

GaAlAs/GaAs 平面波导串联矩形谐振腔滤波器的研究

蔡纯¹, 刘旭¹, 肖金标¹, 马长峰¹, 陈麟¹, 丁东¹,
张明德¹, 孙小菡¹, 徐筱乐², 陈堂胜², 李拂晓²

(1. 东南大学电子工程系光子学与光通信研究室, 南京 210096;

2. 南京电子器件研究所, 南京 210016)

[摘要] 基于四端口谐振腔滤波理论, 采用二维时域有限差分法(2D-FDTD)数值仿真了矩形谐振腔的滤波特性, 分析了串联谐振腔的个数与滤波特性的关系; 设计和制作了 GaAlAs/GaAs 平面波导四串联矩形谐振腔滤波器, 获得其滤波特性, 测试结果通带半宽约为 10 nm; 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; 谐振腔; 时域有限差分法

[中图分类号] TN929.11 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)02-0061-06

1 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。光波导滤波器的设计和制作成为各国竞相研究的热点。常用的光滤波器件有光栅型^[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容易对准等优点, 已成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 2 类, Shuichi Suzuki^[5,6]等人制作的单/双圆环型谐振腔滤波器、B. E. Little^[7,8]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 Griffie^[9]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^[10]等人设计的矩形谐振腔滤波器, 属于驻波型谐振腔滤波器。

在平面波导光器件的研制过程中, 数值模拟分析方法可以大大地缩短设计周期, 降低成本。光线光学法^[11]和混合法^[12]不能直接得到光电磁波的传播以及与媒质相互作用过程; 时域有限差分(FDTD)法^[13]直接把含时间变量的 Maxwell 旋度方程在 Yee 氏网格空间中转换为差分方程, 模拟电磁波的传播及与媒质相互作用过程, 对复杂情形描绘出清晰的电磁场图像, 通过 Fourier 变换, 可得到频域信息, 因而很适合进行谐振腔滤波器的模拟仿真。

笔者仿真计算和优化设计了串联矩形谐振腔滤波器, 基于国内现有的 GaAlAs/GaAs 半导体材料生长及光刻工艺设备和条件, 经数次改进加工制作工艺参数并重复制作了几个批次的器件后, 研制出滤波器芯片, 并通过光学性能测试。

[收稿日期] 2003-07-18; **修回日期** 2003-09-05

[基金项目] “八六三”国家高技术资助项目(2002AA31230); 江苏省高技术资助项目(7706008020)

[作者简介] 蔡纯(1963-), 男, 上海市人, 东南大学博士研究生

2 谐振腔滤波原理及 2D-FDTD 仿真分析

2.1 矩形波导谐振腔滤波器原理^[10~16]

在 2 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 中间为相互作用区，表明波导中向右传输波和向左传输波可在相互作用长度 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，形成了四端口网络， S_{+1} 、 S_{-2} 和 S_{-1} 、 S_{+2} 分别为上波导端口 1、端口 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、端口 4 前向、反向传输光波的幅值； R 表示在端口 1 处的反射波幅值与入射波幅值的比， T 为端口 2 处前向传输波与端口 1 入射波的幅值比； D_L 、 D_R 分别表示端口 3、端口 4 处前向、反向传输波与端口 1 入射波幅值的比。根据四端口器件理论，可得四端口处反射波与端口 1 入射波的幅值比 R 、 T 、 D_R 、 D_L 。

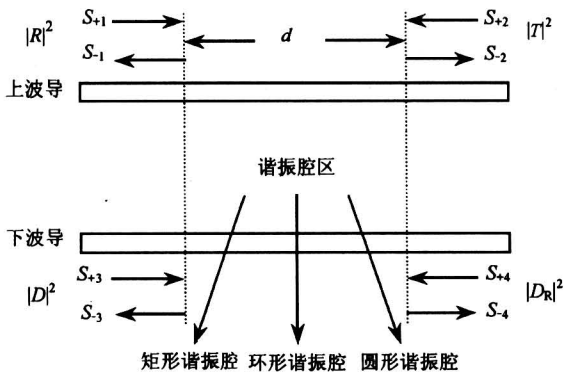


图 1 谐振腔型滤波器示意图

Fig.1 Schematic of the resonant filter

由于单个驻波型谐振腔滤波器 R 、 T 、 D_L 、 D_R 均不为零，因此可通过几个串联谐振腔的不同组合来调整四个系数的比值，以便获得所需要的滤波波形。通过数值仿真，模拟光波在串联型矩形谐振腔滤波器中传输，得出其滤波特性。

2.2 2D-FDTD 数值仿真模型

采用 Yee 中心差分算法，在满足解的稳定性和收敛性的前提下，构造 PML^[17~19] (perfectly matched layer) 吸收边界条件，见图 2。

设 GaAs/GaAlAs 为本征半导体，其介电常数 ϵ 为定常数（在 1550 nm 处为 $\epsilon = 11.77$ ），近似为

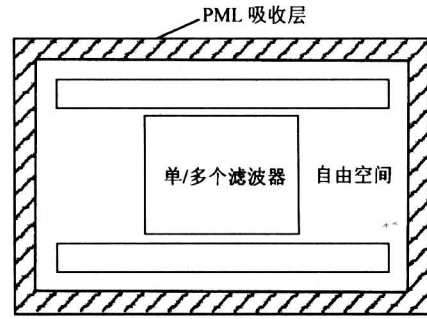


图 2 谐振腔型滤波器仿真模拟示意图

Fig.2 Schematic for simulating the resonant filter 各向同性；忽略材料的电导率和磁阻率，将具有二阶精度的中心差分公式代替旋度方程的分量式，等间隔空间网格安排按每个磁场分量由 4 个电场分量环绕（类似的，每个电场分量也由 4 个磁场分量环绕）并按实际电磁场的传播规律，在时间上（时间步长对应的离散值为 n ）电场和磁场相差半个时间步长做交替计算，则电场分量的差分计算式为：

$$E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) = E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + CA(m) \left[H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right) - H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right) \right], \quad (1)$$

$$E_y^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) = E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) + CA(m) \left[H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right) - H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) + H_z^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) \right], \quad (2)$$

$$E_z^{n+1}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) = E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + CA(m) \left[H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right) \right]$$

$$H_x^{n+1/2}\left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)]. \quad (3)$$

类似地, 磁场分量的差分计算式为:

$$H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) =$$

$$H_x^{n-1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) -$$

$$CB(m) \left[E_z^n\left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) - \right.$$

$$\left. E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) + E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \right], \quad (4)$$

$$H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) =$$

$$H_y^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) -$$

$$CB(m) \left[E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - \right.$$

$$\left. E_z^n\left(i + 1, j, k + \frac{1}{2}\right) + E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \right], \quad (5)$$

$$H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) =$$

$$H_z^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) -$$

$$CB(m) \left[E_y^n\left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) - \right.$$

$$\left. E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k\right) + E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \right]. \quad (6)$$

式中, $CA(m) = \Delta t/\epsilon(m)\delta$; $CB(m) = \Delta t/\mu(m)\delta$; Δt 为时间步长; δ 为网格空间步长; $\epsilon(m)$ 为对应的所求场量处的介电常数; 同理, $\mu(m)$ 为所求场量处的磁导率。由于波导在 z 向对称, 则 $\partial/\partial z = 0$, 可得到二维时域有限差分展开式。为保证仿真计算的稳定性和收敛性, 时间步长 (Δt) 和网格空间步长应满足关系 $c\Delta t \leq \delta/2^{1/2}$; 为减小差分数值色散, 空间步长应满足 $\delta \leq \lambda/12$ (λ 为自由空间的波长)。

在构造 PML 吸收层时考虑到光器件的外层为自由空间, 采用标准中心差分格式, 选择设计合适的电导率分布 $\sigma_i(i)$, $i = x, y$, 由此 2D-PML 吸收边界的差分式为:

$$E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) = \frac{1 - \frac{\sigma_y(j)\Delta t}{2\epsilon_0}}{1 + \frac{\sigma_y(j)\Delta t}{2\epsilon_0}} E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) +$$

$$\frac{\Delta t}{\epsilon_0 \left[1 + \frac{\sigma_y(j)\Delta t}{2\epsilon_0} \right] \delta} \left[H_{zx}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) + \right.$$

$$H_{zy}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) -$$

$$H_{zx}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}\right) - H_{zy}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}\right) \left. \right], \quad (7)$$

$$E_y^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = \frac{1 - \frac{\sigma_x(i)\Delta t}{2\epsilon_0}}{1 + \frac{\sigma_x(i)\Delta t}{2\epsilon_0}} E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) -$$

$$\frac{\Delta t}{\epsilon_0 \left[1 + \frac{\sigma_x(i)\Delta t}{2\epsilon_0} \right] \delta} \left[H_{zx}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) + \right.$$

$$H_{zy}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) -$$

$$H_{zx}^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - H_{zy}^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \left. \right], \quad (8)$$

$$H_{zx}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) = H_{zx}^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) -$$

$$\frac{\Delta t}{\mu\delta} \left[E_y^n\left(i + 1, j + \frac{1}{2}\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \right], \quad (9)$$

$$H_{zy}^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) = H_{zy}^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) +$$

$$\frac{\Delta t}{\mu\delta} \left[E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j + 1\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) \right]. \quad (10)$$

考虑到仿真的精度和计算量, 实际仿真中, 取 $\delta = 0.05 \mu\text{m}$, $\Delta t = 1.0e^{-16} \text{s}$, PML 吸收媒质的格点数 (厚度) 为 8 个格点, 电导率 $\sigma_i(i)$, $i = x, y$ 的分布为形式为 $\sigma_i(i) = \sigma_{\max}(i/\delta_{\max})^4$, σ_{\max} 为吸收媒质最外层的电导率, δ_{\max} 为 PML 吸收媒质的厚度内表面的反射系数 $R(0) = \exp[-2\delta\sigma_{\max}/5\epsilon_0 c]$ 取 1% 的情况, 可定出 σ_{\max} 。

2.3 仿真结果及分析

光从端口 1 输入, 以器件的几何尺寸为对称参考面, 对上波导右端口 (端口 2) 的输出光场幅度抽样, 通过离散 Fourier 变换, 可得到其归一化功率谱图。通过多次仿真, 确定波导宽度为 $2.5 \mu\text{m}$, 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 $1.0 \mu\text{m}$ 。图 3 为对单个矩形谐振腔数值模拟的结果。从图 3a 可见, 光波在其中已可传播; 从图 3b 可见, 在 $1.56 \mu\text{m}$ 附近形成宽带滤波。

图 4 为双串联矩形谐振腔的模拟结果。从图 4b 可见, 在 $1.55 \sim 1.58 \mu\text{m}$ 区间, 形成 2 个滤波区, 且滤波谱宽度比单谐振腔时的窄。

图 5 为四串联矩形谐振腔滤波器的仿真结果。

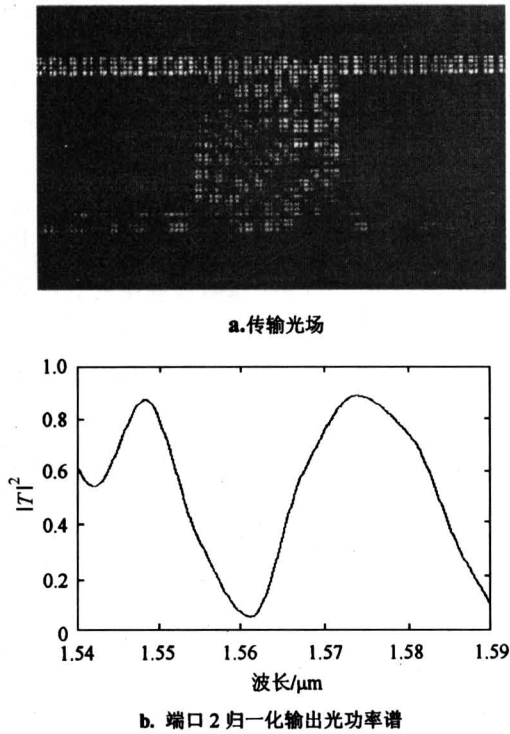


图 3 单矩形谐振腔滤波器 2D-FDTD 仿真结果
Fig.3 2D-FDTD simulation results for the filter based on single rectangular resonator

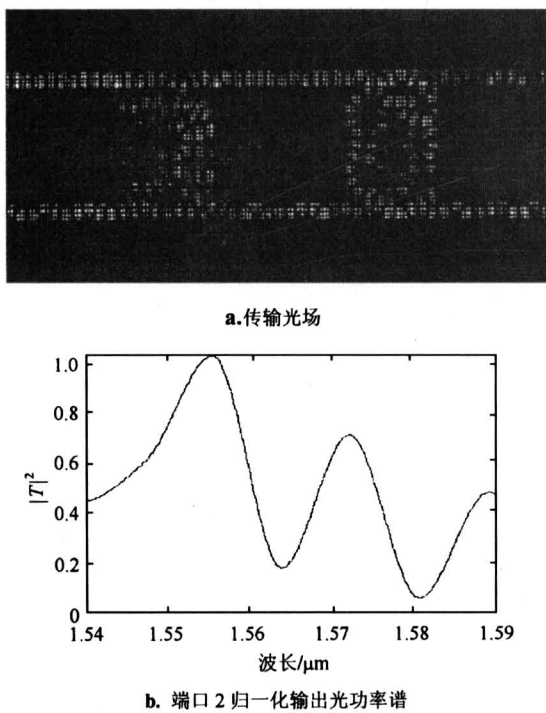


图 4 双矩形谐振腔滤波器 2D-FDTD 仿真结果
Fig.4 2D-FDTD simulation results for the filter based on two rectangular resonators

光波传输见图 5a; 端口 2、端口 4 归一化输出光谱分别见图 5b、图 5c。可见, 在 1.56 μm 和 1.58 μm 处形成了 2 个滤波区, 滤波特性较前两种情况有着明显改善。

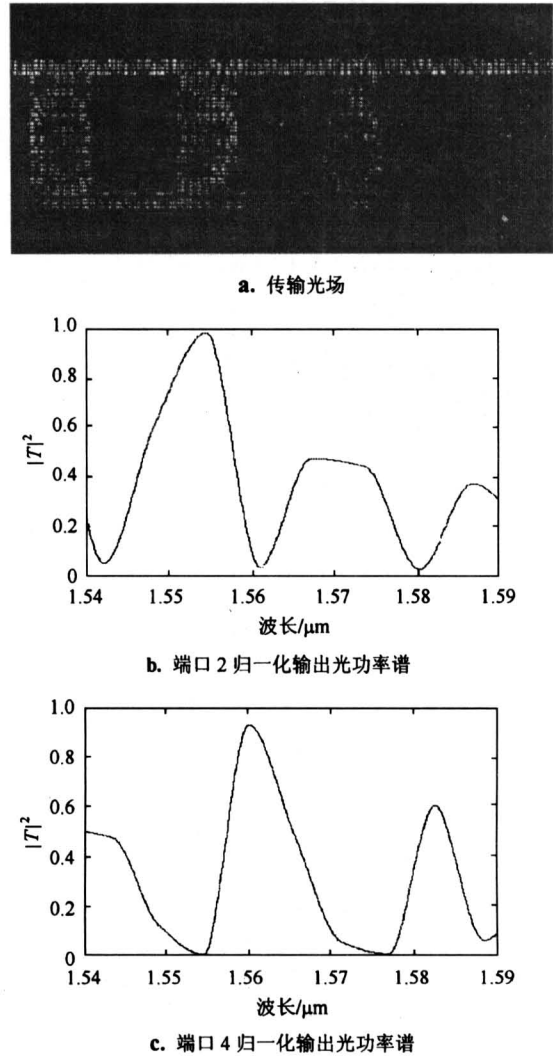


图 5 四串联矩形谐振腔滤波器 2D-FDTD 仿真结果

Fig.5 2D-FDTD simulation results for the filter based on four serial rectangular resonators

3 实验结果及分析

基于 GaAlAs/GaAs 半导体材料生长、图形掩模和光刻工艺, 制作了四串联矩形型谐振腔滤波器, 结果见图 6。图 6a 为实物扫描电镜照片, 图中上下 2 个呈 90°图形的粗线是外接的 2 个对称钛金电极, 覆盖在上下波导通道上, 其目的在于加电后产生电光效应, 可研究波导折射率变化对滤波特性的影响。

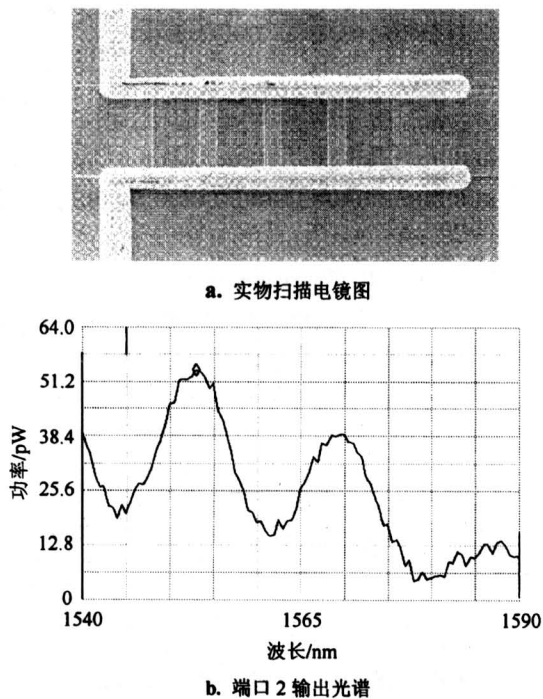


图 6 四串联矩形谐振腔滤波器试验结果

Fig.6 Experiment results for the filter based on four cascade rectangular resonators

图 6b 为端口 2 处测得的光谱特性曲线, 由 Agilent 公司的 86142B 光谱分析仪 (OSA) 测得, 采用 MELLES GRIOT 公司的三维微调架 (最小调节精度低于 $1.0 \mu\text{m}$) 实现芯片与单模光纤的耦合。光信号从端口 1 输入, 在端口 2 测得经过谐振腔滤波器后的光信号。从测试结果可见在 $1.563 \mu\text{m}$ 和 $1.580 \mu\text{m}$ 处有滤波效应, 通带半宽约为 10 nm 。这些与数值模拟的结果基本一致, 只是位置略有偏移, 滤波波形也略有不同。出现差异的原因主要在于:

1) 工艺制作方面的误差: 设计单模波导的宽度为 $3 \mu\text{m}$, 脊形波导的侧壁与水平方向垂直呈 90° ; 实际加工的宽度在 $2.50 \sim 2.85 \mu\text{m}$, 波导侧壁与水平方向的夹角为 82° 。

2) 测试系统的误差: 测试系统与器件的光功率的耦合是导致误差的一个重要原因。

3) 实际器件材料 GaAlAs/GaAs 的物理参数如折射率 (在 $1.55 \mu\text{m}$ 处)、电导率与模拟计算参数之间也存在差异。

4) 二维数值仿真的误差。

4 结论

采用时域有限差分 (2D-FDTD) 法, 数值仿

真并分析单、双和四串联矩形谐振腔滤波器, 研制了四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的波峰位置符合的较好, 通带半宽均为 10 nm 左右。进一步精确控制 GaAlAs/GaAs 材料生长和波导光刻工艺, 矩形谐振腔型滤波器的滤波效果会更好。

参考文献

- [1] Dong J, Arai S, Ikeda T, et al. Single mode multiple-element laser array with grating filter [J]. IEEE J Quantum Electronics, 1993, 29(7): 2163~2173
- [2] Kajikawa M, Kataoka I. A desing method of optical bandpass filters [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1997, 15(9): 1720~1728
- [3] Melloni A, Martinelli M. Synthesis of direct-coupled-resonators bandpass filters for wdm system [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2002, 20(2): 296~304
- [4] Suzuki S, Hatakeyama Y, Chu S T. Precise control of wavelength channel spacing of microring resonator add-drop filter array [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2002, 20(4): 745~761
- [5] Suzuki S, Kokubun Y. Ultrashort optical pulse transmission characteristics of vertically coupled microring resonator add/drop filter [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2001, 19(2): 266~271
- [6] Suzuki S, Oda K, Hibino Y. Integrated-optic double-ring resonators with wide free spectral range of 100 GHz [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1995, 13(8): 1766~1771
- [7] Little B E, Foresi J S, Steinmeyer G, et al. Ultra-compact Si-SiO₂ microring resonator optical channel dropping filters [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(4): 549~551
- [8] Little B E, Chu S T, Haus H A, et al. Microring resonator channel dropping filters [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1997, 15(6): 998~1005
- [9] Griffel G. Synthesis of optical filters using ring resonator arrays [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(7): 810~812
- [10] Manolator C, Khan M J, Fan S, et al. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35(9): 1322~1332
- [11] Yariv A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. IEEE Electron Lett, 2000, 36: 321~322

- [12] Chin M K, Youtsey C, Zhao W. GaAs microcavity channel-dropping filter based on a race-track resonator [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11(2): 1620~1622
- [13] Oku S, Shibata Y. Semiconductor Photonic Waveguide Structures Made by a Reactive Beam Etching Technique [M]. Indium Phosphide and Related Materials, 2001. 75~78
- [14] Rabus D G, Hamacher M. MMI-coupled ring resonators in GaInAsP-InP [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13(8): 812~814
- [15] Sadai A, Baba T. FDTD simulation of photonic devices and circuits based on circular and fan-shaped microdisks [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1999, 17(8): 1493~1499
- [16] Peerlings J, Dehe A, Vogt A. Long resonator micromachined tunable GaAs-AlAs fabry-perot filter [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(9): 1235~1237
- [17] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. J Comput Phys, 1994, 114(2): 185~200
- [18] Berenger J P. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. J Comput Phys, 1996, 127(2): 363~379
- [19] Berenger J P. Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problem [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1996, 44(1): 110~117

GaAlAs/GaAs Planar Waveguide Filters Based on Cascade Rectangular Resonators

Cai Chun¹, Liu Xu¹, Xiao Jinbiao¹, Ma Changfeng¹, Chen Lin¹, Ding Dong¹,
Zhang Mingde¹, Sun Xiaohan¹, Xu Xiaole², Chen Tangsheng², Li Fuxiao²

(1. *Research Laboratory of photonics and optical communications, Southeast University, Nanjing 210096 China*; 2. *Nanjing Institute of Electron Devices, Nanjing 210016, China*)

[**Abstract**] Based on the electromagnetic model for four-port resonant filter, the optical characteristics of several filters with rectangular cascade resonators have been numerically simulated by utilizing two-dimensional FDTD method. The relationship between the number of cascade resonators and the filtering features is analyzed. The narrow-band filter with four cascade resonators implemented on GaAlAs/GaAs planar waveguide is designed and fabricated. The experiment result shows the half-width of filtering spectrum for the chip is about 10 nm, which coincides well with that of the simulation.

[**Key words**] WDM; planar lightwave circuits; optical filters; resonator; FDTD