

文章编号: 0253-2239(2005)10-1406-5

具有调制功能的多模干涉型 1×3 分束器*

刘叶新 陈晓文 邢晓波 吴添洪 傅思镜 文锦辉 林位株

(中山大学物理系光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘要: 提出了利用量子约束斯塔克(Stark)效应制作具有调制功能的多模干涉型 1×3 分束器的设计思想, 并详细分析了这种光分束器的工作原理。根据理论计算结果, 制作了具有调制功能的多模干涉型 1×3 分束器。分束器的脊型多模波导长度为 $275 \mu\text{m}$, 宽度为 $10 \mu\text{m}$, 波导层采用 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构, 厚度约为 $0.2 \mu\text{m}$; 电极采用共面波导结构。首先用有限差分光束传播法模拟了器件的光波传播特性, 然后进行了初步的实验验证。理论模拟和实验结果表明, 波长为 $0.86 \mu\text{m}$ 的高斯光束对称入射到多模波导的中心, 器件实现了 3 分束功能; 施加 3 V 的直流偏压, 器件的调制深度达 90% 以上、调制带宽为 2 GHz, 实现了电吸收调制功能。

关键词: 多模干涉; 量子约束斯塔克效应; 导模传输分析; 有限差分光束传播法

中图分类号: TN814 文献标识码: A

Multimode Interference 1×3 Splitter Incorporated With Functions of Electroabsorption Modulator

Liu Yexin Chen Xiaowen Xing Xiaobo Wu Tianhong Fu Sijing

Wen Jinhui Lin Weizhu

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Department Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

Abstract: Based on the quantum-confined Stark effect, a novel multimode interference 1×3 splitter incorporated with functions of electroabsorption modulator is proposed. The operating principle of the devices is analyzed in detail. On the basis of predefined ridge waveguide parameters which are length of $275 \mu\text{m}$, width of $10 \mu\text{m}$ and thickness of $0.2 \mu\text{m}$, a GaAs/AlGaAs multiple quantum well multimode interference 1×3 splitter is fabricated, coplanar waveguide structure is applied for electrode. The wave propagation characteristics of the splitter are numerically simulated by the finite difference beam propagation method and experimentally investigated. The static modulation characteristic of the device is also tested. When the applied direct current voltage is 3 V, Gauss beam with wavelength of $0.86 \mu\text{m}$ is symmetrically incident to the center of multimode waveguide, electroabsorption modulation depth is upto 90%, and bandwidth is 2 GHz.

Key words: multimode interference; quantum-confined Stark effect; guided-mode propagation analysis; finite difference beam propagation method

1 引 言

光分束器和光调制器是光通信系统与光信息处理系统中必不可少的器件, 而由光分束器和光调制器构成的点对点 and 点对多点连接的多路光调制是光电集成电路中用于信号发送的重要组成部分。光分

束器的主要指标有插入损耗和各输出端的功率均匀度等, 但在光电集成回路中, 器件的插入损耗相对重要; 光调制器的主要指标有消光比、插入损耗、驱动电压以及调制带宽等。它们共同的特点都是要求有低插入损耗。在多路光调制回路中, 如果采用耦合

* 国家自然科学基金(60178020, 10274107)和广东省自然科学基金(011204, 2002B11601)资助课题。

作者简介: 刘叶新(1976~), 男, 广东省兴宁市人, 中山大学光电材料与技术国家重点实验室光学工程博士研究生, 主要从事超快信息光学与光通信技术研究。E-mail: amsureliu@163.com

收稿日期: 2004-10-25; 收到修改稿日期: 2005-05-13

的方式把调制器和光分束器连接起来,由于器件之间的光耦合会导致损耗的增加,器件的整体性能下降,不利于集成。利用波导再生技术,把分束器和调制器集成在一个基片上,解决了光分束器和调制器之间的耦合问题^[1]。但这种方法工艺复杂、费时,而且费用高。也有人直接在弱限制的多模干涉(MMI)型分束器的波导输出端制作电吸收调制器^[2]。这种方法可以克服波导再生技术的缺点,但整个器件长度还是比较长。

为了进一步获得结构紧凑、性能良好的集成光器件,需要适当的光分束单元,直接完成对光的分束和调制功能。本文提出了利用量子约束斯塔克(Stark)效应(QCSE)^[3]制作具有调制功能的多模干涉型光分束器的设想。用导模传输分析法^[4]和有限差分光束传播法(FD-BPM)^[5]对 GaAs/AlGaAs 多量子阱波导多模干涉型光分束器的光传播特性进行了理论分析和模拟。

2 工作原理与器件制作

本文提出的具有调制功能的强限制多模干涉型光分束器的器件结构如图 1 所示。这种光分束器的突出特点是,直接的多模干涉区制作电吸收调制器以实现对入射光的调制和分束功能,并且采用共面波导的电极结构。

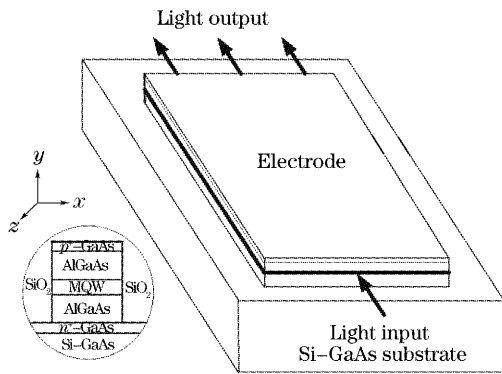


图 1 光分束器/电吸收调制器示意图

Fig. 1 Perspective view of splitter/EA modulator

2.1 多模干涉分束器

自映像效应^[6]是多模波导的一个重要特性,利用多模波导自映像效应制成的多模干涉器具有插入损耗小、结构紧凑、工艺简单、制作容差性好等优点^[7]。

在多模波导区,被激励起来的不同模式之间(一般大于 3 个模式)的传播速度不同。随着光波的传播,传播常量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,沿着波导的传播方向,

随传播距离周期地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导模分析法。它简单明了,可以清晰地给出物理意义;有限差分光束传播法则可以模拟在不同工作条件下的光场在多模波导中传播情况。

为了减小器件尺寸,通常采用入射光位于多模波导中心的对称输入。由导模传输分析法给出了获得 N 重像的波导宽度 p 和长度 L 的关系:

$$L = \frac{p}{N} \left(\frac{3L_\pi}{4} \right), \tag{1}$$

其中 p 和 N 是互质的整数。 L_π 定义为两个最低阶模的拍长:

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0}, \tag{2}$$

其中 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_e 是考虑了古斯-汉欣位移后的等效多模干涉区的宽度。对于 TE 模,可以采用基模的有效等效宽度来代替 W_e ^[8]:

$$W_e \approx W + \frac{\lambda_0}{\pi \sqrt{n_r^2 - n_c^2}}, \tag{3}$$

其中 n_c 为限制层的折射率, W 为波导的几何宽度。

从(2)式和(3)式可以看出,获得 N 重像的波导长度 L 与考虑了古斯-汉欣位移后的等效多模干涉区的宽度 W_e 的平方成正比关系。此外,用传输线理论计算了器件长度为 275 μm 时,脊型波导宽度对器件的 S_{21} 的影响,如图 2 所示。从图中可以看出,随着波导宽度的增加, S_{21} 随调制频率增加而迅速减小。若分束器的波导宽度为 10 μm ,则调制器带宽约为 6 GHz。因此, W 是影响器件长度和调制带宽的一个关键参量。

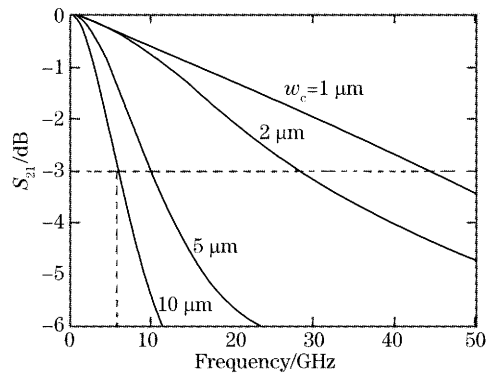


图 2 不同的脊型波导宽度对 S_{21} 参量的影响

Fig. 2 S_{21} as a function of frequency for different ridge waveguide width

对于用 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料制作的多模干涉型分束器,所制作的波导是脊型波导,波导侧壁外(如图 1 所示)生长 SiO₂ 介质膜,实现脊型波导侧壁内外大的折射率变化,满足了强限制性波导的要求。当考虑脊型波导的有效宽度时,只需考虑脊型波导两侧 SiO₂ 的影响。设波导的等效折射 $n_r = 3.5$, SiO₂ 的折射率 $n_c = 1.5$, 脊型波导的宽度 $W = 10 \mu\text{m}$, 入射光波长为 $0.86 \mu\text{m}$ 。根据(1)式~(3)式可计算出波导长度 $L = 275 \mu\text{m}$ 时可实现 1×3 的光分束。

2.2 电吸收调制器

电吸收效应是电吸收调制器的基本工作原理,它定义为存在外电场时半导体材料吸收带边发生红移。在量子阱材料中的电致吸收带边红移效应被称为量子约束斯塔克效应。由于在室温下量子阱材料的激子共振,材料的吸收带边比体材料的吸收带边更尖锐,在反向偏置电场作用下移动更快。这种性质使多量子阱(MQW)器件更易获得低驱动电压、低插入损耗和高消光比。

对于波导长度为 L 的调制器,其消光比 η_{ER} 定义为^[9]

$$\eta_{\text{ER}} = 4.343 \cdot \Gamma \cdot \Delta\alpha(V) \cdot L, \quad (4)$$

其中 Γ 为限制因子,定义为导波模式被限制在波导层的程度; $\Delta\alpha(V)$ 是与外加电场有关的吸收系数的变化。只要适当设计量子阱材料组分和结构,使其基态跃迁能量所对应的光波 λ_0 略小于工作光波长 λ , 以降低量子阱波导在未加电场时对入射光的吸收损耗。但 λ_0 与 λ 之间不能相差太大,一般相差几十毫电子伏。否则需要增加调制电压来实现更大的吸收带边红移,并且量子阱材料的激子吸收峰强度会随电场的增加降低。

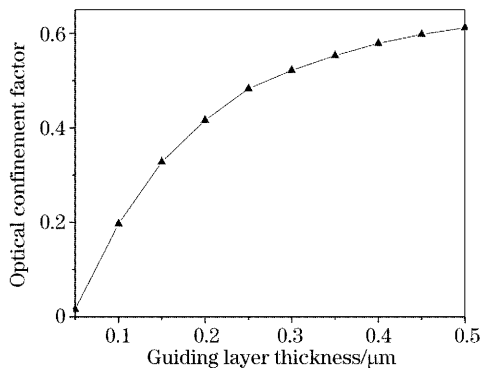


图 3 不同导波层厚度对光限制因子的影响

Fig. 3 Optical confinement factor for different guiding layer thickness

根据(4)式,消光比除了与 $\Delta\alpha(V)$ 有关外,还与 Γ 有关。图 3 给出了 Γ 随波导层厚度(多量子阱周期)增加的变化关系。随着多量子阱周期的增加, Γ 随之增大,消光比也增加。在相同的调制电压下,多量子阱周期的增加,电场强度相应地降低,使得 $\Delta\alpha(V)$ 也相应减小;而多量子阱周期较小时,虽然可以减小调制电压,但同时 Γ 也减小了,从而使消光比降低。因此,要根据设计要求选取适当的多量子阱周期数。

2.3 器件制作

根据以上分析,制作了如图 1 所示的具有调制功能的多模干涉器 1×3 分束器。所用的 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料是在分子束外延(MBE)设备生长的,采用 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构。外延层为 p-i-n 结构,在 Si-GaAs 衬底上依次外延生长: 50nm n-GaAs 接触层,掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; $0.5 \mu\text{m}$ n-Al_{0.32}Ga_{0.68}As 第二下限制层,浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; $0.3 \mu\text{m}$ n-Al_{0.32}Ga_{0.68}As 第一下限制层,掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; $0.1 \mu\text{m}$ Al_{0.32}Ga_{0.68}As 本征层; 10 个周期的 GaAs/8Al_{0.32}Ga_{0.68}As 多量子阱波导层,阱宽 8nm , 垒宽 10nm ; $0.1 \mu\text{m}$ Al_{0.32}Ga_{0.68}As 本征层; $0.3 \mu\text{m}$ p-Al_{0.32}Ga_{0.68}As 第一上限制层,掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; $0.5 \mu\text{m}$ n-Al_{0.32}Ga_{0.68}As 第二上限制层,掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; 50nm p⁺-GaAs 接触层,掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。

首先是制作具有强限制性的脊型波导。将外延片深度刻蚀至 n⁺-GaAs 接触层,然后用 SiO₂ 介质膜把脊型波导保护起来。波导宽度是为 $10 \mu\text{m}$ 、脊高为 $2 \mu\text{m}$, 长度选择为 $275 \mu\text{m}$ 。然后分别在 p 重掺杂的 GaAs 接触层和 n 掺杂的 GaAs 接触层上蒸上 Cr-Au 和 Au-Ge-Ni 制作电极。

3 理论模拟和实验测试结果

用有限差分光束传播法模拟了波长为 $0.86 \mu\text{m}$ 的 TE 偏振高斯光束在多模干涉型 1×3 分束器中的传播情况,如图 4 所示。从图中可以看出,在波导长度为 $137.5 \mu\text{m}$ 和 $275 \mu\text{m}$ 时可以实现器件的三分束。我们还用有限差分光束传播法模拟了波导输出端光强随波导折射率变化而变化的关系,如图 5 所示。从图中可以看出,即使波导折射率变化 0.01 , 输出端的光强变化也小于 0.3dB 。当入射光能量小于量子阱材料吸收带隙十几毫电子伏时,电致吸收引起的折射率变化在 10^{-3} 数量级^[10], 因此,对于长度为 $275 \mu\text{m}$ 的器件,调制时引起的折射

率变化对输出端光束强度及光束比的影响很小。

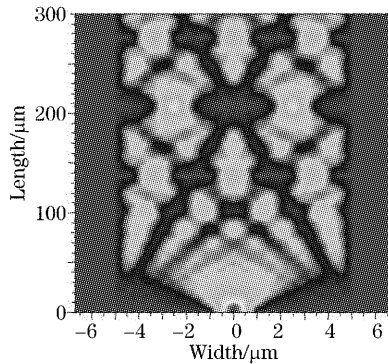


图 4 有限差分光束传播法模拟光在多模波导中的传播情况

Fig. 4 Simulation of MMI splitter operation by finite difference-beam propagation method

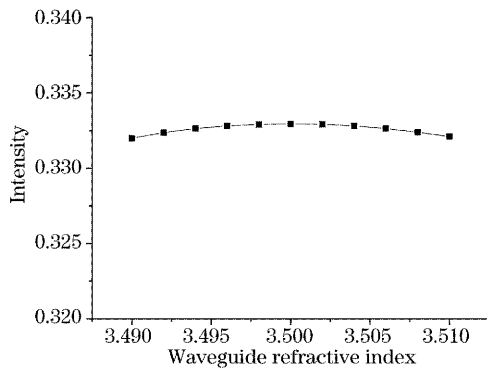


图 5 波导折射率的微小变化对波导输出端光强的影响
Fig. 5 Light intensity at the output waveguides versus the deviation of waveguide refractive index

在实验中,把波长为 $0.86 \mu\text{m}$ 、功率为 $5 \mu\text{W}$ 的激光脉冲入射到分束器波导层的中心位置^[11]。输出端的光斑用带显微镜头的 CCD 记录输出到计算机,同时检测了输出光斑的光强分布。图 6 给出了器件输出端的显微红外照片,插图为三个输出光斑的光强分布。从图中可以看出,三束光的光强分布基本一样,说明此器件具有很好的分束比。为了验证器件的调制功能,在器件上施加了 3 V 的直流偏压,并把其中一束光引出,用光电二极管把光信号转换成电信号输入到示波器中,如图 7 所示。其中左图为未加偏压时的电信号强度,右图为在 3 V 直流偏压下的电信号强度。示波器的灵敏度为 0.2 V/div ,扫描速度为 1 ms/div 。根据图 7 结果可以算出器件的调制深度达 90% 以上。图 6 和图 7 的实验结果显示,这种多模干涉型分束器实现了对光的调制和 3 分束功能,验证了理论预期结果。还初步测试了器件的 3 dB 带宽为 2 GHz ,低于理论预

期的调制带宽 6 GHz ,其主要原因可能是 n^+ 掺杂外延层的高微波损耗以及阻抗不匹配等所致。

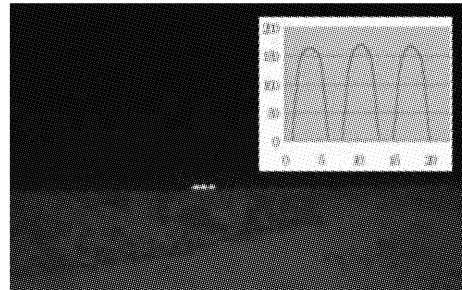


图 6 光分束器输出端的红外显微照片。

插图为 3 束光的光强分布

Fig. 6 Imaged output of MMI splitter. Insert is the intensity distribution of output beams

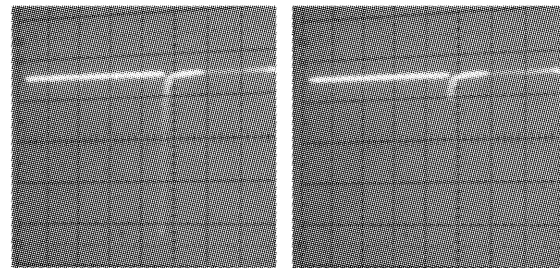


图 7 分束器的调制效应

Fig. 7 Modulation effect of the splitter

4 结 论

介绍了具有调制功能的多模干涉型光分束器的工作原理,并用有限差分光束传播法分析了入射光场在 GaAs/AlGaAs 多量子阱多模干涉型 1×3 光分束器脊型波导中的传播情况,说明了适当设计多模干涉型分束器脊型波导结构,宽度与长度,可以实现光分束和电吸收调制功能。波导的厚度与调制性能密切相关,增加波导层厚度,光限制因子和消光比随之增加,但调制的驱动电压也随之增加。实验测试结果表明,我们制作的多模干涉型光分束器实现了调制和光分束功能,验证了理论模拟结果,对发展这一新型光电集成器件有参考意义。

参 考 文 献

- 1 Zamkotsian F, Kenji Sato, Hiroshi Okamoto *et al.*. Monolithic integration of MQW modulators on an optical multiplexer on InP for 100 Gb/s transmission[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14** (10): 2344~2352
- 2 Lorna J H, Tristan J T. Monolithic integration of $1.3\text{-}\mu\text{m}$ Stark-Ladder electroabsorption waveguide modulators with multimode-interference splitters[J]. *Photonics Technol. Lett.*, 2000, **12** (6): 657~659

- 3 Miller D A B, Chemla D S, Damen T C. Band-edge electroabsorption in quantum well structures: the quantum-confined Stark effect[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(22): 2173~2175
- 4 Ulrich R. Light-propagation and imaging in planar waveguides [J]. *Nouv. Rev. Optique*, 1975, **6**(5): 253~262
- 5 Scarmozzino R, Gopinath A, Pregla R *et al.*. Numerical techniques for modeling guidewave photonic device [J]. *J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(1): 150~162
- 6 Ulrich R, Ankele G. Self-imaging in homogenous planar optical waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**(6): 337~339
- 7 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Analysis of general self-imaging position in multimode interference couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 759~762 (in Chinese)
孙一翎,江晓清,王明华.多模干涉耦合器一般成像位置分析[J].
光学学报, 2004, **24**(6): 759~762
- 8 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Zhang Xiaofeng *et al.*. Modeling of multimode interference Mach-Zehnder interferometer optical switches[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 367~370 (in Chinese)
魏红振,余金中,张小峰等.多模干涉马赫-曾德尔光开关模型 [J]. 光学学报, 2001, **21**(3): 367~370
- 9 Thomas H W. Multiple quantum well (MQW) waveguide modulator[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 743~757
- 10 Joseph S W, David A B, Daniel S C. Quadric electro-optic effect due to the quantum-confined Stark effect in quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(13): 842~844
- 11 Wei Rong, Wang Yuzhu. Telescope system used to the single mode fiber coupling of the laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(8): 687~690 (in Chinese)
魏 荣,王育竹.望远镜准直系统应用于激光的单模光纤耦合 [J]. 中国激光, 2003, **30**(8): 687~690