

多模干涉型 GaAs 光功分器的研制*

杨建义 孙一翎** 周 强 王明华

(浙江大学信息与电子工程系, 杭州 310027)

李 江 王义周

(河北半导体研究所, 石家庄 050051)

摘 要 采用导模传输分析法设计了多模干涉型 1×4 光功分器。根据所确定的器件结构参数, 结合器件设计和制作过程中可能遇到的因素, 详细分析了器件中自映像效应多模波导的宽度和长度、波导的折射率等结构参数对器件性能的影响。进行了多模干涉型 GaAs 1×4 光功分器的制作和测试。测试结果表明, 所研制的器件实现了 1×4 光功分器功能。针对实验过程和测试结果中遇到的问题进行了讨论, 并提出了进一步完善器件性能的方法。

关键词 集成光学, 多模干涉, 光功分器。

1 引 言

光功分器是光通信系统与光信息处理系统中的关键器件, 也是构成其他光器件的重要组成部分。光功分器包括有源型和无源型两类。从应用上说, 无源型将是光功分器的主要类型。传统的无源型光功分器是通过 1×2 的 3 dB 耦合器的级连而成。这种结构对于器件的集成显然是不利的, 而且级连还可能引入器件性能的下降。要获得紧凑型高性能的光功分器, 要求有合适的耦合器结构, 直接完成 $1 \times N$ 或 $N \times N$ 的耦合。人们在光纤通信技术中通过多根光纤拧成一股, 拉锥熔接, 使得光纤间彼此光场耦合, 实现了所需的耦合要求。但这种结构主要适用于光纤通信中的特殊需要, 不适于平面波导型器件。人们也曾采用多根相距很近且互相平行的光波导构成定向耦合阵列, 实现一个波导至多根波导间的光功率耦合。这种结构有明显的应用局限性, 对器件的结构设计和制作工艺也提出了相当高的要求。从目前的研究成果上看, 星型耦合器和多模干涉耦合器是最佳的光功分器结构。

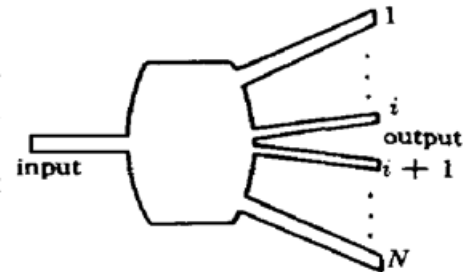


Fig. 1 Schematic diagram of star coupler

如图 1 所示的星型耦合器, 基于的工作原理是 Rotman 镜^[1], Zirngibl 等人^[2]据此设计了 1×16 光功分器。采用星型

* 浙江省自然科学基金资助项目(695048)和浙江大学曹光彪高科技发展基金资助项目。

** 现在通信地址: 深圳大学应用物理系, 深圳 518060。

收稿日期: 1998-04-27; 收到修改稿日期: 1998-07-02

耦合器的光功分器缺点是，耦合效率低、光损耗较大、输出功率分配不均衡等。Tabiani 和 Kavehrad^[3]在理论上作了进一步的改进，分析获得了 100% 的耦合效率。

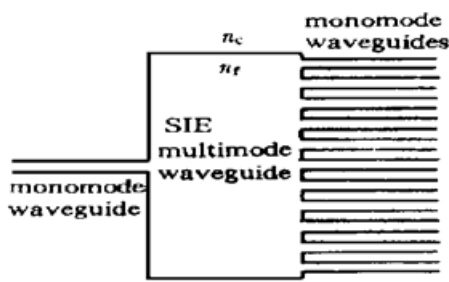
多模干涉耦合器(MMI coupler)是基于多模波导中的自映像效应(SIE)^[4]。这种耦合器的特点是：器件结构紧凑，制作工艺简单，工艺容差性好，便于集成等，应用前景非常广泛。

本文便是采用多模干涉耦合器，在 GaAs/AgAlAs 单异质结外延材料上设计和制作 1×4 光功分器。

2 器件的基本原理

2.1 多模干涉耦合器的工作原理

图 2 所示为一个简单的多模干涉耦合器。图中 n_r 为波导区折射率， n_c 为限制区折射率。



它的关键结构是一个能够传输多个模式的波导，波导的侧壁两侧存在大的折射率差用以支持产生自映像效应。这个多模波导要求能够支持 3 个以上的模式。本文称这种多模波导的自映像效应多模波导。由一个自映像效应多模波导和两组分别用于输入输出的单模波导便构成了多模干涉耦合器。自映像效应可以简单地描述为：在自映像效应多模波导中，沿着波导的传播方向，将周期性地自复制出输入场的单像或多像。

Fig. 2 Schematic diagram of MMI coupler

文献已报道了几种分析多模干涉耦合器的方法，如全模式传输分析法、几何光学法、混合法和光束传输法等。本文采用导模传输分析法^[5]。这种方法和全模式传输法的主要区别在于它不考虑辐射模的影响，把输入场看成所有导模的组合。这可以使分析变得简单，而实践证明它又提供了足够精度的分析结果。因此，导模传输分析法是一种有效的分析方法。

2.2 多模干涉型 1×4 光功分器

基于自映像效应多模波导中的对称干涉限制机理，本文设计了如图 3 所示的多模干涉型 1×4 光功分器。该功分器由一个宽为 w 的单模输入波导、一个宽为 W 与长为 L 的矩形多模波导和四个宽为 w 的单模输出波导组成。由对称干涉限制的要求，输入波导置于多模波导输出端的中心。分析可得，为实现 1×4 的光功率分配，自映像效应多模波导的长度可取为

$$L = n_r W^2 / 4\lambda_0 \tag{1}$$

图 4 给出了 1×4 光功分器的模拟。

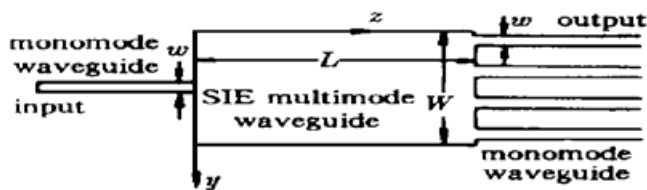


Fig. 3 Schematic diagram of optical power splitter

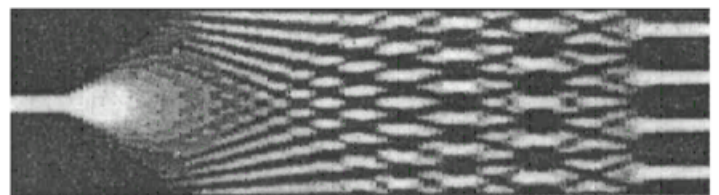


Fig. 4 Simulation of MMI 1×4 optical power splitter

3 器件的设计

3.1 基本参数

本文采用的 GaAs/GaAlAs 单异质结外延材料结构如图 5(a) 所示，GaAs 波导层厚度为

1.5 μm, GaAlAs 下限制层厚度为 1.7 μm。

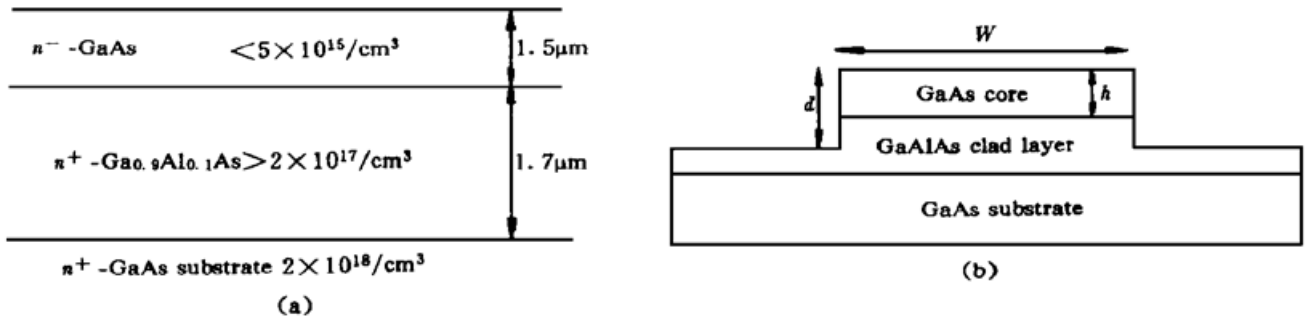


Fig. 5 (a) The structure of epitaxial material, (b) The cross section of GaAs MMI waveguide

根据自映像效应多模波导的基本要求，所制作的波导层必须呈现条载状，即 $d > h$ ，如图 5(b) 所示，使 GaAs 波导层侧壁外为空气，实现波导侧壁内外大的折射率变化。相对于空气来说，GaAs 和 GaAlAs 间的折射率差别不大，沿着纵向，波导层的光场分布几乎完全分布于外延材料的波导中，所以在设计计算中，可以将三维截面转化为二维分布，即空气-波导层-空气。波导层中的折射率可以近似取 GaAs 的折射率值。工作光波波长为 1.3 μm。考虑支持足够多的导模以保证自映像效应和低的器件插入损耗，自映像效应多模波导的宽度取为 40 μm。由(1)式可得，自映像效应多模波导的长度须为 1053 μm。输入和输出波导宽度均设计为 2.5 μm。输入波导设置于自映像效应多模波导输入端的中间，以激励其中的对称模式，形成对称限制。输出波导设计在对输出端左右偏离多模波导对称轴的 $W/8$ 和 $3W/8$ 处，即左右偏离 5 μm 和 15 μm，以获得 4 个功率输出。

3.2 特性分析

在多模干涉型光功分器中，自映像效应多模波导是关键结构。根据导模传输法的分析，作者设计选定了器件的各参数。自映像效应多模波导的宽度 W 和长度 L 是对器件性能影响最为关键参数。众所周知，器件的插入损耗 α 为

$$\alpha = 10 \lg (P_0/P_i) \tag{2}$$

式中 P_0 和 P_i 分别为器件输入和输出(4 个输出端)的总功率。器件的功率离散 β 定义为

$$\beta = 10 \lg (P_{\min}/P_{\max}) \tag{3}$$

式中 P_{\max} 和 P_{\min} 分别为 4 个输出端中的最大和最小功率输出。光功率的功率离散反映了功分器光功率分配的均匀程度。与器件的插入损耗相比，器件功率离散是更为重要的参数。

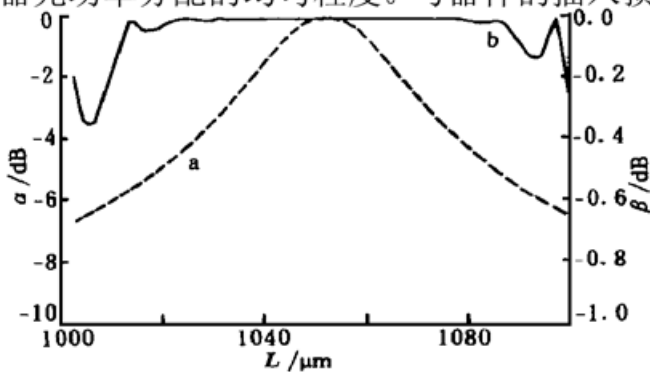


Fig. 6 When $W = 40 \mu\text{m}$, the influence of L on insertion loss (a) and power imbalance (b)

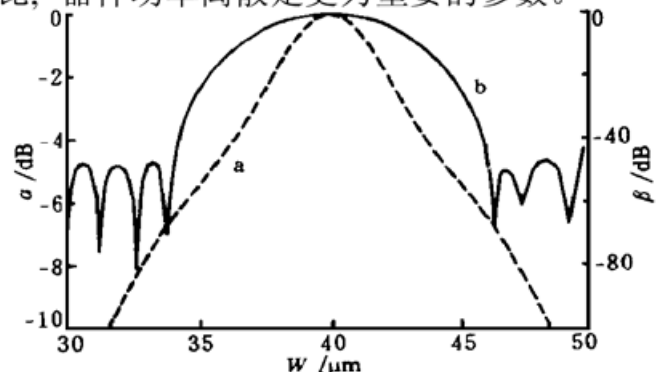


Fig. 7 When $L = 1053 \mu\text{m}$, the influence of W on insertion loss (a) and power imbalance (b)

根据前面所取的参数值,图6和图7分别给出了 W 和 L 的变化对器件插入损耗和器件功率离散的影响。由图中可见,器件的两个特性参量随 W 的变化较 L 要严重。这与 W 的相对值小有一定关系。这也表明,在工艺中,对 W 的控制有更高的要求。从图中也看到,插入损耗较功率离散要来得敏感。

在图6和图7中, W 和 L 的变化范围是相当大的。在集成光学工艺中,通常器件的 W 和 L 的制作精度可以控制在 $1\ \mu\text{m}$ 以下。根据图6和图7的分析结果,相对来说,器件对设计和工艺的精度要求不算太高,因而十分有利于工业化制造。

波导层折射率的变化对器件特性的影响如图8所示。由图中可见,折射率在相当大的范

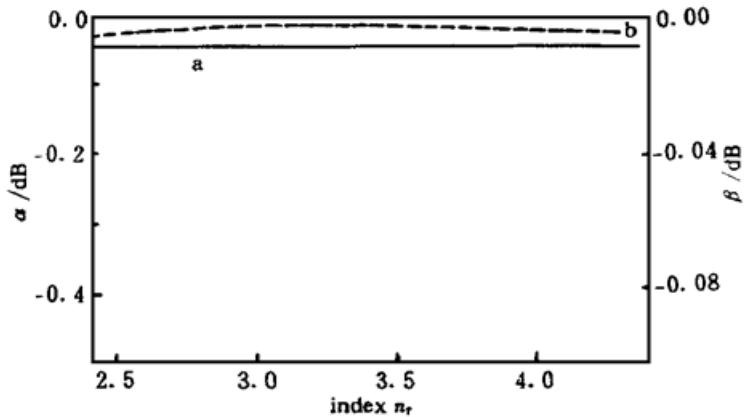


Fig. 8 When $L = 1053\ \mu\text{m}$ and $W = 40\ \mu\text{m}$, the influence of n_r on insertion loss (a) and power imbalance (b)

围内变化,但对器件的性能影响却极小。这也是因为,折射率的变化最终可以等效为 W 的变化。由于 W 此时取值较大,这种由折射率引起的等效 W 变化极小。因此,在器件设计中,折射率取值的精度对器件性能影响不大。

器件中,TE模和TM模传输特性,同折射率变化的影响一样,其间的差异可以等效为 W 的变化。理论分析表明,同样由于 W 的取值较大,器件中TE模和TM模的特性差异所引起的等效 W 的变化也是极小的。结合图7中 W 的变化对插入损耗和

功率离散的影响特性,可以知道,多模干涉型光功分器是一种与极化无关器件。

4 器件的制作和测试

4.1 外延材料

在综合考虑器件间的兼容性和各种外延材料的损耗与波导结构性能之间关系的基础上,本研究选择单异质结GaAs/GaAlAs外延材料研制 1×4 光功分器。外延材料用分子束外延生长,其结构如图5所示。材料生长机理表明,若过分降低GaAs波导层的掺杂浓度,外延层表面会出现耗尽,所以将GaAs波导层的载流子浓度放宽至 $5\times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 。对GaAlAs下层限制层,由于Al的活泼性,分子束外延生长会产生较高的深能级浓度,当GaAlAs中Al组分为0.08时估计已有 $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 的浓度。为此,在设计材料结构时直接采用高掺杂层作为限制层。这在一定程度上导致器件损耗的增加,但对材料的生长却带来了一定的方便。

4.2 器件的制作

本文研制的GaAs光功分器只需光刻一次,光刻后的正胶掩膜经刻蚀后就得光波导结构。由于器件中的单模波导部位的宽度仅为 $2.5\ \mu\text{m}$,对光刻精度提出了较高的要求。

多模干涉结构器件要求在其耦合区的边界折射率突变,即波导侧壁具有较高的垂直度,所以器件必须采用干法刻蚀,并且按设计要求,刻蚀深度必须大于 $1.5\ \mu\text{m}$ 。在本实验中,刻蚀设备采用美国产ICP790。刻蚀结果的芯片截面扫描电子显微镜图如图9所示。可以看出,图形边缘及垂直度基本上达到了预定的要求。

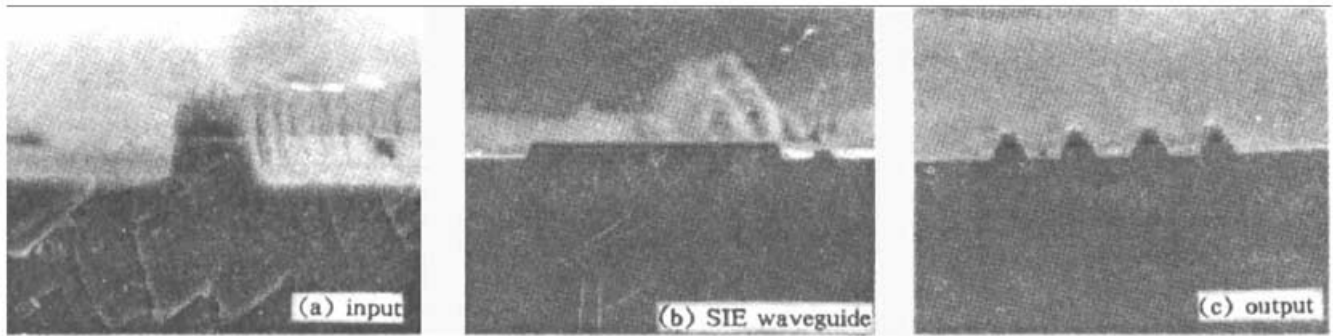


Fig. 9 The cross section after dry etching

4.3 器件的测试

器件的测试系统如图 10 所示。测试用的光源为 $1.3\ \mu\text{m}$ 波长的 He-Ne 激光器。经红外摄像获得器件输出成像后的视频信号, 由视频传送至 PC 机的视频采集卡, 由 PC 机存储器件输出成像, 并进行数据处理。图 11~ 图 13 的(a) 给出了本文所研制的芯片上各支光功分器的输出成像结果。

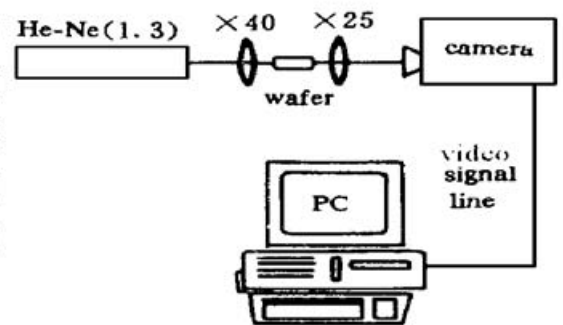


Fig. 10 Measurement system

5 结果与讨论

从测试结果来看, 器件实现了 1×4 光功分器功能。图 11(a) 所示便是较好的一例。图 11 (b) 是根据图 11(a) 4 个输出光斑, 取其局部进行数据处理后所得的光功率分布情况。在实验中, 器件的 4 个输出光斑中心间的间隔仅为 $10\ \mu\text{m}$, 所以直接采用光功率计测量各输出端口的输出光功率是困难的。而计算机采集下来的图像, 由于存在背景噪声, 再加上输出定位的困难, 也难以由此获得 4 个输出端口的输出光功率。为此, 作者取所采集图像中通过 4 个输出亮点的某一扫描线作为 4 个输出端输出光功率的相对值。测试所得图像为各波导输出光强的反映, 所以所采用的方法能够反映器件 4 个输出端的相对输出情况。图 11(c) 给出了采用此方法所得的输出对比。根据这一结果, 去除所测得结果的背景噪声, 可得其中的 P_{\min} 和 P_{\max} 分别为 50 和 60(相对光强), 由此而得所研制器件的输出功率离散为 $-0.8\ \text{dB}$ 。

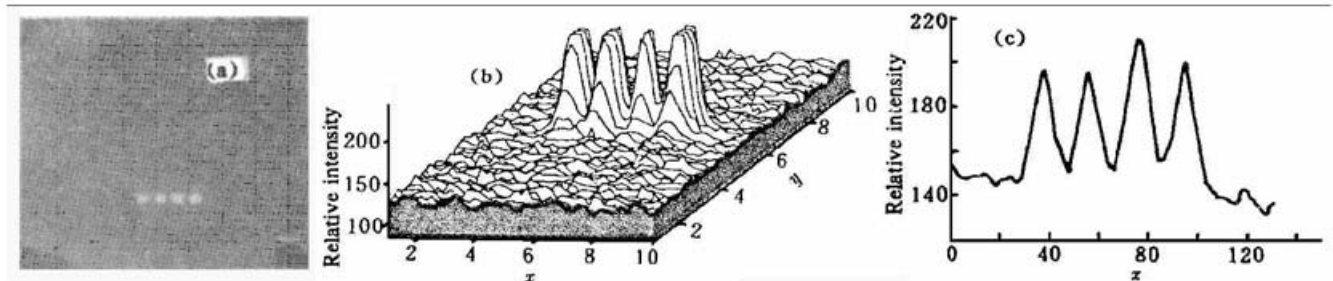


Fig. 11 Measuring and analyzing results of the first sample. (a) Output figure of 1×4 optical power splitter; (b) Related power distribution; (c) Relative power distribution of the four outputs

从整体来看, 器件输出沿未达到完全均衡, 图 11 所示器件便存在一定的输出不均衡。图 12 和图 13 给出了更为明显的两例(图中坐标均为场成像情况下的相对单位)。根据如图所示的测试结果和数据分析结果, 可以发现, 这种输出不均衡是不对称的, 而本文所研制的器件是对称结构。由此可以认为, 器件中所存在的输出不均衡主要来源于制作工艺的不完善。由

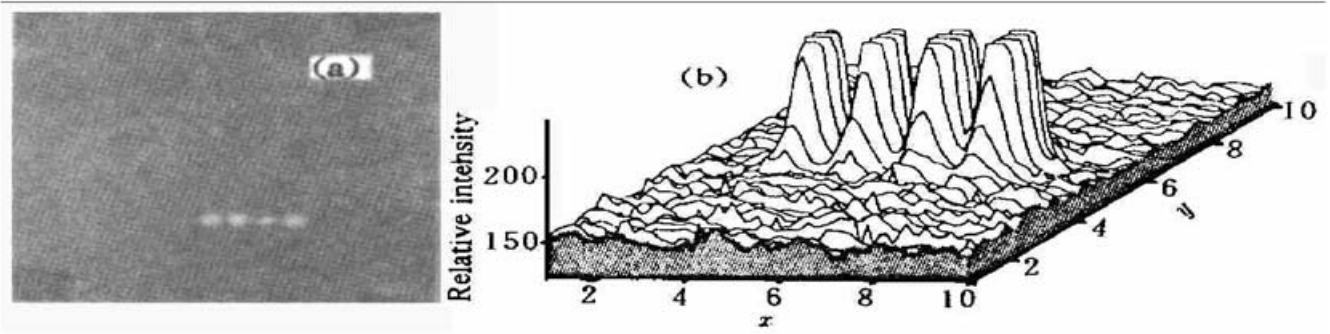


Fig. 12 Measuring and analyzing results of the second sample: (a) Output figure of 1×4 optical power splitter; (b) Related power distribution

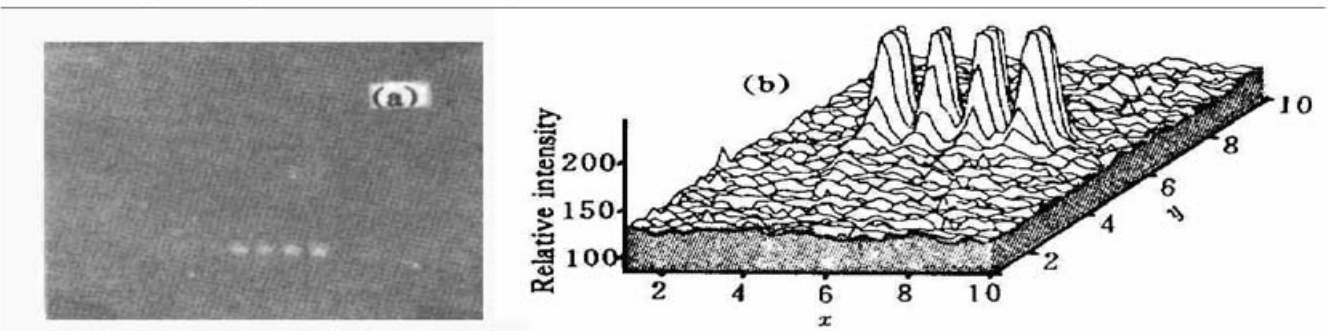


Fig. 13 Measuring and analyzing results of the third sample: (a) Output figure of 1×4 optical power splitter; (b) Related power distribution

光刻后的图案与刻蚀后的图案，可以理解存在这一不均衡现象。虽然说多模干涉型器件对制作工艺中的容差较大，但对刻蚀器件线条的精细度还是有着一定的要求的。精细度欠佳，与侧壁倾斜一样，将导致自映像效应多模波导的镜面效果损失。这种不均衡将在进一步的工作中予以改善。

要使器件性能得到进一步的改善，在器件的制作工艺须作如下改进：

1) 进一步提高光刻质量。

2) 继续研究干法刻蚀工艺，保证波导侧壁的完全垂直，进而保证自映像效应多模波导中的自映像效应。从图 9 所示的干法刻蚀后的波导截面图来看，波导侧壁存在一定倾斜。这需要进一步的实验来完善。

3) 掩膜与刻蚀条件相适应。从干法刻蚀的结果来看，现有的光刻胶掩膜不能够很好地完成刻蚀过程中的波导掩膜要求，与不够完善的光刻图案一起，导致了刻蚀结果不够理想。需要改用金属或其它可行的材料作为掩膜(如 Au)，并通过实验选择更为优良的掩膜材料。

总 结 本文所作的有关多模干涉型光功分器的研究是针对多模干涉耦合器更为广泛的无源应用而进行的。集成光学无源器件是光通信器件中非常重要的一个大类。从光通信所需的集成光学无源器件来考虑，在波导技术已经成熟的今天，需要重点发展的无源型集成光学波导器件主要包括了光波导复用器/解复用器、光功分器和光选路器等。作者认为，多模干涉耦合器有着巨大应用潜力，可以被广泛地用于设计研制各种无源器件。本文设计并研制了多模干涉型 1×4 的光功分器。进一步的研究工作是工艺的完善和稳定，器件输出端的分离及光纤耦合，并在此基础上进行 1×8 以至更多路的功分器研制。由这种多模干涉型的多路光功分器，配合多模干涉耦合器和波导相位调制器，可以设计出结构紧凑的光选路器。目前光波导复用

器/解复用器的结构主要是阵列波导光栅型波分复用/解复用器和罗兰(Roland)圆光栅型光波导波分复用/解复用器,其中,前者便可以利用多模干涉型光功分器与阵列波导光栅的结合实现。由于双端输入输出,可以完成 $N \times N$ 路的波分与路由,这种波导复用/解复用器的应用功能是非常强的。因此,基于多模干涉耦合器与多模干涉型光功分器的重要应用价值,对多模干涉型器件的研究是非常有必要的。

感谢北京中国科学院物理研究所周均铭老师和黄绮老师在 GaAs/GaAlAs 分子束外延材料设计和生长上所进行的实验和建议。

参 考 文 献

- [1] Dragone C. Efficient $N \times N$ star couplers using Fourier optics. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(3) : 479~ 489
- [2] Zirngibl M, Dragone C, Joyner C *et al.*. Efficient 1×16 optical power splitter based on InP. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(13) : 1212~ 1213
- [3] Tabiani M, Kavehrad M. Theory of an efficient $N \times N$ passive optical star coupler. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(4) : 448~ 455
- [4] Ulrich R, Ankele G. Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**(6) : 337~ 339
- [5] Ulrich R. Light-propagation and imaging in planar optical waveguides. *Nouv. Rev. Optique*, 1975, **6**(5) : 253~ 262

Study and Fabrication of MMI GaAs Optical Power Splitter

Yang Jianyi Sun Yilin Zhou Qiang Wang Minghua

(Department Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Li Jiang Wang Yizhou

(Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051)

(Received 27 April 1998; revised 2 July 1998)

Abstract A 1×4 multimode interference (MMI) optical power splitter is designed by means of guided-mode propagation analysis. Considering the possible factors which would influence the properties of the device in the procedure of designing and fabricating, the influence of the parameters was analyzed, such as the width, the length and the index of waveguide, on the performance of the device. Then the MMI optical power splitter is fabricated and measured. The measuring results show that the function of the fabricated device can be realized. In accordance with the problems occurred during the experiment and measurement, opinions and methods are presented to improve the performance of the device.

Key words integrated optics, multimode interference, optical power splitter.