

2. 平面波导谐振腔型滤波器的研制

蔡纯 肖金标 刘旭 丁东 张明德 孙小菡

(东南大学电子工程系 江苏 南京 210096)

徐筱乐 陈堂胜 李拂晓

(南京电子器件研究所江苏南京 210000)

摘 要:基于四端口谐振腔滤波理论,采用时域有限差分法(2D-FDTD)数值仿真了多模干涉(MMI)耦合型滤波器以及4矩形谐振腔串联滤波器的特性;设计和制作了GaAlAs/GaAs平面波导串联型4矩形谐振腔窄带滤波器,获得其滤波特性,测试结果与仿真结果有着较好的符合。

关键词:波分复用 平面波导器件 光滤波器 多模干涉(MMI) 谐振腔 时域有限差分法 四端口谐振腔滤波理论

一、引言

WDM光网络已成为超高速通信网发展的主流,以滤波为基础的光波分复用器件是实现WDM的关键。光滤波器的设计、制作成为各国竞相研究的热点。常用的光滤波器器件有光栅型[1]、干涉滤光片型[2]、谐振腔型[3]等多种类型。谐振腔型光滤波器以平面光波光路(PLC)为基础,具有尺寸小、重复性好、适于批量生产、可以在光掩模过程中实现复杂的光路以及与光纤对准容易等优点。为未来密集集成光系统的最基本单元[4]。

平面波导谐振腔型滤波器就谐振腔的谐振机理可分为两类,Shuichi Suzuki[5]等人制作的单圆环形和双圆环型谐振腔滤波器、B. E. Little[6,7]等人设计制作的以MMI为耦合结构的圆环型谐振腔滤波器以及Giora Griffe[8]设计的4个环形跑道串联谐振腔滤

波器,属于行波型谐振腔滤波器;C. Manolator[9]等人设计的矩形谐振腔滤波器,属于驻波型谐振腔滤波器。

我们仿真计算和优化设计了两种结构的滤波器即多模干涉(MMI)耦合型(3dB功率分配)和4矩形谐振腔串联滤波器,基于国内现有的GaAs半导体材料生长及光刻工艺设备和条件,研制出了两种芯片器件,并通过了光学性能测试。

二、谐振腔滤波理论^[10,11]

在两个波导之间放置若干个谐振腔,波导与谐振腔通过耦合作用产生能量交换,实现滤波。图1为谐振腔型滤波器分析示意图。图1中间为互作用区,表明波导中向右传输波和向左传输波可在互作用长度 d 内与谐振腔的谐振模式实现能量交换;谐振腔两边对称位置为参考面,形成了上下两个四端

• 本课题研究获得江苏省高技术项目(7706008020)及“十五”863子项目(2002AA31230)的资助。

口网络, S_{-1} 、 S_{-2} 和 S_{+1} 、 S_{+2} 、分别为上波导端口 1、2 处前向(向右)和反向(向左)传输光波的幅值;同理, S_{-3} 、 S_{-4} 、和 S_{+3} 、 S_{+4} 、分别为下波导端口 3、4 前、反向传输光波的幅值;

E 代表谐振场强的幅值。假设波导为单模光波, 导并忽略波导色散, 则某一谐振模式的表达式可写成

$$\frac{dE}{dt} = \left(j\omega_0 - \frac{1}{\tau_o} - \frac{1}{\tau_r} - \frac{1}{\tau_e} \right) E + k_1 S_{+1} + k_2 S_{+2} + k_3 S_{+3} + k_4 S_{+4} \quad (2.1)$$

式中 ω_0 为谐振频率, 考虑谐振腔有能量的损耗, $\frac{1}{\tau_o}$ 为谐振模式幅值的衰减系数; $\frac{1}{\tau_r}$ 、 $\frac{1}{\tau_e}$ 分别为上下路波导的幅值衰减系数。 k_1 、 k_3 分别为端口 1、3 处前向耦合系数, k_2 、 k_4 分别为

端口 2、4 处反向耦合系数。以 1 端口为输入端口, 设 S_{+2} 、 S_{+3} 、 S_{+4} 为零, 并考虑时间项 $e^{-j\omega t}$, 在稳态状况下, 可得^[9-11]:

$$\frac{S_{-1}}{S_{+1}} = R = -e^{-j\beta d} \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau_{e1}\tau_{e2}}} e^{j(\theta_1 - \theta_2)}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_o} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_e}} \quad (2.2)$$

$$\frac{S_{-2}}{S_{+1}} = T = e^{-j\beta d} \left[1 - \frac{\frac{1}{\tau_{e1}}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_o} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_e}} \right] \quad (2.3)$$

$$\frac{S_{-3}}{S_{+1}} = D_L = -e^{-j\beta d} \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau_{e1}\tau_{e4}}} e^{j(\theta_1 - \theta_4)}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_o} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_e}} \quad (2.4)$$

$$\frac{S_{-4}}{S_{+1}} = D_R = -e^{-j\beta d} \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau_{e1}\tau_{e3}}} e^{j(\theta_1 - \theta_3)}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_o} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_e}} \quad (2.5)$$

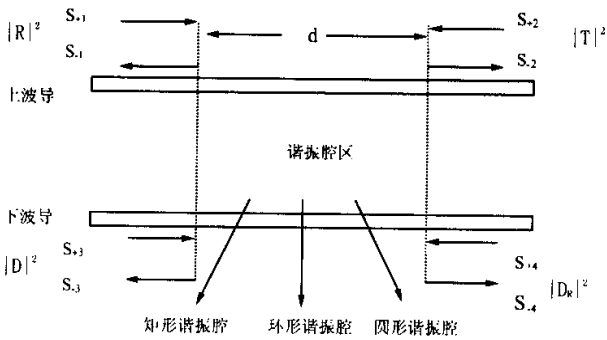


图 1 谐振腔型滤波器示意图

式中, R 、 T 、 D_R 、 D_L 分别表示四端口处反射波与端口 1 入射波的幅值比。

三、时域有限差分(2D-FDTD)仿真模拟两种类型的滤波器

采用时域有限差分法(2D-FDTD)分别仿真分析了基于 GaAlAs/GaAs 材料的多模干涉(MMI)[12]型和 4 个矩形谐振腔串联滤波器的滤波特性。光从端口 1 输入,以器件的几何尺寸为对称参考面,对波导右端口(端口 2 或 4)的输出光场幅度抽样,通过离散傅立叶(Fourier)变换,可得到其归一化功率谱图。通过多次仿真,确定输入/输出单模波导宽度为 $3.0\mu\text{m}$,多模波导的尺寸为 $14.0\mu\text{m} \times 14.0\mu\text{m}$,矩形谐振腔尺寸为 $10.0\mu\text{m} \times 10.0\mu\text{m}$,串联谐振腔之间的距离为 $10\mu\text{m}$,波导与谐振腔之间的耦合间隙为 $1.0\mu\text{m}$ 。GaAs 材料在 $1.55\mu\text{m}$ 处的折射率取为 3.43。图 2 为光在多模干涉耦合(MMI)型谐振腔滤波器中的传输以及相应的在端口 2 获得的归一化输出光功率图。数值仿真滤波的波长范围在 1510.0nm – 1590.0nm ; 1515.0nm 、 1525.0nm 、 1535.0nm 、 1540.0nm 、 1546.0nm 、 1552.0nm 、等 6 个位置出现了明显的滤波。

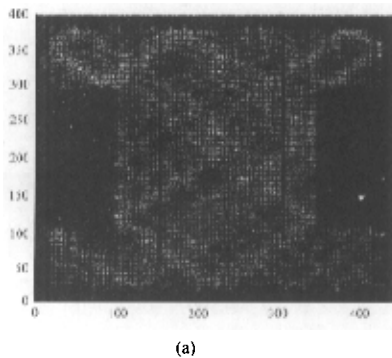


图 3 为 4 个串联矩形谐振腔滤波器中的光波传输(见 a)和端口 2(见 b)、端口 4(见 c)归一化输出光波功率图。可见,在 $1.56\mu\text{m}$ 和 $1.58\mu\text{m}$ 处形成了两个滤波区。

四、实验结果及分析

图 4(b)所示为在多模干涉(MMI)耦合结构谐振腔滤波器的下输出波导端口 4 上测得的功率谱图,功率谱图的测试采用 Agilent 公司的 86142B 光谱分析仪(OSA);测试平台为 MELLES GRIOT 公司的三维维调架。在 1514.0nm 、 1524.0nm 、 1532.0nm 、 1540.0nm 、 1548.0nm 、 1556.0nm 、 1565.0nm 、 1573.0nm 等 8 个波长位置有滤波。

图 5(a)4 矩形谐振腔串联滤波器扫描电镜照片图(b)为上波导端口 2 处测得的光谱特性试曲线,从测试曲线可知在 $1.563\mu\text{m}$ 和 $1.580\mu\text{m}$ 处有滤波效应,与计算的结果基本一致。

同时还可知,实验结果与仿真结果在滤波波形存在偏差,其原因主要有(1)工艺制作方面的误差,设计单模波导的宽度与实际加工的结果相差约 $0.5\mu\text{m}$,脊形波导的侧壁与水平方向夹角相差约 8° ; (2)测试系统的误差; (3)器件材料物理参数的差异; (4)二维数值仿真的误差。

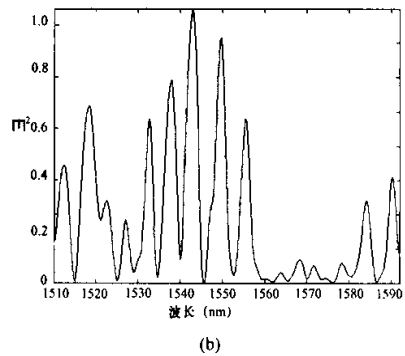
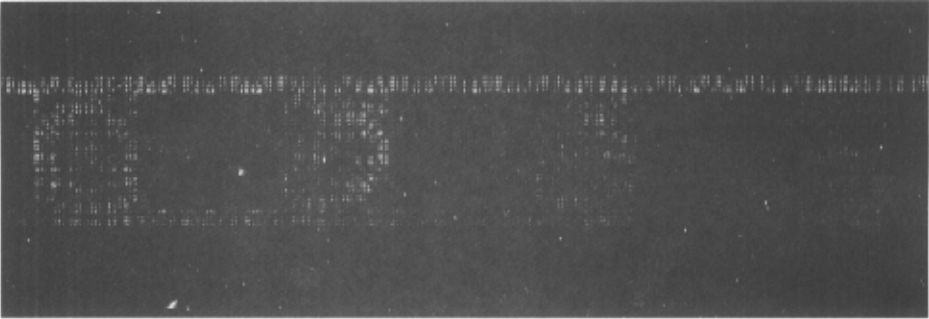
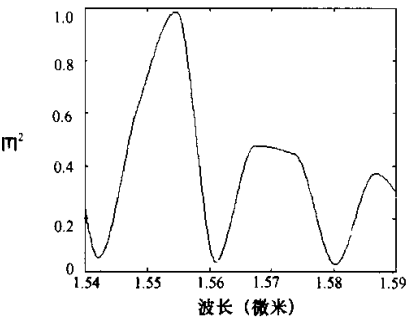


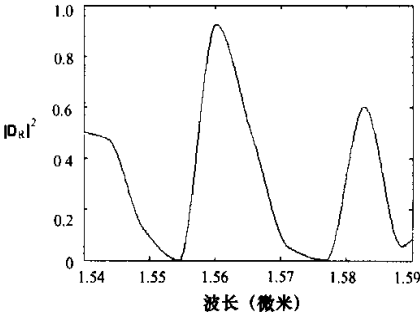
图 2 (a)光在 MMI 型矩形谐振腔滤波器的传输(b)(a)中端口 2 归一化输出光功率图



(a)

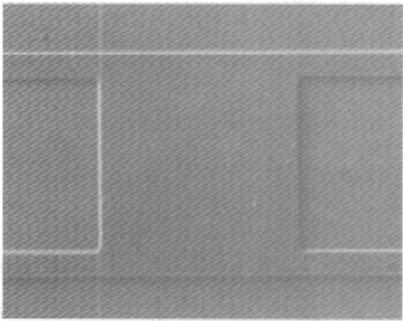


(b)

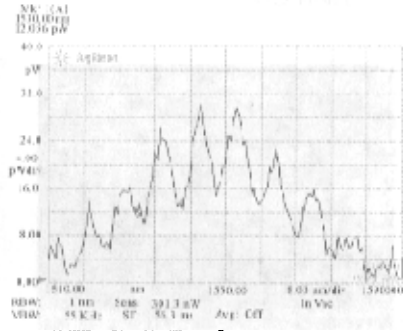


(c)

图 3 (a)光在 4 个矩形谐振腔中的传输(b)(a)中端口 2 归一化输出光功率图(c)(a)中端口 4 归一化输出光功率图



(a)



(b)

图 4 (a) MMI 型矩形谐振腔滤波器扫描电镜图(b) MMI 型矩形谐振腔滤波器的功率谱图

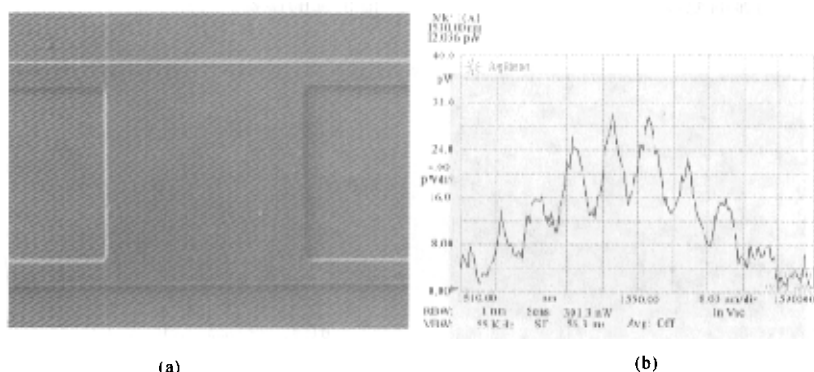


图5 (a) 串联型4谐振腔滤波器扫描电镜图(b)在端口2测试的功率谱图

五、结论

采用时域有限差分(2D-FDTD)法,数值仿真、分析了多模干涉(MMI)耦合结构谐振腔滤波器和4个串联矩形谐振腔滤波器,仿真结果与实际的滤波器测试结果符合的较好。对出现的滤波位置偏差和滤波波形偏差给进行分析。进一步精确控制GaAs材料的生长和波导光刻工艺,矩形谐振腔型滤波器的滤波效果将会得到更大的改善。

参考文献

- 1 Jie Dong, Shigehisa Arai, et al. Single Mode Multiple-Element Laser Array with Grating Filter. *IEEE. J. Quantum Electronics*. 1993, 29 (7): 2163~2173.
- 2 Mitsugi Kajikawa, Izumi Kataoka. A Design Method of Optical Bandpass Filters. *IEEE. J. Lightwave Technol*, 1997, 15(9): 1720~1728
- 3 Andrea Melloni, Mario Martinelli. Synthesis of Direct-Coupled-Resonators Bandpass Filters for WDM System. *IEEE J. Lightwave Technol*, 2002, 20(2): 296~304,
- 4 Shuichi Suzuki, Yutaka Hatakeyama, et al. Precise Control of Wavelength Channel Spacing of Microring Resonator Add-Drop Filter Ar-

ray. IEEE J. Lightwave Technol., 2002, 20 (4):
745~761

- 5 Shuichi Suzuki, Yasuo Kokubun. Ultrashort Optical Pulse Transmission Characteristics of Vertically Coupled Microring Resonator Add/Drop Filter. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2001, 19(2): 266~271
- 6 B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus, et al. Microring Resonator Channel Dropping Filters. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(6): 998~1005
- 7 Giora Griffel. Synthesis of Optical Filters Using Ring Resonator Arrays. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, 12(7): 810~812
- 8 C. Manolator, M. J. Khan, et al. Coupling of Modes Analysis of Resonant Channel Add-Drop Filters. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, 35(9): 1322~1332,
- 9 B. E. Little, J. S. Foresi, G. Steinmeyer, et al. Ultra-Compact Si-SiO₂ Microring Resonator Optical Channel Dropping Filters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10(4): 549~551
- 10 A. Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides. *IEEE-E Electron. Lett.*, 2000, 36: 321~322
- 11 M. K. Chin, C. Youtsey, et al. GaAs Microcavity Channel-Dropping Filter Based on a Race-Track Resonator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(2): 1620~1622

- 12 Paiani M R, Janz C F, Macdonald R I et al. Compact planar 980/1550-nm wavelength Multi/Demultiplexer based on multimode interference. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, 7 (10): 1180~1182

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>