

文章编号: 0253-2239(2004)09-1265-4

一种通带平坦的粗波分复用/解复用器件的研制*

刘 青 马卫东 王文敏 胡国华 许远忠

(武汉邮电科学研究院光迅科技有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 随着粗波分复用(CWDM)系统在城域网和接入网中日益广泛的应用,人们对粗波分复用/解复用器的研究也逐渐展开。报道了一种 8 通道波长间隔为 20 nm 的粗复用/解复用器。该器件基于阵列波导光栅(AWG)原理设计,利用平面光波导技术(PLC)制作,采用多模干涉输入结构和“S”形阵列波导结构,实现了较宽的通带宽度和较低的串扰。实验测得 1 dB 带宽大于 10 nm,相邻串扰大于 24 dB,非相邻串扰大于 32 dB。介绍了其设计原理和制作过程,给出了光束传播法(BPM)数值模拟结果,并和实验结果进行了对比。

关键词: 平面光波导;粗波分复用器;阵列波导光栅;带宽;串扰

中图分类号: TN25 文献标识码: A

The Research of Coarse Wavelength Division Multiplexer Based on Array Waveguide Grating with Broadened Pass-Band and Low Crosstalk

Liu Qing Ma Weidong Wang Wenmin Hu Guohua Xu Yuanzhong

(Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan Research Institute of Posts
and Telecommunications, Wuhan 430074)

(Received 15 September 2003; revised 5 December 2003)

Abstract: A CWDM with a 20 nm spacing and 8 channels based on AWG is successfully fabricated on 4-inch Si wafer using 0.75% Δ silica-based waveguides by planar lightwave circuit (PLC) technology. Both simulations and measured results show that broadened pass-band (1 dB bandwidth is above 10 nm) and low crosstalk (no less than 24 dB) are realized by applying a short multimode interference (MMI) structure at the end of input waveguide. The design and fabrication process are introduced, and the simulations and measured results are discussed.

Key words: plane lightwave circuit; coarse wavelength division multiplexer; array waveguide grating; bandwidth; crosstalk

1 引 言

近年来,密集波分复用(DWDM)技术已经广泛应用在高速宽带骨干网中。随着密集波分复用技术的发展以及密集波分复用系统的大量铺设,原先限制传输发展的瓶颈逐渐由骨干网转移到城域网和接入网。在这种短途应用中,采用粗波分复用(Coarse wavelength division multiplexing, CWDM)技术相

对于采用密集波分复用技术可以节省 30% 以上的成本^[1]。这是由于粗波分复用技术具有大的波长间隔和大的通带宽度,降低了对激光器、滤波器及复用解复用器等器件的要求,大幅降低了制造成本。

粗波分复用/解复用器作为粗波分复用系统中的关键器件,其研发受到越来越多的重视,国际电信联盟关于粗波分复用的标准 ITU G. 694. 2 已于 2002 年 5 月发布。目前,基于薄膜滤波片技术制作的粗波分复用/解复用器是一种比较成熟的粗波分复用器。基于阵列波导光栅的粗波分复用/解复用器,与薄膜滤波片技术相比具有体积小、集成度高、性能稳定可靠等卓越特点,也引起了人们的普遍关注。目前国内有关基于阵列波导光栅的粗波分复

* 国家高技术研究发展计划(863)(2001AA312020)、武汉市科技计划(20021005130-06)资助课题。

E-mail: lqing@wri.com.cn

收稿日期:2003-09-15;收到修改稿日期:2003-12-05

用/解复用器方面的报道还很少。

本文提出了一种基于阵列波导光栅的具有宽带频谱响应的粗波分复用/解复用器的设计方案,并经过光束传播法算法优化了带宽和串扰等指标;通过实验制备了若干个基于阵列波导光栅的粗波分复用/解复用器,测试表明,器件具有较宽的带宽和较低的串扰,并和光束传播法的数值计算结果吻合得很好。

2 原理与设计

2.1 原理

图 1 给出了这种基于阵列波导光栅设计的粗波分复用/解复用器结构示意图,它由输入/输出波导、平板波导和阵列波导组成。复用光波进入某一输入波导后,在输入平板波导内衍射并耦合进入长度差为 ΔL 的阵列波导区,光程差 ΔL 是一常量,一般选择为中心波长 λ_c (对应中心频率为 f_c) 的 m 倍 (m 为整数,又称为衍射级数)。正是因为阵列波导的这种设置,使经输入波导进入阵列波导的不同波长的光信号,经过阵列波导的色散作用,引起波前倾斜,最终在输出波导上的不同位置实现了不同波长信号的空间分离(解复用)。反之,完成复用功能。从傅里叶光学来分析,阵列波导光栅中的成像过程实质上是两次衍射的过程,就是对光场的复振幅分布进行了两次傅里叶变换的过程。第一次傅里叶变换是把光场的空间分布变成空间频率的分布,第二次傅里叶变换是将空间频率分别重新组合还原到光场的空间分布。聚焦光场是输入场的完整“复制”^[2]。

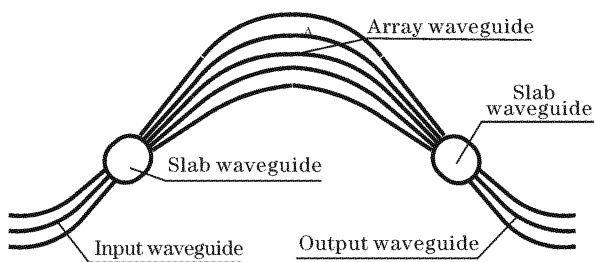


Fig. 1 Layout of AWG structure

2.2 设计

阵列波导光栅各通道波长都满足所谓衍射光栅方程,而满足该方程的衍射级数 m 和波长 λ 又有许多不同的组合。定义自由光谱范围 Δf_{FSR} 为相邻衍射级数对应的频率差,它限制了最大可能的通道数目 N ,即^[3]

$$\Delta f_{\text{FSR}} \approx \frac{f_c}{m} \geq N \Delta f_{\text{ch}}, \quad (1)$$

由(1)式可以得到中心波长 1540 nm,频率间隔 2500 GHz(波长间隔 20 nm)的阵列波导光栅的衍射级数必须满足下式

$$m \leq \frac{f_c}{N \Delta f_{\text{ch}}} \approx 10. \quad (2)$$

由于粗波分复用频率间隔 Δf_{ch} 非常大,衍射级数 m 只能取 10 以下的整数,从而带来了两方面的问题:

1) 如果衍射级数恰好满足(2)式,取为 9 或者 8,那么自由光谱范围 Δf_{FSR} 刚好略大于 $N \Delta f_{\text{ch}}$,边缘通道将受到接近 3 dB 的插损,对插损均匀性和插损产生很大的影响。因此,在粗波分复用中,要得到较好的通道能量均匀性,应增大自由光谱范围 Δf_{FSR} ,即减小衍射级数 m ;

2) 选取小的衍射级数 m ,意味着相邻阵列波导长度差 ΔL 小,会使得图 1 所示的阵列波导结构不容易设计。这主要是因为太小的 ΔL 不能保证相邻阵列波导间距足够大,或者设计出来的满足条件的阵列波导数目非常有限,对器件的串扰特性和插损等重要指标有很大的影响。

为了解决上述矛盾,采用了“S”形阵列波导结构,如图 2 所示。这种结构首先由 Adar 等^[4]提出,并将其应用在 1300 nm/1550 nm 波长的复用和解复用器中,本文将这种阵列波导结构应用于 20 nm 波长间隔的粗波分复用/解复用器。每根阵列波导由四段直波导和三段圆弧波导组成,左右两边反对称,中间是一段同心圆弧,相邻阵列波导长度差 ΔL 由这段同心圆弧产生。

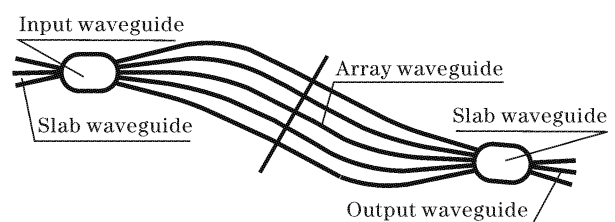


Fig. 2 Scheme of "S" AWG

分析反对称阵列波导的一侧,应满足两方面的限制条件:

1) 各阵列波导经过两根直波导和一段圆弧波导的调整后平行、等间距的输出在面 AB 上,间距为 Δh ;

2) 阵列波导长度成等差数列,只有这样才能保证每根阵列波导除中间一段圆弧外长度相等,仅在中间同心圆弧部分产生长度差 ΔL 。

阵列波导长度差在中间一段同心圆弧产生,同心角为

$$\theta = \Delta L / \Delta h. \quad (3)$$

这种结构的优点在于： ΔL 比较小的情况下，能保证相邻阵列波导间距足够大，并可以有尽可能多的阵列波导数目。

为了使阵列波导光栅应用于粗波分复用系统必须具有通带平坦，目前有多种方法使阵列波导光栅器件的波长响应展宽^[5,6]。通过在阵列波导光栅输入波导末端加一个多模干涉耦合器，结合输出端的单模输出波导实现阵列波导光栅平坦的光谱响应是一种比较成熟的技术^[6]。

其原理是，利用多模干涉结构激励出高阶模，当在多模干涉区输出端二阶模与基模的相位相差 π 的奇数倍时，即

$$(\beta_0 - \beta_2)L_{\text{MMI}} = (2p + 1)\pi, \quad (4)$$

$$(p = 0, 1, 2, \dots)$$

多模干涉区输出场型呈“驼峰”形状，如图 3 所示。 β_0 和 β_2 分别为多模干涉区基模和二阶模的传播常量。因为阵列波导光栅输出波导中聚焦光场是输入场的完整“复制”，这种“驼峰”形状将产生希望的平坦通带。“驼峰”的形状和中心凹陷的深度可通过改变多模干涉区的形状来控制。

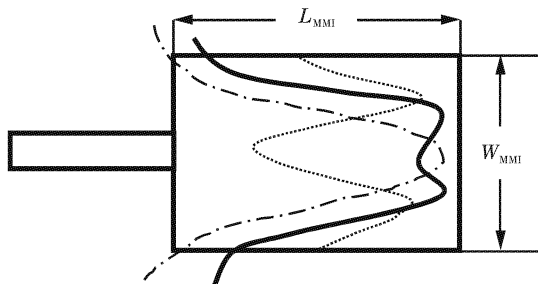


Fig. 3 Field distribution of different order modes in MMI structure (dot dash line indicates basic mode, dot line indicates the second order mode, solid line indicates overlap of modal field)

3 实验与分析

按照上面的设计制作了基于硅基二氧化硅平面光波导技术的粗波分复用芯片，如图 4 所示。在 4 英寸(约合 102 mm)硅片上用热氧化法生长出约 14 μm 厚的二氧化硅层作为下包层，再用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术淀积 6 μm 芯层(芯层与包层折射率差为 0.75%)，利用光刻以及反应离子刻蚀 (RIE) 技术将掩模板上的图形转移到芯层上，最后用等离子体增强化学气相沉积淀积出上包层。芯片样品各层的参量如表 1 所列。

Table 1 Structure values of AWG chip

Layer	Heigh / μm	Refractive index
Lower layer	14	1.4450
Core layer	6.0	1.4459
Upper layer	14	1.4450

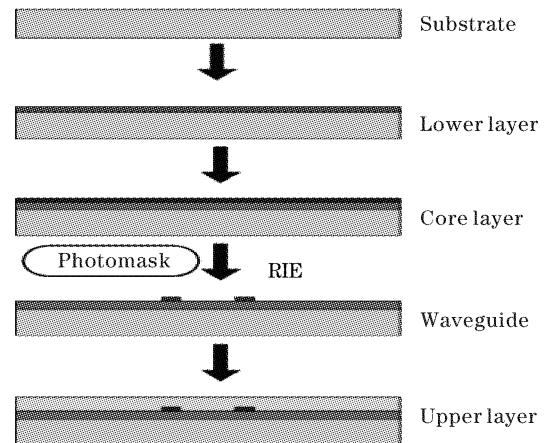


Fig. 4 Fabrication process of AWG chip

经过抛光、切片和封装后，用 Anritsu MS9710C 光谱仪对制作的粗波分复用芯片进行了测试，并利用光束传播法对器件的光谱响应进行了模拟计算^[7]。8 个通道的输出光谱模拟结果及芯片测试结果如图 5 所示。

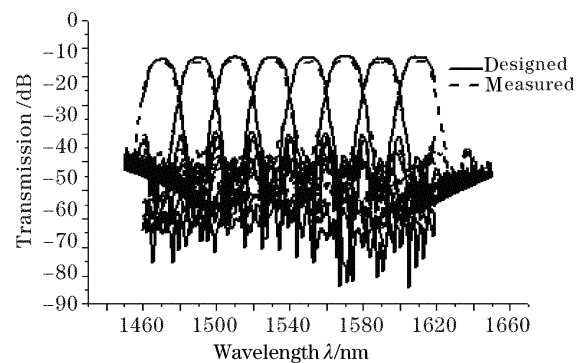


Fig. 5 Spectral response of CWDM

图 6 给出了粗波分复用芯片单个通道(第四输出通道)的输出光谱测试曲线与模拟曲线。从图 5、

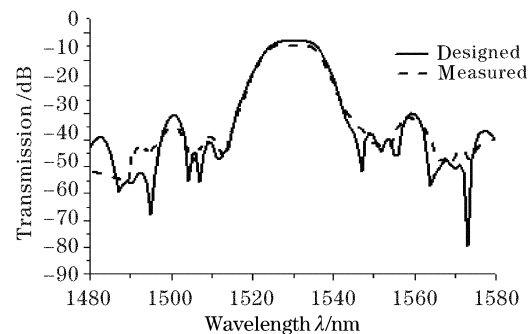


Fig. 6 Spectral response of single channel

图 6 可以看出实验结果与模拟结果吻合得非常好。

芯片的各项指标如表 2 所列。光谱具有平顶特性,1 dB 带宽超过波长间隔 50%以上,这是因为输入波导末端加入的多模干涉结构所致。理论曲线和实验曲线在横向非常吻合,说明器件的各通道中心波长和理论设计一致。实线所示的测试结果和虚线所示的模拟结果相比,测试结果的插损较大,这种差异主要来源于模拟结果没有考虑材料本身的传输损耗及芯片与光纤的耦合损耗。材料的传输损耗以 0.05 dB/cm 估算,整个芯片的长度约为 4 cm,芯片与光纤的耦合损耗通常为 0.4 dB,模拟的插损值还应该加上约 0.6 dB 的额外损耗。从表 2 可以看出实验测得相邻串扰优于 24 dB,非相邻串扰优于 32 dB,这些结果比模拟结果小,分析其差异主要来源于工艺,包括:1) 制备过程中产生的缺陷,引起有效折射率的变化、波导宽度、厚度和组分的局域变化等,使传播常量畸变,导致相位传输的误差,最后使串扰增加;2) 光波在粗糙的波导边缘被散射,使得输出波导接收端焦场两边出现次级峰增强。这使大部分焦场耦合进对应输出波导的同时,部分光场耦合进邻近波导,从而增大光信号的串扰。

Table 2 Designed and measured parameters

Parameters	Designed value	Measured value
Min. insertion loss /dB	4.6	5.1
Max. insertion loss /dB	5.8	6.7
Insertion loss uniformity /dB	≤1.0	≤1.2
1 dB bandwidth /nm	≥9.5	≥10
Adjacent crosstalk /dB	≥29.8	≥24.3
Non-adjacent crosstalk /dB	≥42.3	≥32
Polarization depend. /dB	NA	≤0.51
Ripple /dB	0.3	0.4

制作的粗波分复用芯片的尺寸为 40 mm×6 mm,封装后尺寸约为 70 mm×10 mm,是传统的基于介质薄膜滤波片技术的同等通道数的粗波分复

用器件尺寸的 8%左右,这些为基于粗波分复用器件或系统的集成奠定了基础,也是我们用平面光波导(PLC)技术制作粗波分复用器件的优势之一。

结论 根据阵列波导光栅的原理,设计并制作出了通道间隔为 20 nm 的粗波分复用/解复用器。该器件的最小插损为 5.1 dB,1 dB 带宽大于 10 nm,相邻和非相邻通道串扰分别大于 24 dB 和 32 dB,实现了宽带宽和低串扰,并且模拟结果和实验结果基本吻合,有望在粗波分复用系统中获得较大的应用。

参 考 文 献

- 1 Santanu Das, *Coarse Wavelength Division Multiplexing-Riding the Wave of Low Cost for Metro and Access*. Business Briefing: Global Optical Communications, 2002
- 2 Lu Ping, Liu Deming, Cao Qian *et al.*. Theoretical analysis of arrayed-waveguide grating as a linear system and its optimal structure design. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(7): 804~808 (in Chinese)
- 3 Smit M K. Phase-based WDM-devices: principles, design and applications. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1996, **2**(2): 236~250
- 4 Adar R, Henry C H, Dragone C *et al.*. Broad-band Array multiplexers made with silica waveguides on silicon. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(): 212~219
- 5 Wang Wenmin, Ma Weidong, Cheng Guang *et al.*. Filtering out the first-order mode and its application in Y-branch and MMI. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(11): 1330~1334 (in Chinese)
- 6 Amersfoot M R, Soole J B D, Leblanc H P *et al.*. Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5): 449~451
- 7 Chen Guang, Ma Weidong, Wang Wenming *et al.*. 2-D wide-angle FD-BPM based on the square root operator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(11): 1325~1329 (in Chinese)