

doi: 10. 3788/gzxb20124103. 0299

InP 基 1×4 多模干涉耦合器的设计与制作

马丽^{1,2}, 朱洪亮¹, 陈明华², 张灿¹, 王宝军¹, 边静¹

(1 中国科学院半导体研究所, 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

(2 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要:在密集波分复用系统中,多波长 DFB 激光器阵列与多模干涉耦合器集成光源器件具有重要的应用前景.为了研制多波长集成光源中的宽带可用低损耗光耦合器,利用三维有限差分光束传播法仿真设计了一种具有强限制作用的 InP/InGaAsP 材料的多模干涉型耦合器.输入/输出端波导均采用楔形结构以降低多模干涉型耦合器的插入损耗,提高各个输出端口的出光平衡度.根据仿真结果,结合波导芯层为采用外延生长设备,采用反应离子刻蚀工艺制作了 1×4 多模干涉型耦合器.利用自动对准波导耦合测试系统对所制作器件的插入损耗和出光平衡度进行测量.测试结果表明,该器件在 1550 nm 波长附近的 40 nm 带宽范围内获得了约 2.6 dB 的通带平坦度,在 1550 nm 通信波长处,器件的插入损耗低于 10 dB .

关键词:多模干涉耦合器;强限制波导;束传播方法

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)03-0299-4

0 引言

高性能、集成化的光耦合器是高速、大范围、多路访问光纤网络中必不可少的重要器件.基于自镜像效应的多模干涉耦合器(Multimode Interference, MMI)结构紧凑、插入损耗低、频带较宽、工艺简单,是光子集成器件如环形激光器^[1]、马赫-曾德干涉仪^[2]、光开关^[3]的重要组成部分.在 AlGaAs/GaAs^[4]、SOI^[5-8]等材料上制备光耦合器已有许多报导,而在 InP 基上制作光耦合器的研究却相对较少^[9].在密集波分复用系统中,波长可调 DFB 激光器阵列与多模干涉耦合器集成光源器件具有重要的应用前景^[10-12].

本文采用三维有限差分波束传播法(Finite Difference Beam Propagation Method, FD-BPM)仿真设计了一种宽带波长光耦合器,根据其结果制作了 1×4 多模干涉耦合器件,获得了良好的器件性能指标.该研究工作可为多波长集成光源中光耦合器的研制提供一定的参考价值.

1 器件结构

MMI 耦合器的工作原理是^[13]:由输入场在多模波导区中激发高阶模,各个模式之间会形成干涉,

在自映像原理的作用下,沿着传播方向,多模波导区中会周期性地出现输入场的一重像或者多重像.

图 1 为 1×4 MMI 耦合器的平面结构图.波导芯层为采用(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)设备生长的荧光波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的 InGaAsP 四元材料(1.3Q),厚度 $0.3 \mu\text{m}$,下限制层为 n-InP 衬底,上限制层为 $1.7 \mu\text{m}$ 厚的 p-InP 材料.单模输入、输出波导均采用渐变楔形结构,楔形长度为 $40 \mu\text{m}$,楔形宽度从 $4 \mu\text{m}$ 渐变至 $2.5 \mu\text{m}$.采用楔形波导的优点在于:一方面可以提高单模输入端与多模干涉区的耦合效率,另一方面还可以进一步提高器件的制作容差.4 路输出波导间隔设定为 $6 \mu\text{m}$,多模干涉波导区宽度为 $W_{\text{MMI}} = 24 \mu\text{m}$.

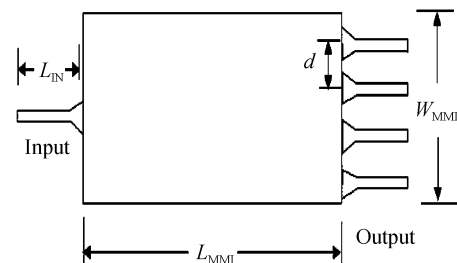


图 1 基于强限制波导结构的 1×4 MMI 耦合器结构
Fig. 1 The schematic diagram of a 1×4 MMI coupler based on strongly guided waveguide

基金项目:国家自然科学基金(No. 60736036, No. 61021003)、国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB301702)和国家高技术研究发展计划(No. 2009AA03Z442, No. 2011AA010303)资助

第一作者:马丽(1985-),女,博士研究生,主要研究方向为 InP 基光子集成器件. Email: lima@semi.ac.cn

通讯作者:朱洪亮(1957-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为 InP 基光电子功能器件. Email: zhuhl@red.semi.ac.cn

收稿日期:2011-09-20; **修回日期:**2011-11-01

MMI 的芯层夹在低折射率的 InP 之间, 波导区宽度两侧为空气. 这样在水平方向可形成较大的折射率差, 使在其中传播的光束, 侧向受到很强的限制作用.

2 模拟仿真

对于耦合器来说, 输出端的插入损耗和光均衡度是器件性能非常重要的两个指标. 插入损耗定义: $IL = -10 \log_{10}(P_{\text{out}i}/P_{\text{in}})$, P_{in} 是输入光功率, $P_{\text{out}i}$ 是第 i 个输出端口的光功率. 均衡度定义: $UF = -10 \log(P_{\text{max}}/P_{\text{min}})$, P_{max} 和 P_{min} 分别是 4 个输出端口中最大和最小的出光功率. 下面利用 FD-BPM 分别对 MMI 的长度、插入损耗和均衡度等参量进行仿真计算.

2.1 MMI 的长度

对于强限制波导结构, MMI 区域成 4 重像的最短长度为^[13]

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3}{16} \cdot \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{n W_e^2}{4\lambda} \quad (1)$$

式中, β_0 、 β_1 为基模和 1 阶模的传播常量, n 、 W_e 分别是多模干涉区的波导有效折射率和有效宽度, λ 是真空波长.

强限制 TE 模的有效宽度计算公式为^[14]

$$W_e = W_{\text{MMI}} + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_c}{n_r}\right) (n_r^2 - n_c^2)^{-1/2} \quad (2)$$

W_{MMI} 是器件的实际宽度, 设计值为 $24 \mu\text{m}$, 入射波长 λ_0 取 $1.55 \mu\text{m}$, n_r 和 n_c 分别是芯层和包层的折射率, $n_r = 3.3822$, $n_c = 3.167$, 由式(2)计算得到有效宽度 $W_e = 24.39 \mu\text{m}$. 代入式(1)后得到多模干涉区的长度 $L_{\text{MMI}} = 311.8 \mu\text{m}$.

用三维 BPM 软件对多模干涉区域的光场传输分布进行模拟仿真, 获得了不同多模干涉区长度 L_{MMI} 对应的输出功率, 如图 2 所示. 从图中可以看出, 长度为 $318 \mu\text{m}$ 处, 4 路分支的分光功率均达到

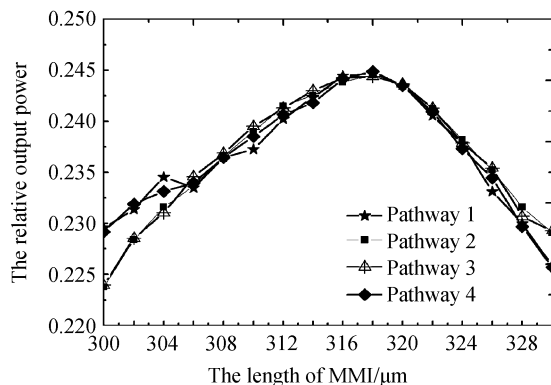


图 2 输出光功率与 MMI 长度之间的关系
Fig. 2 The relationship between the output power and the length of the MMI

最大值, 这与上述公式的计算结果基本一致. 由此定义 MMI 的最优长度为 $L_{\text{MMI}} = 318 \mu\text{m}$.

2.2 插入损耗和均衡度

图 3 是楔型波导与直波导构成的 MMI 耦合器的插入损耗的仿真对比. 可以看出, 在波长 1530 nm 到 1570 nm 的变化区间内, 楔型波导的插损明显低于直波导的插损; 楔形 MMI 波导的插损在 40 nm 的范围内从 6.33 dB 下降到 6.19 dB , 起伏不超过 0.15 dB .

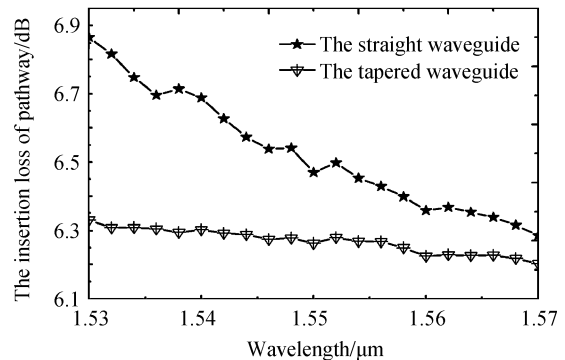


图 3 两类波导的插入损耗与波长的对应关系
Fig. 3 Comparison of insertion loss between two types of waveguide varying with the wavelength

由图 4 可见, 在仿真波长的大部分区域, 楔形波导的出光均衡度也优于直波导型的均衡度.

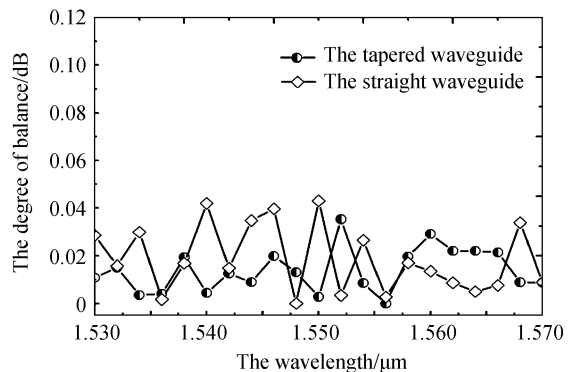


图 4 两类波导的出光平衡度与波长的对应关系
Fig. 4 Comparison of degree of balance between two types of waveguide varying with the wavelength

3 器件制作与测试

用 PECVD 在外延生长层上淀积厚度为 200 nm 的 SiO_2 作为光刻掩模, 利用反应离子刻蚀 (RIE) 形成脊高为 $2 \mu\text{m}$ 的深脊, 穿透波导芯层, 制作成如图 1 所示的 1×4 MMI 器件结构.

图 5 为 Newport PM500 自动对准波导耦合测试系统搭建的波导耦合测试平台示意图. 整个系统由可调谐 DFB 激光器、光纤、调节架、CCD、显微镜以及计算机等构成. 将 MMI 芯片放置在调节架上, 可以通过显微镜进行三维对准和精细微调.

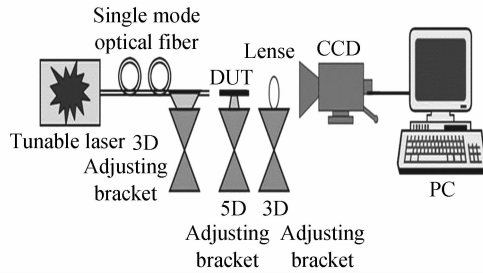


图 5 Newport PM500 波导耦合测试平台

Fig. 5 Newport PM500 waveguide coupling test platform

测试时,激光光源采用功率为 30 mW 的可调谐 DFB 激光器,经直径 $2.5 \mu\text{m}$ 的拉锥光纤耦合进 MMI 的单输入端,4 路分光由 CCD 探测器接收成像并通过电脑软件导出,给出波导插损数值。其损耗测量的基本理论基础为波导杂散光的强度与波导内光场的强度成正比^[15],因此,只要测得杂散光的光强分布规律,就可以知道波导内光场的分布规律,从而推算出传输损耗值。

经红外 CCD 成像后采集到 4 个较强亮度的输出光斑(图 6),在输出端测得输出波导分支的插入损耗随波长的变化曲线如图 7。在整个测试波长 $1530 \sim 1570 \text{ nm}$ 变化的区间内,MMI 的插入损耗处于 $9.2 \sim 11.8 \text{ dB}$ 之间,起伏不超过 2.6 dB 。在波长 1550 nm 处,插入损耗为 9.79 dB ;在 40 nm 的波长变化区间内,4 个分支输出光均衡度起伏范围在 $0.02 \sim 0.75 \text{ dB}$ 之间(图 8),在 1550 nm 处的光均衡度为 0.08 dB 。

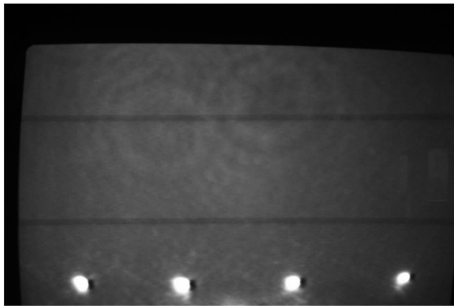


图 6 CCD 采集到的输出光斑

Fig. 6 The output facula caught by infrared CCD camera

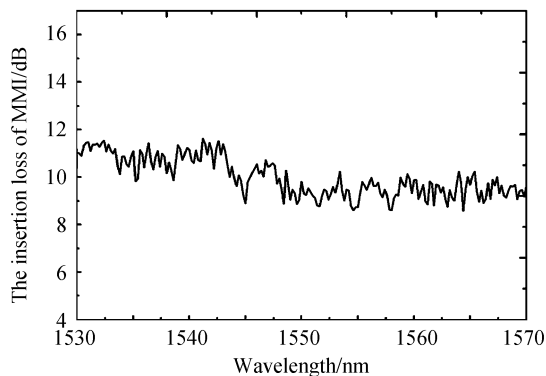


图 7 测量到的插入损耗随波长的变化关系

Fig. 7 Measured insertion loss varying with the wavelength

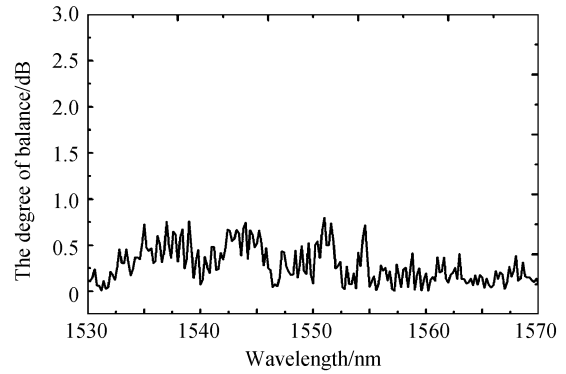


图 8 测量到的光平衡度随波长的变化关系

Fig. 8 Measured uniformity varying with the wavelength

4 结论

本文设计了一种 InP 基 1×4 多模干涉耦合器结构,通过有限差分束传播方法计算仿真了直波导和楔形波导结构的插入损耗、光均衡度等重要参量指标。结果表明,楔形器件具有更好的通带平坦度和更低的插入损耗,在此基础上制作的器件,在通信波长 1550 nm 处可以获得低于 10 dB 的插入损耗以及 0.08 dB 的光平衡度,通带范围可达 40 nm ,通带平坦度 2.6 dB 。这为我们今后制作宽带集成光源中的光耦合器奠定了一定的基础。

参考文献

- [1] YOON Ki-hong, OH Kwang-ryong, KIM Ki-soo, *et al.* Monolithically integrated tunable laser using double-ring resonators with a tilted multimode interference coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(13): 851-853.
- [2] TSAO Shyh-lin, GUO Huang-chen, CHEN Yi-jr. Design of a 2×2 MMI MZI SOI electro-optic switch covering C band and S band[J]. *Microwave and Optical technology Letters*, 2002, **33**(4): 262-265.
- [3] NAGAI Shuichi, MORISHIMA Goh, INAYOSHI Hirokazu, *et al.* Multimode interference photonic switches[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(4): 675-681.
- [4] HEATON J M, JENKINS R M, WIGHT D R, *et al.* Novel 1-to-N way integrated optical beam splitters using symmetric mode mixing in GaAs/AlGaAs multimode waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **61**(15): 1754-1756.
- [5] HOSSEINI Amir, KWONG David N, ZHANG Yang, *et al.* $1 \times N$ Multimode interference beam splitter design techniques for on-chip optical interconnections[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(3): 510-515.
- [6] SHI Y C, DAI D X. Design of a compact multimode interference coupler based on deeply-etched SiO_2 ridge waveguides[J]. *Optics Communications*, 2007, **217**(2): 404-407.
- [7] CHEN Ting, DAI Dao-xin. Design of a compact multimode interference power splitter based on deeply-etched SiO_2 ridge waveguide[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(11): 2150-2154.
陈挺,戴道新.基于深刻蚀 SiO_2 脊形波导的紧凑型多模干涉分离器[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2150-2154.
- [8] WANG Qian, HE Sailing, HUANG Nairong. Optical design of weak-waveguide multimode interference coupler structure

- [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2002, **31**(3): 354-359.
王谦, 何赛灵, 黄耐容, 弱导波多模干涉耦合器结构参量优化设计[J]. *光子学报*, 2002, **31**(3): 354-359.
- [9] TOMOFUJI Shin-ji, MATSUO Shin-ji, KAKITSUKA Takaaki, *et al.* Dynamic switching characteristics of InGaAsP/InP multimode interference optical waveguide switch [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 23380-23388.
- [10] KUDO Koji, YASHIKI Kenichiro, SASAKI Tatsuya, *et al.* 1.55 μm Wavelength-selectable microarray DFB-LD's with monolithically integrated MMI combiner, SOA, and EA-modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(3): 242-244.
- [11] YASHIKI Kenichiro, SATO Kenji, MORIMOTO Takao, *et al.* Wavelength-selectable light sources fabricated using advanced microarray selective epitaxy[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(7): 1619-1621.
- [12] HATAKEYAMA Hiroshi, KUDO Koji, YOKOYAMA Yoshitaka, *et al.* Wavelength-selectable microarray light sources for wide band DWDM applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(6): 1341-1348.
- [13] SOLDANO Lucas B, PENNINGES Eric C M. Optical multimode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(4): 615-627.
- [14] KAPANY N S, BURKE J J. Optical waveguides[M]. New York: Academic, 1992.
- [15] KAPRON F P, KECK D B, MAURER R D. Radiation losses glass optical waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 1970, **17**(10): 423-425.

Design and Fabrication of a 1-by-4 Multimode Interference Couplers Based on InP

MA Li^{1,2}, ZHU Hong-liang¹, CHEN Ming-hua², ZHANG Can¹, WANG Bao-jun¹, BIAN Jing¹

(1 Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institution of Semiconductor, CAS, Box 912, Beijing 100083, China)

(2 Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multiple wavelength DFB laser array and multimode interference coupler integrated light source device has important application prospect in the dense wavelength division multiplexing system. A strongly guided InP/InGaAsP multimode interference coupler is designed and simulated by using 3D FD-BPM method in order to research the optical coupler used in the broadband available multiple wavelength integrated light source. Tapered input/output waveguides are used to reduce the insertion loss of the multimode interference coupler and to improve the uniformity of the output ports. Combined with the metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) epitaxial growth apparatus and according to the simulation results, a 1-by-4 multimode interference coupler is fabricated by using reactive ion etching process. The insertion loss and the uniformity of the device is measured by automatic alignment waveguide coupling test system. The test result shows that the device has 40nm available bandwidth and 2.6dB pass band flatness around 1550nm. Furthermore, the insertion loss is no higher than 10dB at the designed wavelength 1550nm.

Key words: Multimode interference coupler, Strongly guided waveguide, Beam propagation method