

文章编号:1001-9014(2005)01-0065-06

# 环形谐振腔 GaAlAs/GaAs 四端口滤波器的仿真与实验研究

蔡纯<sup>1</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 肖金标<sup>1</sup>, 丁东<sup>1</sup>, 张明德<sup>1</sup>, 孙小菡<sup>1</sup>,  
徐筱乐<sup>2</sup>, 陈堂胜<sup>2</sup>, 李拂晓<sup>2</sup>

(1. 东南大学电子工程系光子学与光通信研究室, 江苏南京 210096; 2. 南京电子器件研究所, 江苏南京 210016)

**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)对环形谐振腔的滤波特性进行数值仿真, 仿真结果给出多模干涉(MMI)耦合长度与滤波特性的关系. 所制作的两种 GaAlAs/GaAs 平面波导环形谐振腔窄带滤波器的测试结果与仿真结果符合较好.

**关键词:** 波分复用; 平面波导器件; 光滤波器; 多模干涉; 四端口谐振腔滤波理论

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION ON FOUR-PORT GaAlAs/GaAs PLANAR WAVEGUIDE FILTERS WITH RING RESONATOR

CAI Chun<sup>1</sup>, LIU Xu<sup>1</sup>, XIAO Jin-Biao<sup>1</sup>, DING Dong<sup>1</sup>, ZHANG Ming-De<sup>1</sup>, SUN Xiao-Han<sup>1</sup>,  
XU Xiao-Le<sup>2</sup>, CHEN Tang-Sheng<sup>2</sup>, LI Fu-Xiao<sup>2</sup>

(1. Research Laboratory of photonics and optical communication, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Institute of Electron Devices, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Based on the theory of four-port resonant filters, the characteristics of filters with ring resonators were numerically simulated by using two-dimensional FDTD method. The relationship between the coupling length of MMI and the filtering features was also simulated. Two narrow-band filters with ring resonators based on GaAlAs/GaAs planar waveguide were designed and fabricated. The measurement on filtering feature was carried out. It coincides well with that from the numeric computation.

**Key words:** WDM; planar waveguide; optical filters; MMI; theory of four-port resonant filters

### 引言

波分复用(WDM)技术是实现宽带通信网最经济的途径. 支撑 WDM 的关键硬件, 除高速响应的单频光源和波长可调谐光源外, 波长复用/解复用器件是最重要的硬件. 在各种波长的复用/解复用器件中(薄膜干涉滤光片、衍射光栅滤波器、光纤光栅滤波器、平面波导谐振腔滤波器等), 以半导体平面波导谐振腔型光滤波器在未来高密度集成光系统中最具潜力<sup>[1]</sup>, 这是因为半导体平面波导谐振腔滤波器是以半导体材料生长、微电子加工工艺以及平面光波

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等诸多优点; 在半导体材料中, 就制作单片集成光系统来说, 应用最广的是 GaAlAs/GaAs<sup>[2]</sup>.

本文仿真计算和优化设计了单环和并列双环 MMI 耦合行波型谐振腔滤波器, 以国内先进的 GaAs 半导体材料生长及光刻工艺设备和条件, 制作出相应的器件, 并对仿真和测试结果进行了比较.

### 1 四端口谐振腔滤波原理

四端口谐振腔的滤波原理是在两个波导之间放

收稿日期: 2004-06-21, 修回日期: 2004-07-24

基金项目: “十五”863 子项目的资助课题(2002AA31230).

作者简介: 蔡纯(1963-), 男, 上海人, 东南大学电子工程系博士研究生, 副研究员, 主要从事半导体集成光器件的研究.

Received date: 2004-06-21, revised date: 2004-07-24

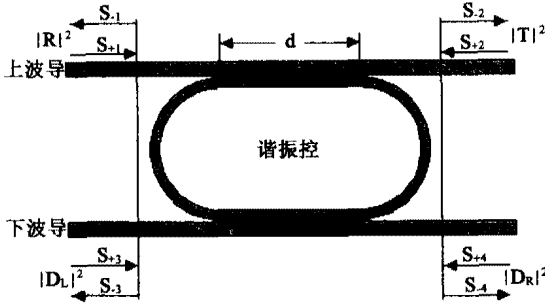


图1 谐振腔型滤波器示意图

Fig. 1 Schematic of the resonant filter

置若干个谐振腔,波导与谐振腔通过耦合产生能量交换,实现滤波<sup>[3]</sup>.图1为谐振腔型滤波器分析示意图.中间为相互作用区,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.谐振腔两边的对称位置为参考面,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、2处前向(向右)和反向(向左)传输光波的幅值,  $S_{+3}$ 、 $S_{-4}$ 、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.由于谐振模式的激励,在谐振腔中进行了能量的积累,而因存在损耗以及与上下波导的耦合作用,谐振腔中的谐振能量又逐渐耗散掉.设谐振腔中的谐振模式的幅值为  $a$ ,它与谐振腔中的谐振能量  $W$  的量级关系为  $|a|^2 = W$ ,在没有外部激励的情况下,由于存在材料吸收、散射损耗、功率耦合进波导等原因,谐振腔中的谐振模式幅值随时间呈现指数衰减,其基本关系式为<sup>[4,5]</sup>

$$\frac{da}{dt} = \left( j\omega_0 - \frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_e} \right) a + k_1 s_{+1} + k_2 s_{+2} + k_3 s_{+3} + k_4 s_{+4} \quad (1)$$

式中,  $\omega_0$  是谐振频率,  $\frac{1}{\tau_0}$  是损耗引起的谐振模式场幅值的衰减率,  $\frac{1}{\tau_e}$  和  $\frac{1}{\tau_e}$  则分别是谐振模式进入上下波导中的幅值衰减率,  $k_1$ 、 $k_2$  分别是上波导中的前向和反向波的输入耦合系数,  $k_3$ 、 $k_4$  则是下波导中输入耦合系数,谐振腔系统的输出波可写成下式

$$\begin{aligned} S_{-1} &= e^{-\beta d} (S_{+2} - k_2^* a) \\ S_{-2} &= e^{-\beta d} (S_{+1} - k_1^* a) \\ S_{-3} &= e^{-\beta' d} (S_{+4} - k_4^* a) \\ S_{-4} &= e^{-\beta' d} (S_{+3} - k_3^* a) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\beta$  和  $\beta'$  分别是上下波导的传播常数,且输入耦合系数为

$$k_i = \sqrt{\frac{1}{\tau_{ei}}} e^{j\theta_i} \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

$\frac{1}{\tau_{e1}} \left( \frac{1}{\tau_{e2}} \right)$  和  $\frac{1}{\tau_{e3}} \left( \frac{1}{\tau_{e4}} \right)$  分别是上下波导中的前向和反向波的衰减率,并满足以下的关系式

$$\frac{1}{\tau_{e1}} + \frac{1}{\tau_{e2}} = \frac{2}{\tau_e}, \quad \frac{1}{\tau_{e3}} + \frac{1}{\tau_{e4}} = \frac{2}{\tau_e} \quad (4)$$

$\theta_i$  是相移,以端口1为输入信号的端口,1端口的输入信号为时谐场,谐振腔滤波系统在稳态时由式(1)可得

$$a = \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau_{e1}}} e^{j\theta_1}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_e}} S_{+1} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)经整理可得

$$\frac{S_{-1}}{S_{+1}} \equiv R = -e^{\beta d} \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau_{e1}\tau_{e2}}} e^{j(\theta_1 - \theta_2)}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_e}} \quad (6)$$

$$\frac{S_{-2}}{S_{+1}} \equiv T = -e^{\beta d} \left( 1 - \frac{\frac{1}{\tau_{e1}}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_e}} \right) \quad (7)$$

$$\frac{S_{-3}}{S_{+1}} \equiv D_L = -e^{\beta d} \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau_{e1}\tau_{e4}}} e^{j(\theta_1 - \theta_4)}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_e}} \quad (8)$$

$$\frac{S_{-4}}{S_{+1}} \equiv D_R = -e^{\beta d} \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau_{e1}\tau_{e3}}} e^{j(\theta_1 - \theta_3)}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_e}} \quad (9)$$

$R$  表示在1端口处的反射波幅值与入射波幅值的比,  $T$  为2端口处前向传输波与1端口入射波的幅值比;  $D_L$ 、 $D_R$  分别表示3、4端口处前向、反向传输波与1端口入射波幅值的比,由于无法得出各端口光场幅值的精确的解析表达式,所以,数值分析和优化设计是研制光波导器件的重要手段.

## 2 数值仿真分析和设计

### 2.1 GaAs/AlGaAs 单模脊波导基本结构

GaAs/GaAlAs 平面波导谐振腔滤波器采用图2所示的脊形光波导结构. GaAs 为衬底材料,上下包层的组分为  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ ,波导芯层为  $i\text{-GaAs}$ . Al 组分  $x$  选择为 0.1,这样光波导对本征模场有较强的限制,而包层的模场分布较弱,工作波长为 1.55mm 时包层与芯层折射率分别为 3.33 与 3.37. 为获得单模波导,采用迦辽金法计算了光的模场分布,确定

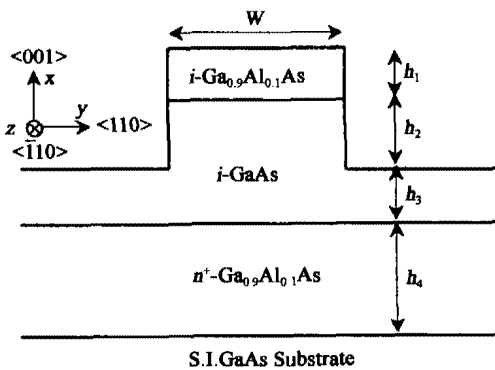


图 2 GaAs/GaAlAs 脊形波导结构  
Fig. 2 Structure of GaAs/GaAlAs ridge wave-guide

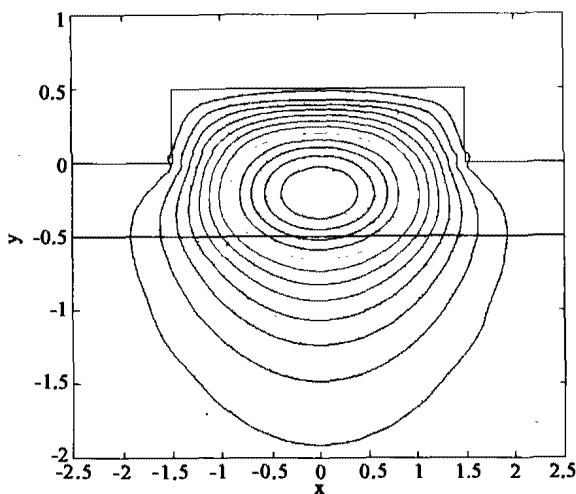
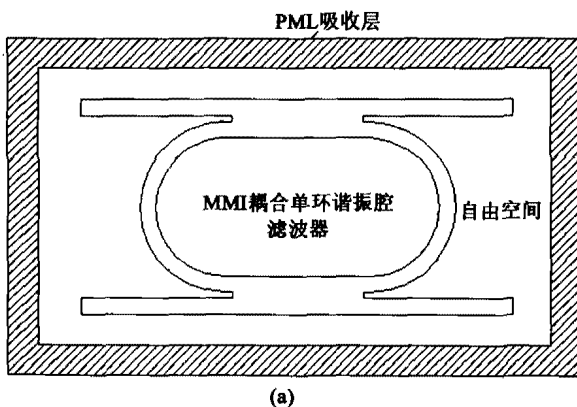
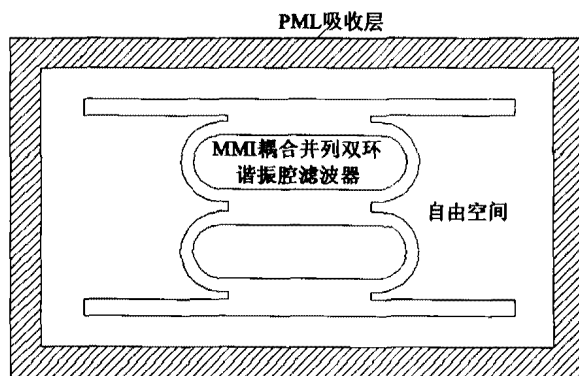


图 3 GaAs/GaAlAs 单模脊形波导模场  
Fig. 3 Mode filed of single mode of GaAs/GaAlAs ridge wave-guide

出脊形波导的尺寸为:  $w = 3\text{mm}$ 、 $h_1 = 0.2\text{mm}$ 、 $h_2 + h_3 = 0.9\text{mm}$ 、 $h_4$  为  $1.5\text{mm}$ 、 $h_2 = 0.3\text{mm}$ 、 $h_3 = 0.6\text{mm}$ 。图 3 所示为用迦辽金法 [6] 计算出的光的模场图, 图中的尺寸单位为 mm。



(a)



(b)

图 4 (a) MMI 耦合单环行波型谐振腔滤波器仿真示意图 (b) MMI 耦合并列双环行波型谐振腔滤波器仿真示意图  
Fig. 4 (a). Schematic for simulation of MMI coupling optical filters of traveling wave with single ring resonator; (b). Schematic for simulation of MMI coupling optical filters of traveling wave with dual ring resonators

## 2.2 环形谐振腔滤波器的时域有限差分数值仿真

本文采用 2D-FDTD 算法, 在满足迭代稳定性和收敛性的前提下, 设计 PML (Perfectly Matched Layer) 吸收边界层 [7], 如图 4 所示. 设 GaAs/GaAlAs 为本征半导体, 其介电常数  $\epsilon$  为定常数 (在  $1550\text{nm}$  处为  $11.77$ ), 近似为各向同性, 忽略材料的电导率和磁阻率。

在设计 PML 吸收层时考虑到光器件的外层为自由空间, 为简化差分公式和减少计算量, PML 吸收层采用标准中心差分, 这样 PML 吸收媒质的磁阻率可设为 0, 只需选择合适的电导率分布  $\sigma_i(i)$ ,  $i = x, y$ . 为尽可能减少 PML 层的反射系数, 经反复多次的验算, PML 吸收媒质的格点数 (厚度) 为 16 个格点较为理想. 取电导率分布函数为  $\sigma_i(i) = \sigma_{\max} \left(\frac{i}{\delta_{\max}}\right)^4$ ,  $\sigma_{\max}$  为吸收媒质最外层的电导率,  $\delta_{\max}$  为 PML 吸收媒质的厚度, 设定内表面的反射系数  $R(0) = \exp\left[-\frac{2\delta\sigma_{\max}}{5\epsilon_0 c}\right]$  为  $0.1\%$ , 由此可定出  $\sigma_{\max}$ . 基于前面的算法和确定的参数, 对采用 MMI 耦合、对称结构的单环和并列双环耦合行波型谐振腔滤波器进行了仿真分析. 两种谐振腔滤波器中所用的 MMI 耦合部分的宽度均为  $2\mu\text{m}$ , 滤波器的上下波导的横截面尺寸相同均为单模波导 (波导宽为  $3\mu\text{m}$ ), 在谐振腔尺寸仿真确定后, 仿真了不同 MMI 耦合段长度对谐振腔与波导的功率耦合稳定产生的作用 [8].

## 2.3 单环谐振腔滤波器仿真结果分析

光从端口 1 输入, 在器件的任一端口 (此处定为 3 端口) 对输出光场幅度抽样, 通过离散傅立叶 (Fourier) 变换, 可得到其归一化功率谱图. 通过仿真确定环形谐振腔波导宽度为  $3.2\mu\text{m}$ , 弯曲段为半径

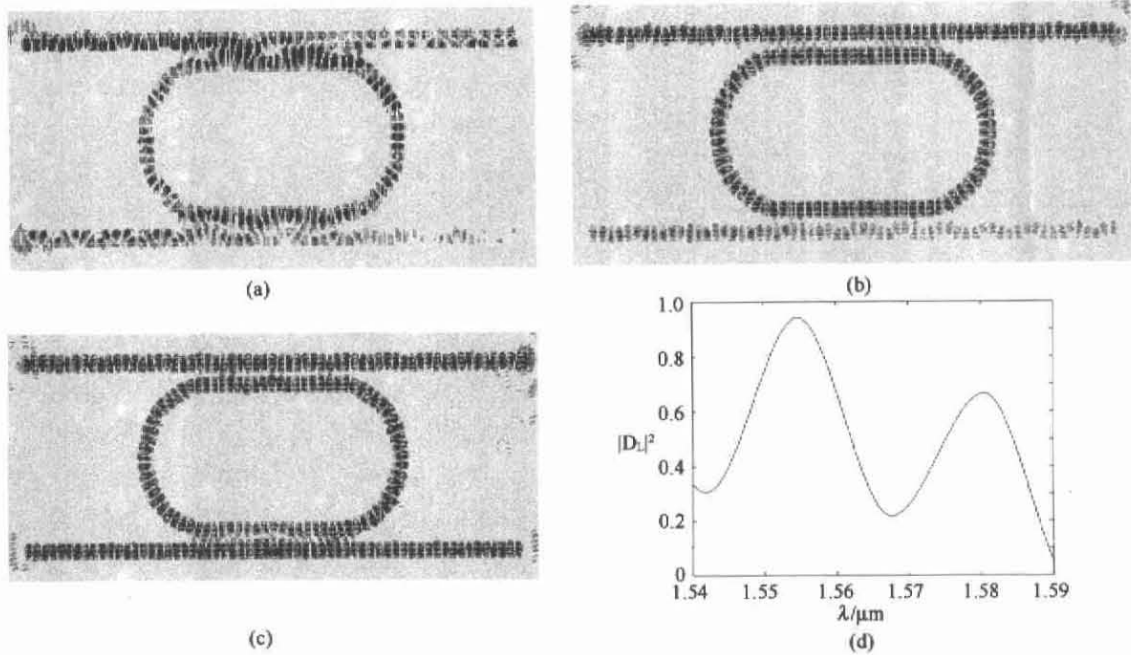


图5 光在不同 MMI 耦合长度行波型单环谐振腔中的传播 (a) (b) (c) 及对应 (c) 图端口 3 归一化功率谱图  
 Fig. 5 (a) (b) (c) optical transmissions through different MMI coupling length of optical filters with traveling wave single ring resonator; (d) normalized optical power of output port 3 in (c)

为  $12.0\mu\text{m}$  的半圆弧。图 5 为光在不同 MMI 耦合长度中的传播, 由图可见光是单模传输的。图 5(a) 给出了 MMI 耦合段的长度为  $9\mu\text{m}$  时的光传播图, 由图可见光在上下波导和环形谐振腔中的传播不稳定; 图 5(b) 给出了 MMI 耦合长度为  $8\mu\text{m}$  时的光传播图, 由图可见, 光在上波导和谐振腔中的传播已经较为稳定, 而在下波导中还不稳定; 图 5(c) 给出了 MMI 耦合长度为  $8.5\mu\text{m}$  时的光传播图, 由图可见 MMI 的长度为  $8.5\mu\text{m}$  时光在上下波导和谐振腔中均稳定传输。(d) 为相应的功率谱图, 可见, 在约  $1.568\mu\text{m}$  附近形成了滤波。

#### 2.4 并列双环谐振腔滤波器仿真结果分析

图 6 为光在 3 种不同 MMI 耦合长度并列双环谐振腔滤波器中的传播, 光从端口 1 输入, 在器件端口 4 对输出光场幅度抽样, 由图可见, 光是单模传输的。仿真计算得到双环谐振腔波导宽为  $3\mu\text{m}$ , 弯曲段为半径为  $10\mu\text{m}$  的半圆弧。图 6(a) 给出了 MMI 耦合段长为  $7.5\mu\text{m}$  时的光传播图, 由图可见光在上下波导和谐振腔中的传输不稳定; 图 6(b) 给出了 MMI 耦合段长为  $6.5\mu\text{m}$  时的光传播图, 由图可见, 光在上波导和谐振腔中的传输的稳定性较图 6(a) 有了改善; 图 6(c) 给出了 MMI 耦合段长为  $7.0\mu\text{m}$  时的光传播图, 从光传播图可见, MMI 的耦合长度为  $7.0\mu\text{m}$  时光在上下波导和谐振腔中传输均较为稳定。

图 6(d) 为相应的功率谱图, 在约  $1.563\mu\text{m}$  处有滤波且滤波波形比单环的好。

### 3 环形谐振腔滤波器实验结果及分析

制作光波导器件, 涉及到多种工艺和技术, 器件所用的 GaAs/GaAlAs 材料用分子束外延生长。设计要求掩模版的线宽公差为  $\pm 0.1\mu\text{m}$ , 但实际器件图形阳版公差最大处达  $\pm 0.4\mu\text{m}$ , 这是影响器件性能的主要因素之一。

湿法刻蚀 GaAs/GaAlAs 波导主要采用  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  方案, 属于各向同性腐蚀, 因而容易产生钻蚀, 所得脊形光波导的端面电镜照片如图 7 所示, 呈梯形结构, 角度一般为  $50^\circ$ , 而原设计为直脊形结构。梯形截面脊形光波导对光的横向限制减弱, 光波导的弯曲损耗增大, 波导尺寸增大, 使单模波导易变成少模或多模波导, 这是影响测试结果和器件性能的另一个主要因素, 不过, 湿法腐蚀的腐蚀面以及脊形光波导的侧壁平整度高, 散射损耗小。

图 8(a) 为单环谐振腔滤波器的扫描电镜照片, (b) 为在端口 3 处测得的光谱特性曲线; 图 9(a) 为双环谐振腔滤波器的扫描电镜照片, (b) 为在端口 4 处测得的光谱特性试曲线, 实际测试结果和仿真计算结果基本符合, 实测波峰的位置与仿真计算略有偏移。

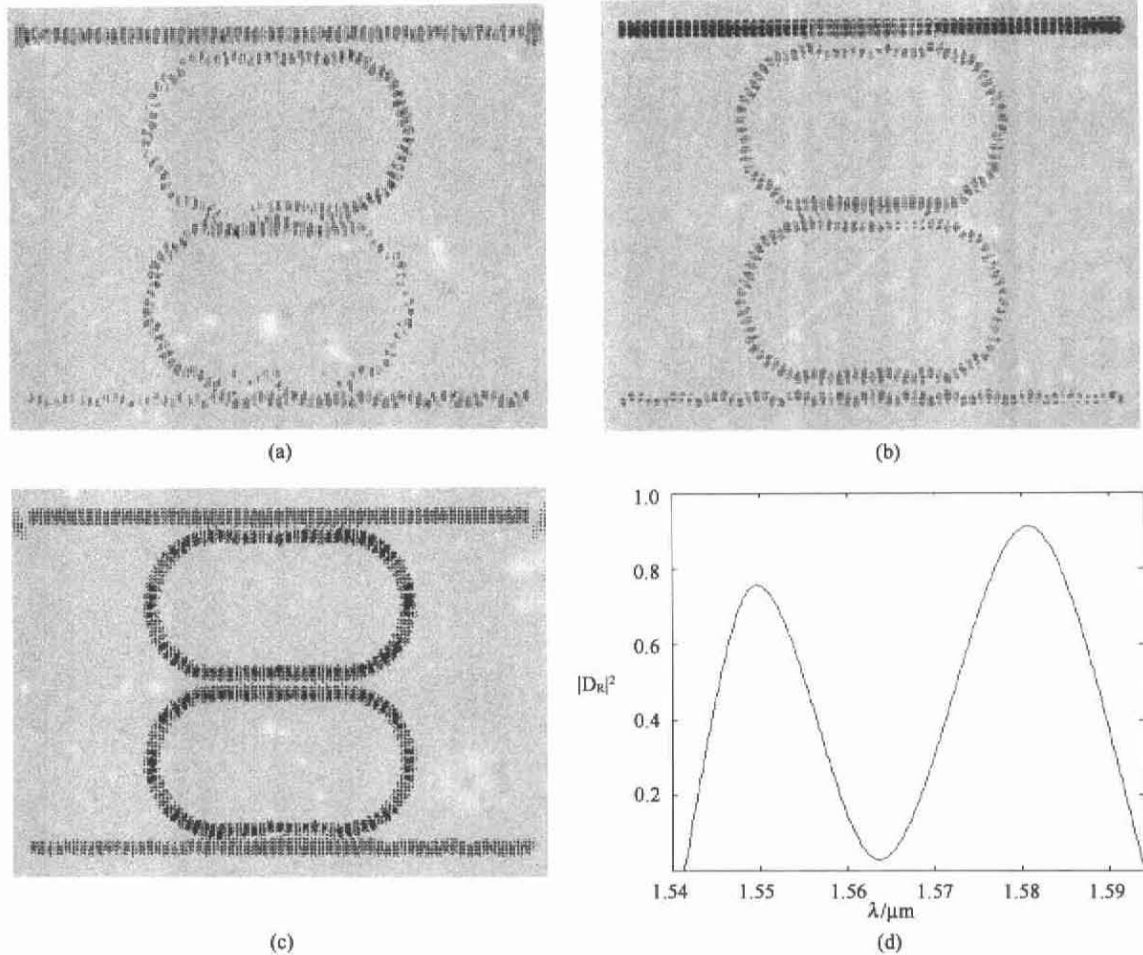


图 6 光在不同 MMI 耦合长度行波型双环谐振腔中的传播 (a) (b) (c) 及对应 (c) 图端口 4 归一化功率谱图  
 Fig. 6 (a) (b) (c) Optical transmissions through different MMI coupling length of optical filters of traveling wave with dual ring resonator; (d) normalized optical power of output port 4 in (c)

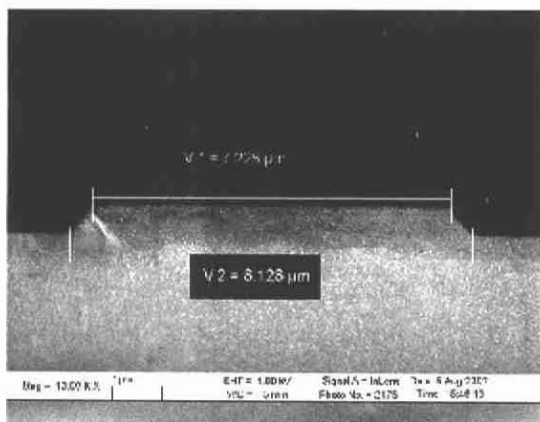


图 7 环形谐振腔滤波器端口横截面 (模斑转换段 SSC) 扫描电镜照片  
 Fig. 7 Cross section SEM photograph of optical filters' ports (SSC)

数值仿真与器件测试结果在波形和滤波位置出现偏差的原因包括: (1) 制作器件的掩模版尺寸超

差; (2) 湿法刻蚀容易产生钻蚀, 使设计的直脊形结构波导呈梯形结构, 单模波导易成少模或多模波导, 这是影响测试结果和器件性能的另一个主要因素; (4) 波导芯层和包层的生长厚度有误差 (3) FDTD 数值仿真存在截断误差。

#### 4 结论

采用时域有限差分 (2D-FDTD) 法, 对 MMI 耦合结构单环和并列双环谐振腔滤波器进行了数值仿真分析, 确定了波导和谐振腔尺寸, 设计了这两种环形滤波器的 MMI 耦合长度. 并结合国内先进的半导体加工工艺, 制作了单环和并列双环谐振腔滤波器. 经测试发现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. 我们认为控制器件掩模版尺寸的公差, 改进平面波导光刻工艺 (湿法刻蚀改为反应离子刻蚀 RIE) 以及精确控制 GaAlAs/GaAs 材料外延生长工艺参数, 环形谐振腔滤波器的滤波效果会

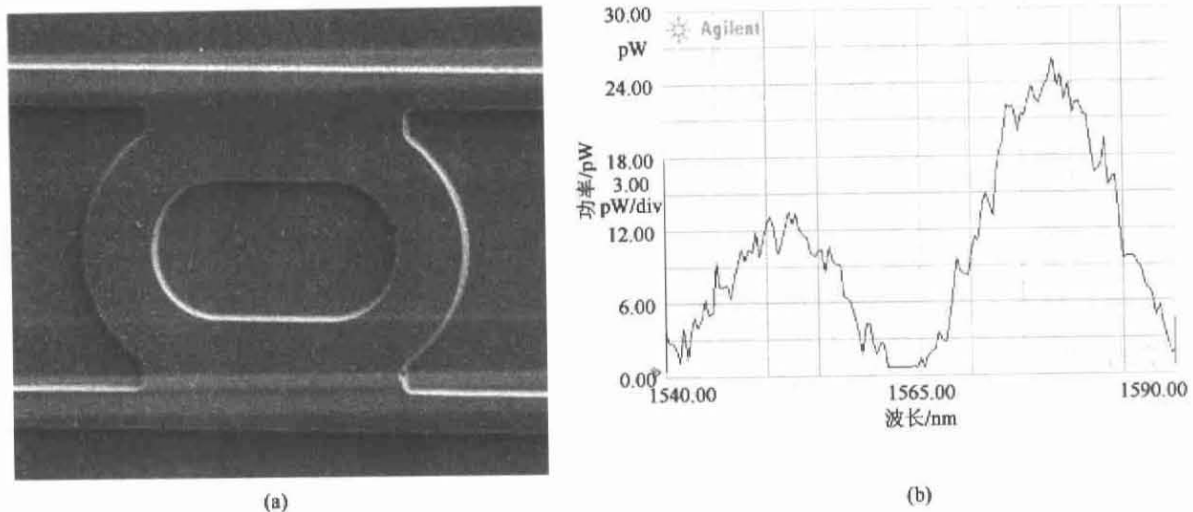


图8 (a)单环谐振腔滤波器扫描电镜图(b)在端口3测试的功率谱图

Fig. 8 (a) SEM photograph of optical filters with single ring resonators; (b) measured optical power of output port 3 in (a)

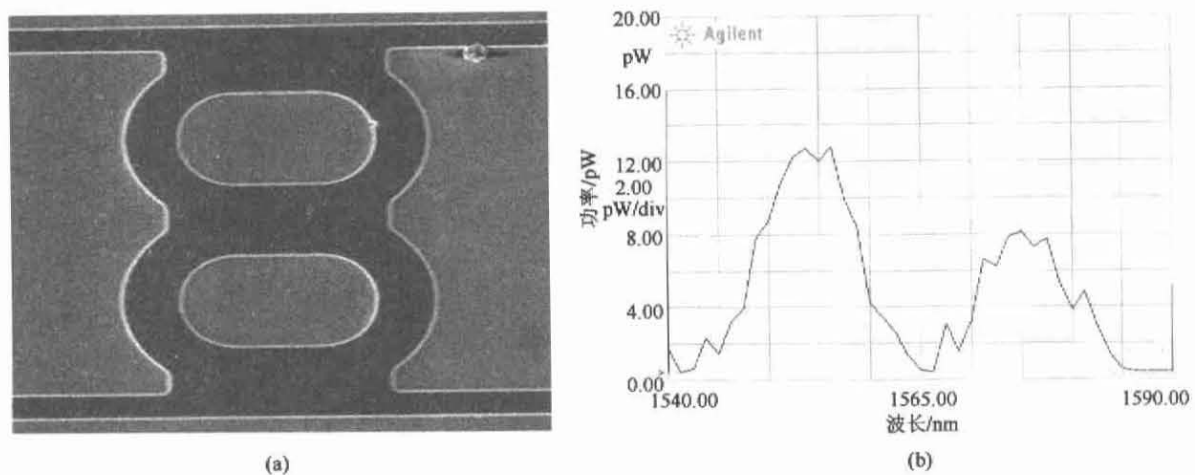


图9 (a)双环谐振腔滤波器扫描电镜图(b)在端口4测试的功率谱图

Fig. 9 (a) SEM photograph of optical filters with dual ring resonators; (b) measured optical power of output port 4 in (a)

得到进一步的改善.

## REFERENCES

- [1] Tong San Koh, Yuan Ping, Harold N. Effects of electric field on the excitation linewidth broadening due to scattering by free carriers in semiconducting quantum-well structures [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1997, **33**(10): 1774—1778.
- [2] Dominik G Rabus, Michael Hamacher. MMI-coupled ring resonators in GaInAsP-InP [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(8): 812—814.
- [3] Yariv A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. *IEEE Electron. Lett*, 2000, **36**: 321—322.
- [4] Little B E, Chu S T, Haus H A, et al. Microring resonator channel dropping filters [J]. *IEEE J. Lightwave Technol*, 1997, **15**(6): 988—997.
- [5] Manolatu C, Khan M J, Fan Shanhui, et al. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1999, **35**(9): 1322—1332.
- [6] Weisshaar A, Li J, Gallawa R L, et al. Vector and quasi-vector solutions for optical waveguide modes using efficient Galerkin's method with Hermite-Gauss basis functions. [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 1995, **13**(8): 1795—1800.
- [7] Berenger J P. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *J. Comput Phys*, 1996, **127**(2): 363—379.
- [8] Leuthold J, Joyner C H. Multimode interference couplers with tunable power splitting ratios. [J]. *IEEE J. Lightwave Technol*, 2001, **19**(5): 700—707.