收效应.而波导层厚度较小时,虽然可以减小驱动电压,但波导层厚度的减小会导致 Γ 减小、调制器电容增加,从而使ER和调制带宽都降低.

因此,在设计电吸收调制器的波导结构时,必须综合考虑波导层厚度对调制器的消光比、耦合效率、调制带宽以及驱动电压等参数的影响,选取适当的多量子阱厚度.而对波导宽的选择,则在下文中进行分析.如果采用共面波导的电极结构,用 k 值法计算电吸收调制器的调制带宽可达100 GHz以上^[6].

1.2 多模波导的分析

基于自映像原理^[7],在多模波导区(一般大于3个模式),不同模式的传播速度不同.随着光波的传播,传播常数的差异使得各个模式之间产生一定的相位差.这些模式线性叠加,沿波导的传播方向,周期的产生入射场的单像或者多像.目前有多种分析多模波导场分布的方法,如全模分析法、光束传播法等.如果不考虑辐射模的影响,把输入场看成所有导模的线性叠加,全模分析法就变成了MPA法.它简单、明了,可以清晰地给出物理意义等特点;而用FD-BPM则可以模拟多模波导在不同工作条件下的光场传输情况.

设多模波导沿 Z 轴的任一横截面场分布 $\Psi(y, z)$ 写成所有导模的线性叠加

$$\Psi(y, z) = \sum_v c_v \Psi_v(y) \exp [j(\beta_0 - \beta_v)z] \quad (4)$$

式中 $\Psi_v(y)$ 为 v 次模的光场分布; c_v 为场激励系数,可由模式正交性得到

$$c_v = \int \Psi(y, 0) \Psi_v^*(y) dy / \int \Psi_v^2(y) dy \quad (5)$$

式中 $\Psi(y, 0)$ 是 $Z=0$ 处的横截面场分布.定义 L_π 为两个最低阶模的拍长^[8]

$$L_\pi = \pi / (\beta_0 - \beta_1) \approx 4n_r W_c^2 / 3\lambda_0 \quad (6)$$

式中 β_0, β_1 分别是0次模和1次模的传播常数, n_r 是脊型波导的有效折射率, W_c 为考虑了古斯-汉欣位移后的等效多模干涉区的宽度.在 $Z=L$ 处,式(4)可写成

$$\Psi(y, L) = \sum_v c_v \Psi_v(y) \exp [j(\frac{v(v+2)\pi}{3L_\pi})L] \quad (7)$$

由式(7)可以得到在 $Z=L$ 处多模波导横截面的横

向光场分布.

为了获得较短的干涉长度,对于 $1 \times N$ 的分束器通常采用入射光位于多模波导中心的对称输入.获得 N 重像的波导宽度和长度的关系

$$L = p/N(3L_\pi/4) \quad (8)$$

其中 p, N 为互质的整数.

在设计多模波导时,还必须考虑工艺加工精度的问题.定义器件的容差为当多模波导长度变化 δL 时,输出端各个像的功率变化为0.5 dB^[9]

$$\delta L/L \propto \delta W_c/W_c \approx \delta n_r/n_r \quad (9)$$

从式(8)可以看出,获得 N 个像的波导长度 L 与 W_c 的平方成正比关系.因此要减小器件的长度,必须适当选择多模波导的宽度;从式(9)可以看出,多模波导长度 L 设计得较小时,有利于增加多模波导的制作容差.

2 理论模拟和实验测试结果

根据分析,制作了如图1所示的具有分光束功能的电吸收调制器.多模波导脊宽为 $10 \mu\text{m}$ 、脊高为 $2 \mu\text{m}$.导波层由10个周期的GaAs/AlGaAs多量子阱组成,厚约为 $0.2 \mu\text{m}$,上下包层分别是p型AlGaAs和n型AlGaAs.

假设GaAs/AlGaAs多量子阱波导的等效折射率 $n_r=3.5$,入射光波长为 860 nm ,根据式(8)可以求得波导长度分别为 $275 \mu\text{m}$ 和 $415 \mu\text{m}$ 时,波导输出端分别对应有三个像和一个像.图3是用FD-

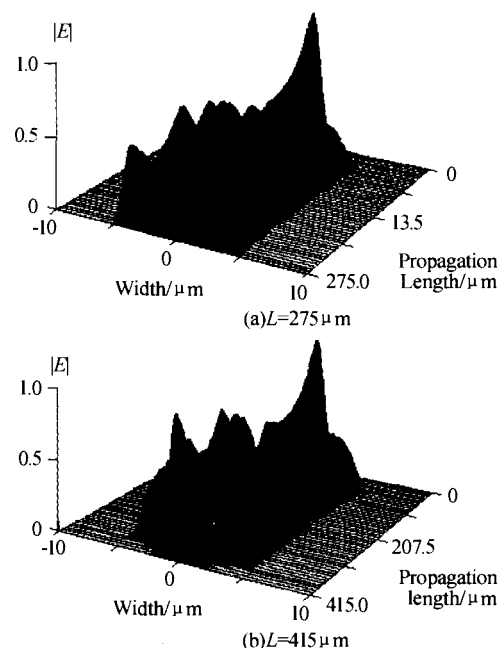


图3 用FD-BPM法模拟光波在不同长度的电吸收调制器波导中的传播

Fig. 3 FD-BPM simulation of EA operation for different waveguide length

BPM 法模拟波长为 860 nm 的高斯光束在电吸收调制器多模波导中的传播情况. 其中图 3(a)对应的是 L 为 275 μm 时波导输出端的光场横向分布情况;图 3(b)对应的是 L 为 415 μm 时波导输出端的光场横向分布情况.

实验时,直接把波长为 860 nm 的高斯光入射到电吸收调制器波导层的中心位置. 输出端光斑用带有显微镜镜头的 CCD 拍摄输出到计算机. 图 4 (a)、(b)分别是实验中观测到波导输出端相应的光斑分布情况. 从图 3 和图 4 可以看出,实验和模拟结果很好符合. 我们还对电吸收调制器进行了静态

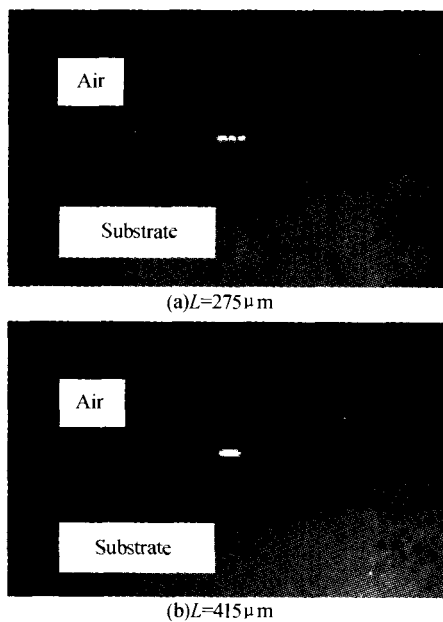


图 4 测量不同长度的多模波导输出端的近场光斑
Fig. 4 Imaged output of EA

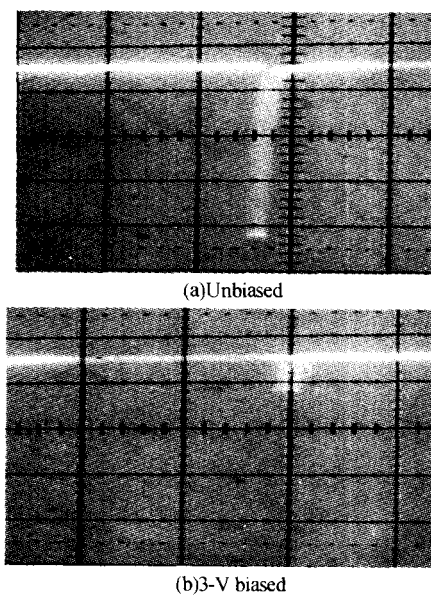


图 5 电吸收调制器的静态调制特性
Fig. 5 Intensity of output optical beam in the oscillograph

调制测试,如图 5. 这些结果表明本文设计的电吸收调制器已经实现了调制和分光功能.

3 结论

本文用 FD-BPM 法和 MPA 法分析了电吸收调制器和多模干涉分束器的光波传播特性,说明了调制器波导层厚度、波导宽度对光波传播特性的影响. 增加波导层厚度,调制器的光限制因子和消光比随之增加,调制器的驱动电压也随之增加;在波导宽度一定的情况下,选择不同的波导长度可以实现不同的分光效果,如本文中选取长度为 275 μm 的波导实现了 3 束分光. 制作了脊宽为 10 μm 的 GaAs/AlGaAs 多量子阱电吸收调制器,选择器件长度分别为 275 μm 和 415 μm ,实现了器件的调制和分光功能.

参考文献

- 1 Miller D A B, Chemla D S, Damen T C. Band-edge electroabsorption in quantum well structures: the quantum-confined Stark effect. *Phys Rev Lett*, 1984, **53** (22): 2173~2175
- 2 Scarmozzino R, Gopinath A, Pregla R, *et al.* Numerical techniques for modeling guidewave photonic device. *J Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6** (1): 150~162
- 3 Ulrich R. Light-propagation and imaging in planar waveguides. *Nouv Rev Optique*, 1975, **6**(5): 253~262
- 4 Thomas H W. Multiple Quantum Well (MQW) Waveguide Modulator. *J Lightwave Technol*, 1988, **6** (6): 743~757
- 5 Wang S Y, Lin S H. High speed III-V electrooptic waveguide modulators at $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. *J Lightwave Technol*, 1988, **6**(6): 758~771
- 6 傅思镜,童州森,刘叶新,等. 超高速行波电吸收调制器的 k 值设计方法. *光子学报*, 2004, **33**(7): 806~809
Fu S J, Tong Z S, Liu Y X, *et al.* *Acta Photonic Sinica*, 2004, **33**(7): 806~809
- 7 Ulrich R, Ankele G. Self-imaging in homogenous planar optical waveguides. *Appl Phys Lett*, 1975, **27**(6): 337~339
- 8 Soldano L B, Pennings E C M. Optical multi-mode interference devices based n self-imaging: principles and applications. *J Lightwave Technol*, 1995, **13** (4): 615~627
- 9 Besse P A, Bachmann M, Melchior H, *et al.* Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers. *J Lightwave Technol*, 1994, **12** (6): 1004~1009

Analysis of Electroabsorption Modulators and Multimode Interference Splitters

Liu Yexin, Chen Xiaowen, Xing Xiaobo, Wu Tianhong, Fu Sijing, Wen Jinhui, Lin Weizhu
*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Physics Science and Engineering College,
Sun Yat-Sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275*

Received date: 2004-10-19

Abstract Based on the finite-differential beam propagation method and guided-mode analysis, the wave propagation characteristics of a AlGaAs/GaAs MQW electroabsorption modulator and multimode interference optical splitter are investigated. A novel wave-guide electroabsorption modulator incorporated with function of optical splitter is proposed and numerical simulated and experimental tested. The study results show that a wave-guide electroabsorption modulator with properly designed wave-guide thickness and length possesses features of optical splitter.

Keywords Electroabsorption modulator; Multimode interference splitter; Finite difference beam propagation method; Guided-mode propagation analysis



Liu Yexin was born in November 1976 in Xingning City of Guangdong Province. He received Bachelor Degree from the Department of Physics, Sun Yat-sen (Zhongshan) University in 2000. He is now working for his doctor degree in the State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology of Sun Yat-sen (Zhongshan) University. His research interests are optical engineering including design, fabrication and test of optoelectronic devices.