

50/100 GHz AWG 型光学梳状滤波器的设计与制备*

窦金锋 韩培德 胡雄伟

(中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

摘要: 以 Si 基 SiO₂ 平面光波导为基础, 设计并制备了 50/100 GHz AWG 型光学梳状滤波器. 制备得到的 AWG 型光学梳状滤波器可以覆盖 1520 ~ 1585 nm 的波长范围, 共有 160 个信道. 功率输出不均匀度 < 0.5 dB, 插入损耗 < 8 dB, 相邻通道的串扰 > 13 dB, 在距离中心频率最远的信道, 输出频率偏离 ITU 标准 15 GHz. 分析了影响器件串扰和信道频率偏移的原因, 并提出了相应的解决办法.

关键词: AWG; 光学梳状滤波器; 平面光波导; Si 基 SiO₂

PACC: 4280C; 4280F; 4280L

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)05-1020-04

1 引言

光学梳状滤波器是一类特殊的光波分复用器件, 它可以将一路输入的多波长光信号分成奇偶互补的两路光信号, 使每一路光信号中的信道间隔增倍, 从而降低其后面级联的光波分复用器件对信道间隔的要求. 由于使用光学梳状滤波器可以方便、经济地对现有的 WDM(波分复用) 系统进行升级, 成倍地提高现有光通信系统的信息传送能力, 它已经成为 DWDM(密集波分复用) 系统中的一类关键器件. 实现光信号的梳状滤波功能有多种技术途径, 光学梳状滤波器按其制备方法可分为: 光纤布拉格光栅型^[1]、双折射晶体型^[2]、迈克尔逊干涉仪型^[3]、马赫曾德干涉仪型^[4,5] 等, 其基本原理大都是利用双光束或多光束干涉来实现光学梳状滤波. 2000 年, Huang^[6] 等人首次提出利用 AWG(array waveguide grating) 输出光谱的周期性来制备光学梳状滤波器, 并用 BPM (beam propagation method) 数值模拟验证了其可行性. AWG 型光学梳状滤波器 (AWGOI: array waveguide grating based optical interleaver) 采用平面光波导技术制备, 与其他体型器件相比具有体积小、可靠性高、适于批量生产以及便于和其他光电器件实现功能集成等优点. 此外, AWGOI 还具有独特的通道数目可拓展性.

自 2000 年, Huang^[6] 等人从理论上提出 AWGOI 至今, 未见有更详尽的相关研究报道. 本文以 Si 基 SiO₂ 平面光波导为基础设计并制备了 50/100 GHz AWGOI, 给出了器件性能的测试结果. 光学梳状滤波器的应用特点对 AWG 的性能提出了更高要求, 本文结合器件的制备与测试工作, 对此做出了比较详细的分析, 并针对如何实现这一要求提出了相应的解决方法.

2 设计与模拟

AWGOI 的工作原理及设计原则与普通 AWG^[7] 基本相同, 其特殊之处在于用作光学梳状滤波器的 AWG 其输出光谱必须要满足周期性, 即:

$$f_{\text{FSR}} = N f_{\text{ch}} \quad (1)$$

其中 f_{FSR} 为 AWG 的自由光谱区; f_{ch} 为信道间隔; N 为输出通道的数目. 此外, 为了使 AWGOI 输入、输出信号的信道间隔与 ITU 标准一致, 其输出通道的数目应该为 2^n , 而且要对称地分布在输出平板波导焦平面中心的两侧, 以尽量减小各通道功率输出的不均匀性.

Si 基 SiO₂ 光波导由于具有损耗低、与光纤之间的耦合效率高、长期稳定性好等优点而被广泛应用于制备各种平面光波导器件^[8]. 本文就以 Si 基 SiO₂ 光波导为基础, 设计制备了 50/100 GHz AWGOI,

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2001AA312130)

2004-07-19 收到, 2004-11-04 定稿

设计参数见表 1. 其中 AWG 的自由光谱区仅为 100 GHz, 由此计算得到相邻阵列波导之间的长度差 L 为 2056. 24 μ m. AWG 的图形设计为 型结构, 如图 1 所示. 采用这种结构, 可以在不减小阵列波导最小弯曲半径的前提下, 使器件的整体结构更加紧凑, 从而有效地减小芯片的尺寸.

表 1 50/ 100GHz AWGOI 的设计参数

Table 1 Design parameters of 50/ 100GHz AWGOI

信道间隔, f	50GHz
输出波导最小间距, d_o	24 μ m
相邻阵列波导长度差, L	2056. 24 μ m
衍射级数, m	1923
阵列波导最小间距, d_a	24 μ m
光栅圆半径, R	1079. 17 μ m
自由光谱区, FSR	100GHz
阵列波导数, N	15
条形波导有效折射率, n_c	1. 4519
平板波导有效折射率, n_s	1. 4543
条形波导群折射率, n_g	1. 4579

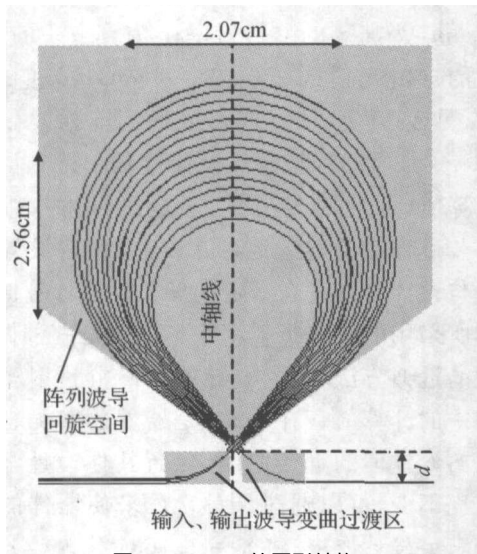


图 1 AWGOI 的图形结构
Fig. 1 Layout of AWGOI

根据表 1 中提供的设计参数, 利用 BPM 方法对器件的传输谱进行了计算机模拟, 模拟结果如图 2 所示. 模拟结果显示, 器件的插入损耗为 2. 8dB, 串扰大于 50dB.

3 实验结果与分析

首先用火焰水解法在 100mm Si 片上分别沉积 10 μ m 的 SiO₂ 下包层和 6 μ m 的 GeO₂-SiO₂ 芯层, 然后在芯层上通过光刻和 ICP 刻蚀技术得到所设计

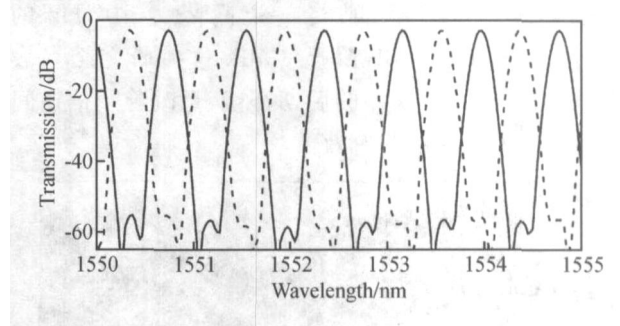


图 2 50/ 100GHz AWGOI 传输谱的 BPM 模拟结果
Fig. 2 Transmission spectra of 50/ 100GHz AWGOI simulated by BPM method

的 AWGOI 的波导结构, 最后再用火焰水解法沉积一层 10 μ m 的 SiO₂ 上包层. 其中输入、输出波导和阵列波导的截面尺寸为 6 μ m \times 6 μ m, 芯区与上下包层的折射率差为 0. 75%, 波导最小弯曲半径为 5mm, 单个器件的尺寸为 3cm \times 2. 5cm.

采用 Agilent 81640A 可调谐激光器和 Agilent 81635A 探测器, 对器件性能进行了测试. 图 3 (a) 给出了器件在波长 1520 ~ 1585nm 范围内的传输谱, 160 个信道的输出不均匀性小于 0. 5dB. 图 3 (b) 给出器件在 1555nm 附近的局部放大图谱, 可以看到器件的插入损耗为 7. 5dB, 与模拟结果相差 4. 7dB, 这是因为在进行模拟时没有考虑器件与光纤的耦合损耗以及阵列波导弯曲所造成的辐射损耗; 另外, 受光刻版精度以及干法刻蚀工艺水平的限制, 波导侧壁会具有一定的粗糙度, 造成光在波导侧壁上的散射损耗, 从而增大器件的插入损耗. 采用更高分辨率的光刻版, 并用湿法腐蚀或其他技术手段对波导侧壁进行抛光, 可以使器件的插入损耗接近模拟结果. 从图 3 (b) 还可以看到器件的串扰为 13dB, 与模拟结果 50dB 相差甚远. 造成这种差距的主要原因是, 器件制备过程中的缺陷引起传播常数畸变, 导致阵列波导的相位传输误差, 从而使串扰增大. 而且, AWG 的信道间隔越小这种影响越显著^[9]. 相位误差来源于波导宽度、厚度或折射率的局部变化, 这取决于光刻版的分辨率、侧壁刻蚀的光滑度、波导材料组分分布均匀性以及厚度分布均匀性等. 由于同时受众多因素的影响, 以及现有的工艺水平的限制, 通过提高晶片的质量和工艺控制精度来降低阵列波导的相位误差是非常困难的. 为了进一步降低 AWG 的串扰, Takada 等人^[10] 曾在器件制备完成后, 用紫外光分别照射每一根阵列波导, 通过 SiO₂ 材料的光敏特性来微调波导局部的折射率, 从而对阵列波导

的相位误差进行补偿,将信道间隔为 10 GHz 的 AWG 串扰值由 17 dB 降至 30 dB. 这一研究结果表明,阵列波导相位误差的后期补偿,是改善窄信道间隔 AWG 串扰性能的有效方法.

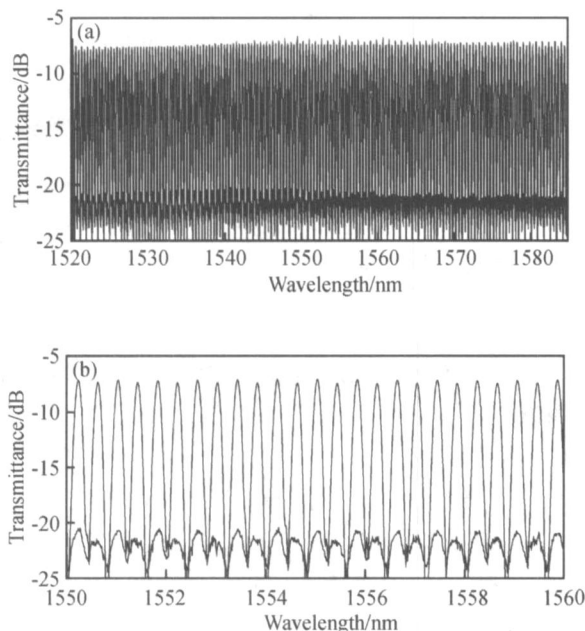


图 3 50/100 GHz AWGOI 在 1520 ~ 1585 nm 范围内 (a) 的输出全谱和 1555 nm 附近 (b) 的局部放大图谱

Fig. 3 Tested transmission spectra of 50/100 GHz AWGOI (a) Full spectra of 160 channels and (b) the enlarge spectra near 1555 nm

图 4 给出了每一路输出信号中的 80 个信道频率偏离 ITU 标准的情况. 从图中可以看到,偏离中心频率越远,信道频率偏离 ITU 标准越大,在距离中心频率最远的信道,输出频率偏离 ITU 标准 15 GHz. 信道频率偏离 ITU 标准的大小与离开中心频率的距离基本呈线性变化,而且偏离的方向都是向中心频率方向偏移. 由此可以判断,这种偏移是由于器件的自由光谱区与设计值相比偏小造成的. 对两组数据进行线性拟合,可以得到器件的自由光谱区比设计值偏小 0.35 GHz (0.0028 nm). 这一偏差对普通只在一个自由光谱区中工作的 AWG 而言是完全可以接受的,但用作 Interleaver 的 AWG 需要在几十个自由光谱区中工作,自由光谱区的微小偏差会在远离中心频率的信道得到累计放大,因此 AWG 型 Interleaver 对自由光谱区的准确度有更高的要求. 本文所设计的 50/100 GHz AWG 型 Interleaver 每一路信号中含有 80 个信道,要保证离中心频率最远的信道偏离 ITU 标准小于 3 GHz,则自由

光谱区的误差须小于 0.075 GHz.

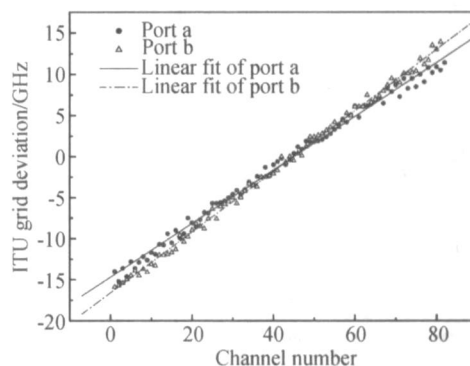


图 4 50/100 GHz AWGOI 的信道频率与 ITU 标准的偏差
Fig. 4 Channel frequency deviation from ITU grid of 50/100 GHz AWGOI

AWG 自由光谱区 f_{FSR} 与相邻阵列波导长度差 l 之间的关系为

$$f_{\text{FSR}} = \frac{c}{n_g L} \quad (2)$$

其中 n_g 为波导的群折射率; c 为真空中的光速. 将测得的自由光谱区 $f_{\text{FSR}} = 99.65 \text{ GHz}$ 和 L 的设计值 (见表 1) 代入 (2) 式可以得到阵列波导的群折射率 $n_g = 1.4631$, 与器件设计过程中波导群折射率的计算值 (见表 1) 略有出入. 这是因为: (1) 由于制备工艺过程不可避免地存在误差,使得波导的实际尺寸与设计尺寸存在一定的偏差; (2) 计算波导群折射率所采用的有效折射率法本身就是一种做过等效处理的近似方法. 阵列波导的实际群折射率与设计过程中的计算值存在偏差,是器件的实测自由光谱区偏离设计值的直接原因. 保持其他设计参数与工艺过程不变,可以通过调整 L 来使器件的自由光谱区满足设计要求. 将 $n_g = 1.4631$ 代入 (2) 式,可以得到 f_{FSR} 和 L 之间的关系曲线,如图 5 所示. 从图 5 可以得到,经过重新设计的 L 应为 $2049.04 \mu\text{m}$, 要将 f_{FSR} 的误差控制在 0.075 GHz 以内, L 的误差不能超过 $1.5 \mu\text{m}$, 这在现有的工艺水平下是不难做到的.

4 结论

采用 SiO_2 平面光波导技术设计并制备了 50/100 GHz AWGOI. 测试得到的最佳性能参数为插入损耗 $< 7.5 \text{ dB}$, 串扰 $> 13 \text{ dB}$, 在 1520 ~ 1585 nm 的整个带宽范围内, 160 个信道的不均匀性 $< 0.5 \text{ dB}$. 分

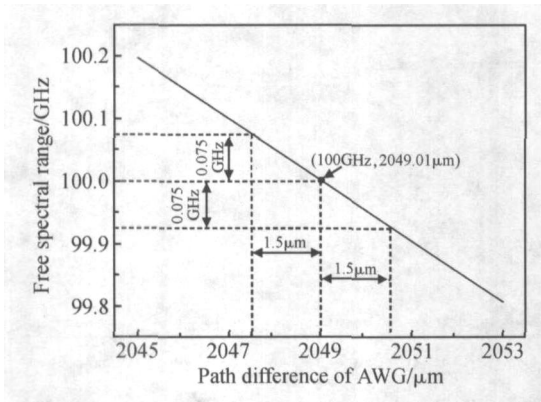


图 5 50/ 100 GHz AWGOI 的自由光谱区与阵列波导长度差之间的关系

Fig. 5 Relationship between free spectral range and path difference of 50/ 100 GHz AWGOI

析认为阵列波导的相位误差是造成器件串扰较大的主要原因,采用阵列波导相位误差的后期补偿可望大幅降低器件的串扰.在远离中心频率的信道,偏离 ITU 标准较大,最大为 15 Hz.分析表明 AWGOI 对自由光谱区宽度的准确度有更高的要求,对于本文所设计的 160 信道 50/ 100 GHz AWGOI,要保证离中心频率最远的信道偏离 ITU 标准 < 3 GHz,自由光谱区 f_{FSR} 的误差须 < 0. 075 GHz, L 的误差不能超过 1. 5 μ m.

参考文献

[1] Kim J ,Park J ,Chuang S,et al. Bidirectional wavelength add/

drop multiplexer using two separate MUX and DEMUX pairs and reflection-type comb filters. *Opt Commun* ,2002 ,205 :321

[2] Zhang Juan ,Liu Liren ,Zhou Yu. A tunable interleaver filter based on analog birefringent units. *Opt Commun* ,2003 ,227 : 283

[3] Dingel B B ,Aruga T. Properties of a novel noncascaded type easy-to-design ripple-free optical bandpass filter. *J Lightwave Technol* ,1999 ,17 (8) :1461

[4] Kok S W ,Zhang Ying ,Wen Changyun ,et al. Design of all-fiber optical interleavers with a given specification on passband ripples. *Opt Commun* ,2003 ,226 :241

[5] Wang Qian ,He Sailing. Optimal design of flat-top interleaver based on cascaded M-Z interferometers by using a genetic algorithm. *Opt Commun* ,2003 ,224 :229

[6] Huang Dingwei , Chiu Tsunghsuan , Lai Yinchieh. Arrayed waveguide grating DWDM interleaver. *Proc OFC* , 2001 , WDD80 :1

[7] Smit M K. Phasar-based WDM-devices :principles ,design and applications. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron* ,1996 ,2 (2) :236

[8] Kawachi M. Silica waveguide on silicon and their application to integrated-optic components. *Opt Quantum Electron* ,1990 , 22 :391

[9] Takada K ,Yamada H ,Okamoto K. Accurate characterization and phase-error compensation of AWGs. *LEOS '98* ,1998 ,1 : 324

[10] Yamada H ,Takada K ,Mitachi S. Crosstalk reduction in a 10-GHz spacing arrayed-waveguide grating by phase-error compensation. *Lightwave Technology* ,1998 ,16 (3) :364

Design and Fabrication of 50/ 100 GHz AWG Based Interleaver *

Dou Jinfeng , Han Peide , and Hu Xiongwei

(*Research and Development Center for Optoelectronics , Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China*)

Abstract : 50/ 100 GHz AWG based interleaver is designed and fabricated based on SiO₂-on-Si optical planar waveguides. It is capable of covering the wavelength ranging from 1520 to 1580nm with 160 channels. The loss nonuniformity is < 0. 5dB ,the insertion loss < 8dB ,and the channel crosstalk to the neighbouring channels > 13dB. The output frequency of the outer most channels has a deviation of 15 GHz from the ITU grid. The reasons degrading the crosstalk property and channel-frequency accuracy of the device are analyzed ,and the approaches improving the relevant properties are proposed.

Key words : AWG; interleaver; optical planar waveguide ; SiO₂-on-Si

PACC : 4280C ; 4280F ; 4280L

Article ID : 0253-4177 (2005) 05-1020-04

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2001AA312130)

Received 19 July 2004 ,revised manuscript received 4 November 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics