

引用格式: HAN Zheng, YUN Binfeng. Design of Spectral Analysis Chip Based on Cascaded AWG[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):1113003

韩征, 恽斌峰. 基于级联 AWG 的光谱分析芯片设计[J]. 光子学报, 2022, 51(11):1113003

# 基于级联 AWG 的光谱分析芯片设计

韩征, 恽斌峰

(东南大学 电子科学与工程学院 先进光子学中心, 南京 210096)

**摘要:** 基于低损耗氮化硅光波导平台, 采用一个  $1 \times 6$  阵列波导光栅(AWG)与六个仅中心波长不同的  $1 \times 25$  AWG 两级级联的架构, 优化设计了集成光谱分析芯片。仿真结果表明, 该光谱分析芯片的工作带宽、波长分辨率、最小通道插损分别为 75 nm、0.5 nm 和 4.9 dB, 且通道间最小相邻、非相邻串扰约为  $-27.7$  dB、 $-23.0$  dB, 最大相邻、非相邻串扰约为  $-22.6$  dB、 $-12.5$  dB。

**关键词:** 片上集成光谱仪; 阵列波导光栅; 光谱分析芯片; 色散器件; 集成光学器件

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225111.1113003

## 0 引言

小尺寸、高分辨率和大工作带宽光谱仪在各种应用中需求量很大, 包括光谱学、医学成像、天文学、农业、食品工业等<sup>[1-3]</sup>。在保持性能的同时, 使用集成光学器件可以减小光谱仪的尺寸, 已有大量报道实现集成的光谱仪<sup>[4]</sup>。阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)是一种平面色散器件, 具有高稳定性、小尺寸和易于制造等特点<sup>[5]</sup>。AWG 之前主要用于光波分复用网络, 但是最近它在开发小型化光学系统方面受到了人们的关注<sup>[6-7]</sup>。在单个 AWG 中同时实现高分辨率和大自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)是相当困难的, 然而, 通过使用多级 AWG 级联<sup>[8-9]</sup>或者微环谐振器(Microring Resonator, MRR)与 AWG 级联<sup>[10-12]</sup>的方法, 可以克服 AWG 分辨率和 FSR 的限制, 使得光谱仪可以同时获得高分辨率和大工作带宽。

使用 MRR 与 AWG 级联的方式<sup>[10-12]</sup>实现的光谱仪虽然可以获得较高的分辨率, 但是因为其需要热调谐每个 MRR 的谐振波长, 通过波长扫描才能得到光谱, 故其需要较长的调谐时间, 受到温度波动的影响较大, 且串扰也较大。使用多级 AWG 级联的方式<sup>[8-9]</sup>可以快速获得高分辨率、大带宽的光谱; 对于多级 AWG 级联有两种不同的方式。第一种方式<sup>[8]</sup>为: 第一级 AWG 每个输出通道的光谱有较大的 3 dB 带宽, 第二级 AWG 将第一级 AWG 每个通道的输出光进一步细分到多个通道中; 即第一级 AWG 提供大带宽, 第二级 AWG 提供高分辨率; 这种级联方式的结构由于第一级 AWG 输出光谱需要进行平坦化<sup>[13-14]</sup>, 故其插入损耗较大, 均匀性较差; 且如果使用这种结构实现高分辨率的光谱仪, 则第二级 AWG 需要有较小的通道间隔和较多的通道数, 会导致第二级 AWG 尺寸增大, 从而使光谱分析芯片尺寸过大。第二种方式<sup>[9]</sup>为: 利用 AWG 输出光谱的周期性路由特性<sup>[5, 15]</sup>, 第一级 AWG 拥有高分辨率, 并利用其多个周期的输出光谱; 第二级 AWG 的作用是对第一级 AWG 的输出光谱进行滤波, 所以这种级联方式对第二级 AWG 的分辨率和通带平坦度要求相对较低; 在这种方法中, 第一级 AWG 提供高分辨率, 所有第二级 AWG 的通道数量决定了工作带宽, 此种结构的光谱仪可以有较小的插入损耗和串扰; 且整体尺寸优于上一种级联方法, 因为这种结构仅使用到了一个高分辨率 AWG。一般说来, 多级 AWG 级联的系统, 使用一个高分辨率 AWG 要比使用多个高分辨率 AWG 的系统整体尺寸小。

本文多级 AWG 使用的级联方式为第二种方式, 即第一级使用高分辨率的 AWG, 并利用 AWG 的周期

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62171118)

第一作者: 韩征(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子集成技术。Email: 220191340@seu.edu.cn

导师(通讯作者): 恽斌峰(1979—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信与光子集成技术。Email: ybf@seu.edu.cn

收稿日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-05-17

<http://www.photon.ac.cn>

性路由特性级联两级 AWG。与之前报道相比,本文使用通道间隔更小的第一级 AWG 实现了更高的分辨率,并通过增加第二级 AWG 的数量获得了较大的工作带宽。本文基于氮化硅(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)平台,设计并仿真了中心波长 1 550 nm,分辨率为 0.5 nm,工作带宽为 75 nm,共有 150 个输出通道的光谱分析芯片。

## 1 结构原理

如图 1 为本文提出的光谱分析芯片结构示意图,其由两级 AWG 级联构成。图 1 中红色虚线框内为第一级 AWG,其有 6 个输出通道。图 1 中蓝色虚线框内为 6 个第二级 AWG,分别为 AWG<sub>1</sub>、AWG<sub>2</sub>、AWG<sub>3</sub>、AWG<sub>4</sub>、AWG<sub>5</sub>、AWG<sub>6</sub>;每个第二级 AWG 有 25 个输出通道。第一级 AWG 的输出通道级联对应第二级 AWG 的输入通道,形成的光谱分析芯片共有 150 个输出通道,可对 150 个不同波长的光进行滤波。

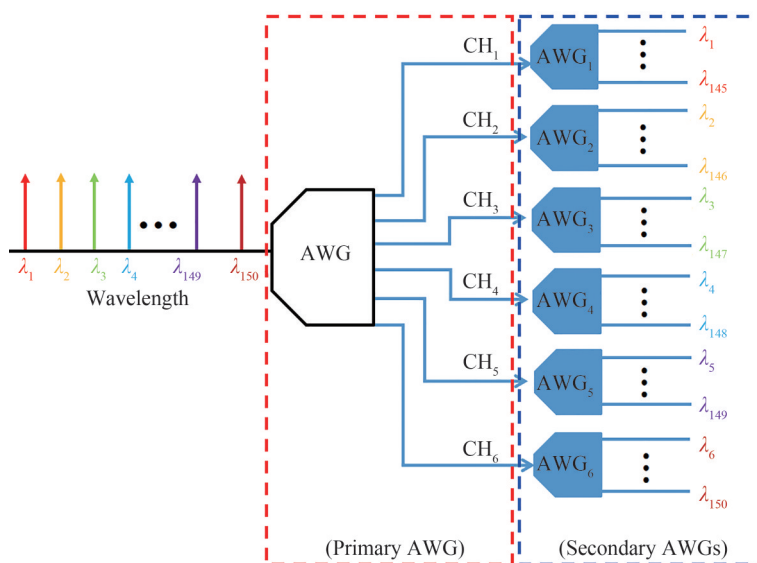


图 1 光谱分析芯片结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the spectrum analysis chip

在光谱分析芯片的工作带宽内,设峰值波长分别为  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \dots, \lambda_{150}$  的光从该光谱分析芯片输入通道输入,经过该芯片后,光波长将从对应的输出通道输出。

如图 2(a)为第一级 AWG 的功能示意图,因为 AWG 的周期性路由性质,从第一级 AWG 的 CH<sub>1</sub> 中输出的光有  $\lambda_1, \lambda_7, \lambda_{13}, \dots, \lambda_{145}$ , 可以写为  $\lambda_{(1+6n)}, 0 \leq n \leq 24, n$  为自然数;同理,其它通道输出的光如图 2(a)标示。如图 2(b)为第一级 AWG 的光谱示意图,选定 AWG 的衍射级数 ( $m$ ) 为  $m_p$ , 其 FSR 为  $FSR_p$ , 相邻通道间隔为  $\Delta\lambda_p$ 。

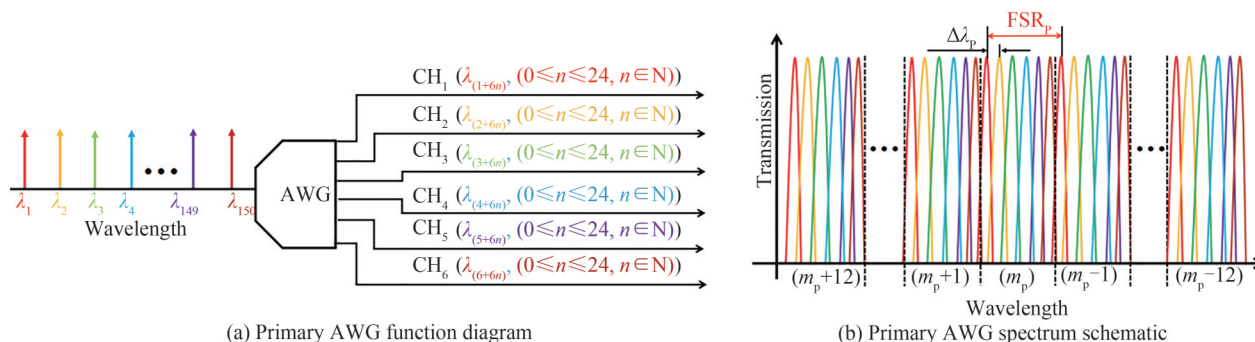


图 2 第一级 AWG 功能和光谱示意图

Fig. 2 Primary AWG function and spectrum schematic

第二级 AWG 的功能是作为粗滤波器,对第一级 AWG 的对应通道的光进行滤波。如图 3(a)为 AWG<sub>1</sub> 的功能示意图,从第一级 AWG 的 CH<sub>1</sub> 通道输出的光有  $\lambda_1, \lambda_7, \lambda_{13}, \dots, \lambda_{145}$ , AWG<sub>1</sub> 对其进一步分光,使 AWG<sub>1</sub> 的

输出通道仅输出单一波长的光。如图3(b)为AWG<sub>1</sub>的光谱示意图。设AWG<sub>1</sub>衍射级数( $m$ )为 $m_s$ ,其相邻通道间隔为 $\Delta\lambda_s$ ,FSR为 $FSR_s$ ,其中,为了各个输出通道之间不互相干扰,其 $FSR_s$ 须大于光谱分析芯片的工作带宽<sup>[5]</sup>。

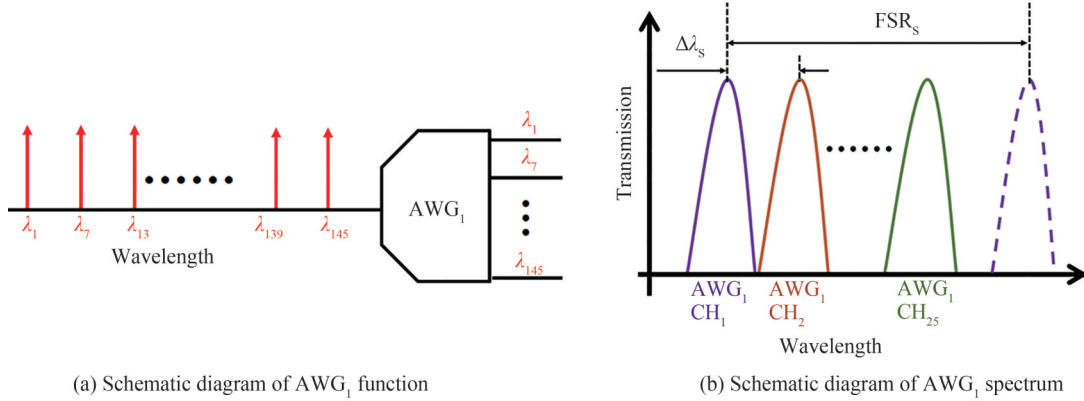


图3 AWG<sub>1</sub>功能和光谱示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of AWG<sub>1</sub> function and spectrum

AWG<sub>2</sub>、AWG<sub>3</sub>、AWG<sub>4</sub>、AWG<sub>5</sub>、AWG<sub>6</sub>的功能和原理与AWG<sub>1</sub>相同,第二级的6个AWG仅中心波长不同,其余性能参数均相同<sup>[9]</sup>。设AWG的相邻阵列波导长度差值为 $\Delta L$ ,根据文献<sup>[5]</sup>中AWG的原理可得,通过调整 $\Delta L$ 即可调整中心波长。

两级AWG在进行级联时需要满足一定的条件。图4为第一级AWG的CH<sub>1</sub>通道级联AWG<sub>1</sub>时的光谱位置关系示意图,图中黑色实线为第一级AWG的CH<sub>1</sub>通道输出的多个周期的透射光谱,其余彩色实线为AWG<sub>1</sub>不同通道的透射光谱。为了让AWG<sub>1</sub>可以正确滤波,黑色实线的峰值波长须要与彩色实线的峰值波长相同,如图4中黑色虚线标示;又因为黑色实线相邻峰值波长间距为第一级AWG的FSR( $FSR_p$ ),彩色实线相邻峰值波长间距为第二级AWG的通道间隔( $\Delta\lambda_s$ );故 $\Delta\lambda_s = FSR_p$ 。图4中的彩色虚线为AWG<sub>1</sub>对第一级AWG的CH<sub>1</sub>滤波后的光谱曲线。

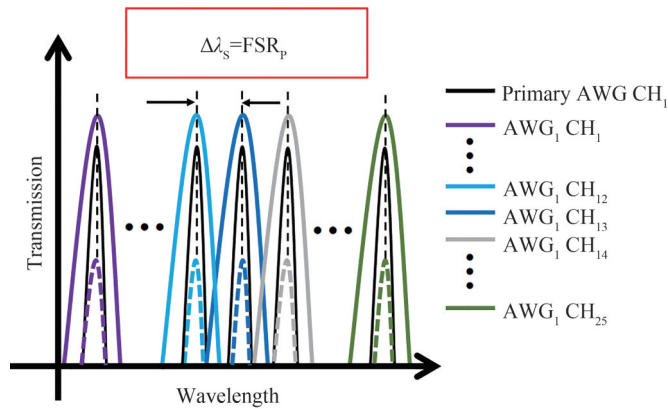


图4 第一级AWG CH<sub>1</sub>与AWG<sub>1</sub>光谱关系示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of the spectral relationship between Primary AWG CH<sub>1</sub> and AWG<sub>1</sub>

根据上述级联AWG结构光谱分析芯片的工作原理可得,最终实现的光谱仪分辨率(相邻峰值波长间距)取决于第一级AWG的相邻通道间隔( $\Delta\lambda_p$ ),工作带宽取决于第二级AWG的自由光谱范围( $FSR_s$ )与总的输出通道数量。

## 2 设计仿真

采用波导截面如图5所示的氮化硅光波导设计光谱分析芯片,波导芯层和包层材料分别为氮化硅

( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )和二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ),并采用宽度 $w=1\ \mu\text{m}$ ,厚度为 $h=300\ \text{nm}$ 的条形单模光波导。其在 $1550\ \text{nm}$ 波长处TE基模模场图如图5(b)所示;本文中设计的光谱分析芯片工作在TE模式。

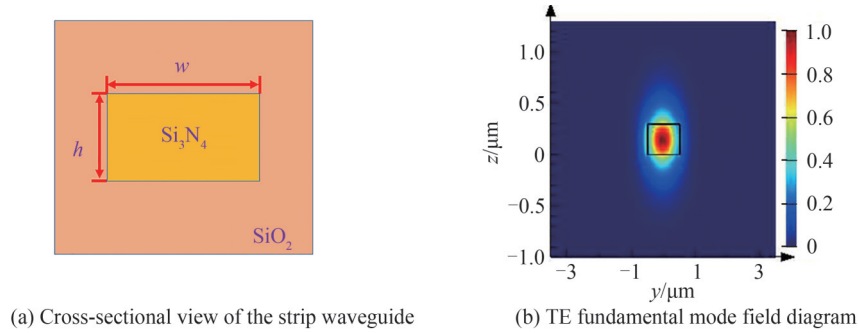


图5 条形波导截面图以及TE基模模场图

Fig. 5 The cross-sectional view of the strip waveguide and the mode field diagram of the TE fundamental mode

本文中仿真的AWG结构示意图如图6所示,其中 $w$ 为波导的宽度, $f_{\text{FPR}}$ 为自由传输区域(Free Propagation Region, FPR)的长度, $\Delta L$ 为相邻阵列波导长度的差值, $d$ 为相邻阵列波导与FPR交点处 $M$ 、 $N$ 之间的直线距离; $\Delta x_{\text{out}}$ 为相邻输出波导与FPR交点处 $P$ 、 $Q$ 之间的直线距离; $\Delta\theta_{\text{out}}$ 为相邻输出波导之间的夹角;阵列波导的数量设为 $N$ ;输出波导的数量为 $N_{\text{out}}$ 。在该波导平台上,选择 $d=\Delta x_{\text{out}}=3\ \mu\text{m}$ 。为了降低AWG的插入损耗,在条形波导与FPR的连接处使用了宽度线性变化的渐变波导结构,下文简称为Taper<sup>[16-17]</sup>,图6中的插图为其结构示意图,设Taper的长度为 $L_{\text{Taper}}$ ,宽度为 $w_{\text{Taper}}$ 。

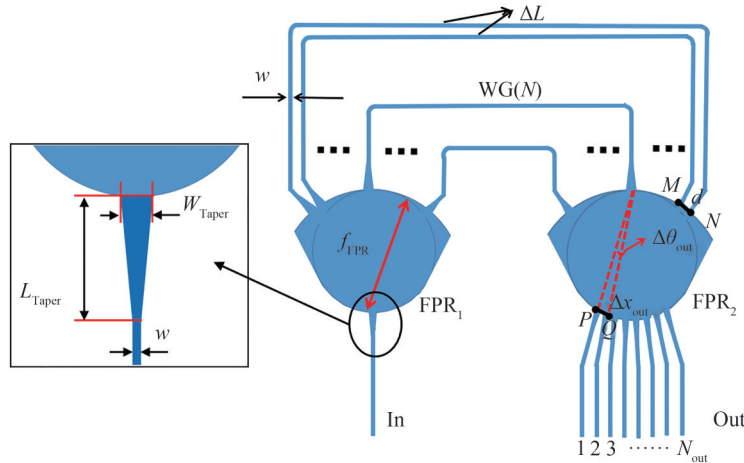


图6 AWG仿真结构示意图

Fig. 6 AWG simulation structure diagram

表1为第一级AWG和第二级AWG( $\text{AWG}_1$ 、 $\text{AWG}_2$ 、 $\text{AWG}_3$ 、 $\text{AWG}_4$ 、 $\text{AWG}_5$ 、 $\text{AWG}_6$ )的设计参数值。本文采用RSoft软件对AWG进行仿真,根据表1的参数值在软件中建立AWG的三维仿真模型。

图7(a)为第一级AWG仿真得到的 $1510\ \text{nm}\sim 1590\ \text{nm}$ 范围内的透射光谱,为了显示清晰,如图7(b)为 $1548.5\ \text{nm}\sim 1551.5\ \text{nm}$ 波长范围(同一个衍射级)的透射光谱放大图;可得在( $1548.5\ \text{nm}\sim 1551.5\ \text{nm}$ )范围内 $\text{CH}_1\sim\text{CH}_6$ 的通道插损为 $2.5\ \text{dB}$ 、 $1.7\ \text{dB}$ 、 $1.3\ \text{dB}$ 、 $1.2\ \text{dB}$ 、 $1.7\ \text{dB}$ 、 $2.5\ \text{dB}$ ;相邻通道串扰为 $-28.7\ \text{dB}$ 、 $-24.6\ \text{dB}$ 、 $-26.1\ \text{dB}$ 、 $-26.1\ \text{dB}$ 、 $-24.7\ \text{dB}$ 、 $-28.8\ \text{dB}$ ;非相邻通道串扰为 $-24.4\ \text{dB}$ 、 $-33.9\ \text{dB}$ 、 $-38.9\ \text{dB}$ 、 $-39.0\ \text{dB}$ 、 $-33.9\ \text{dB}$ 、 $-24.4\ \text{dB}$ 。通道非均匀性为 $1.3\ \text{dB}$ ;平均 $1\ \text{dB}$ 带宽为 $0.14\ \text{nm}$ ,平均 $3\ \text{dB}$ 带宽为 $0.27\ \text{nm}$ ;中心波长为 $1549.90\ \text{nm}$ 。

对表1中六个第二级AWG都进行仿真,图8为其中 $\text{AWG}_4$ 在 $1510\ \text{nm}\sim 1590\ \text{nm}$ 范围的透射光谱;可以计算得到 $\text{AWG}_4$ 边缘通道( $\text{CH}_1$ 、 $\text{CH}_{25}$ )的通道插损为 $4.5\ \text{dB}$ 、相邻通道串扰为 $-12.7\ \text{dB}$ 、非相邻通道串扰为 $-32.3\ \text{dB}$ ;中间通道( $\text{CH}_{13}$ )的通道插损为 $3.6\ \text{dB}$ 、相邻通道串扰为 $-17.8\ \text{dB}$ 、非相邻通道串扰为 $-42.2\ \text{dB}$ 。

表1 所有AWG的设计值  
 Table 1 Design values for all AWGs

Parameter	Primary AWG	Secondary AWG
Wavelength channel spacing ( $\Delta\lambda$ )	( $\Delta\lambda_p$ ) 0.5 nm	( $\Delta\lambda_s$ ) 3 nm
Center wavelength ( $\lambda_c$ )	1 550.0 nm	AWG <sub>6</sub> : 1 551.25 nm AWG <sub>5</sub> : 1 550.75 nm AWG <sub>4</sub> : 1 550.25 nm AWG <sub>3</sub> : 1 549.75 nm AWG <sub>2</sub> : 1 549.25 nm AWG <sub>1</sub> : 1 548.75 nm
Diffraction order ( $m$ )	( $m_p$ ) 430	( $m_s$ ) 14
Free spectral range (FSR)	(FSR <sub>p</sub> ) 3 nm	(FSR <sub>s</sub> ) 90 nm
Length of FPR ( $f_{FPR}$ )	57.324 2 $\mu\text{m}$	391.080 5 $\mu\text{m}$
Adjacent array waveguide length difference ( $\Delta L$ )	429.722 8 $\mu\text{m}$	AWG <sub>6</sub> : 14.167 7 $\mu\text{m}$ AWG <sub>5</sub> : 14.163 2 $\mu\text{m}$ AWG <sub>4</sub> : 14.158 7 $\mu\text{m}$ AWG <sub>3</sub> : 14.154 2 $\mu\text{m}$ AWG <sub>2</sub> : 14.149 7 $\mu\text{m}$ AWG <sub>1</sub> : 14.145 0 $\mu\text{m}$
Number of arrayed waveguides ( $N$ )	19	105
Number of output channels ( $N_{\text{out}}$ )	6	25
Tapered coupler length ( $L_{\text{Taper}}$ )	10 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
Tapered coupler width ( $w_{\text{Taper}}$ )	2 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
Chip size	4 000 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$	1 000 $\mu\text{m} \times 1 000 \mu\text{m}$

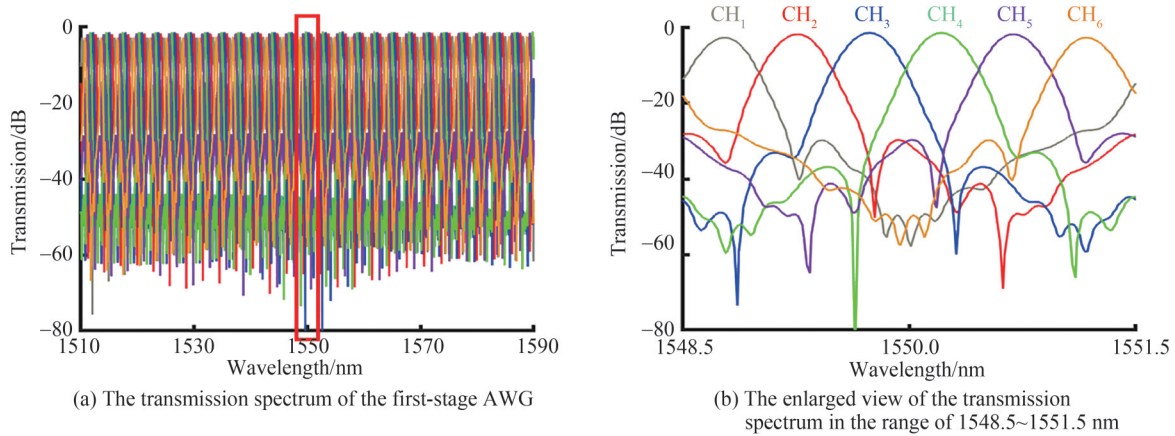


图7 第一级AWG透射光谱以及其在1 548.5~1 551.5 nm范围内透射光谱放大图

Fig. 7 The first-stage AWG transmission spectrum and its enlarged view in the range of 1 548.5~1 551.5 nm

通道非均匀性为0.9 dB;平均1 dB带宽和3 dB带宽分别为1.28 nm、2.19 nm。由于第二级AWG的阵列波导和输出波导数量较多,故使用了较多的弯曲波导和Taper结构,导致通道的插入损耗相比第一级AWG有所增大<sup>[18]</sup>。根据仿真结果,AWG<sub>1</sub>、AWG<sub>2</sub>、AWG<sub>3</sub>、AWG<sub>5</sub>、AWG<sub>6</sub>的性能参数除中心波长外,均与AWG<sub>4</sub>性能参数相同。第二级AWG的中心波长如表2。由表2可得,对于各个第二级AWG的中心波长,其仿真值与设计值差别较小。在仿真过程中,可通过优化相邻阵列波导长度差值( $\Delta L$ )调整AWG的中心波长。

级联AWG结构的光谱分析芯片的输出光谱如图9(a)所示,图9(b)为中间部分通道(图9(a)中红色框内)的放大图,图9(c)为边缘部分通道(图9(a)中蓝色框内)的放大图。由图9可得,该光谱分析芯片可以覆盖的工作带宽为75 nm,分辨率为0.5 nm,共有150个通道。该光谱分析芯片的最大通道插损为7.9 dB、最大

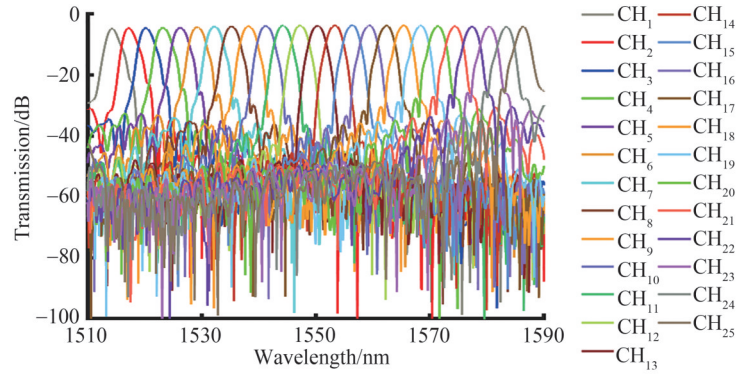


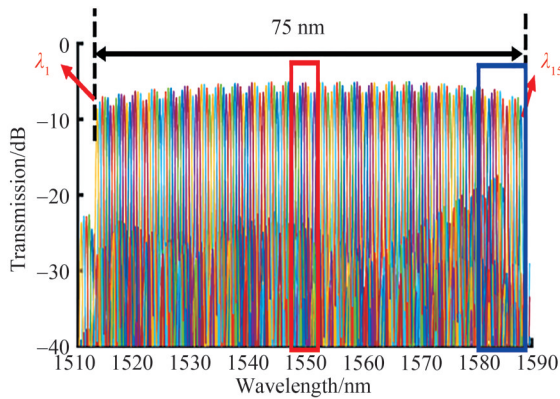
图8 AWG<sub>4</sub>透射光谱

Fig. 8 AWG<sub>4</sub> transmission spectrum

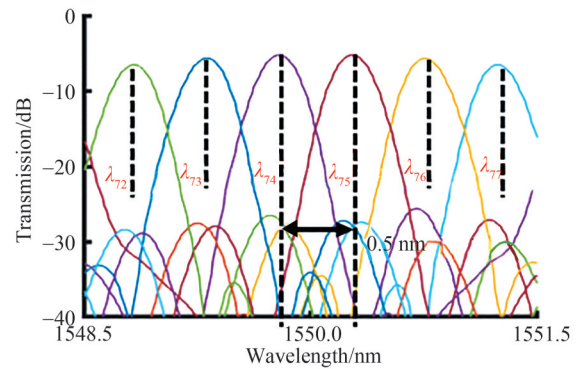
表2 仿真得到的第二级AWG中心波长与设计值对比

Table 2 Comparison between the center wavelength of the second-stage AWG obtained by simulation and the design value

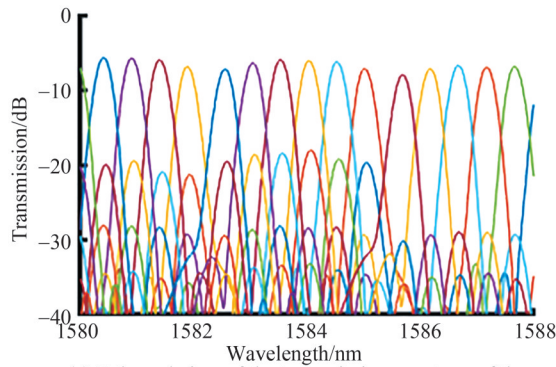
AWG name	Center wavelength simulation value	Design value of center wavelength
AWG <sub>1</sub>	1 548.80 nm	1 548.75 nm
AWG <sub>2</sub>	1 549.30 nm	1 549.25 nm
AWG <sub>3</sub>	1 549.75 nm	1 549.75 nm
AWG <sub>4</sub>	1 550.20 nm	1 550.25 nm
AWG <sub>5</sub>	1 550.73 nm	1 550.75 nm
AWG <sub>6</sub>	1 551.22 nm	1 551.25 nm



(a) Total transmission spectrum of the spectroscopic chip



(b) Enlarged view of the transmission spectrum of the middle channel (in the red box in a)



(c) Enlarged view of the transmission spectrum of the edge channel (in the blue box in a)

图9 光谱分析芯片透射光谱

Fig. 9 Spectroscopic analysis chip transmission spectroscopy

相邻通道串扰为-22.6 dB、最大非相邻通道串扰为-12.5 dB;最小通道插损为4.9 dB、最小相邻通道串扰为-27.7 dB、最小非相邻通道串扰为-23.0 dB。

本文仿真的光谱分析芯片性能参数与文献[9]报道的光谱分析芯片性能参数对比,本文在保持了工作带宽(75 nm)的情况下,提高了光谱分析芯片的分辨率(从1 nm提高到0.5 nm);同时因为本文中所有的AWG在条形波导与FPR连接处使用了线形Taper,故芯片的插入损耗得到了优化。此外,我们目前设计的光谱分析芯片,其波导最小宽度为1  $\mu\text{m}$ ,故使用与文献[9]相同的光刻工艺即可实现。其面积约为(1.5 cm  $\times$  1 cm),通过优化两级AWG的布局方式,芯片的面积可以进一步减小。由于氮化硅具有较大的热光系数,故外界温度的变化会导致AWG透射光谱发生平移,从而偏离设计值;为了减轻外界温度的影响,我们可以使用负热光系数的聚合物代替二氧化硅上包层<sup>[19]</sup>或者在芯片上放置加热电极控制温度<sup>[20]</sup>,从而提高AWG透射光谱的稳定性。

### 3 结果分析

从图9所示的光谱分析芯片的透射光谱可得,在光谱分析芯片的边缘部分通道串扰和插损均较大。原因如下所述。

设 $n_c$ 为在条形波导中的TE模式的有效折射率, $n_g$ 为条形波导中TE基模的群折射率, $\lambda_c$ 表示中心波长, $\Delta L$ 为AWG相邻阵列波导长度差值, $m$ 表示AWG的衍射级数。根据AWG的FSR满足的公式<sup>[5]</sup>

$$\text{FSR} = \frac{n_c \lambda_c}{m n_g} \quad (1)$$

$$\lambda_c = \frac{n_c \Delta L}{m} \quad (2)$$

组合式(1)和(2)可得

$$\text{FSR} = \frac{n_c^2 \cdot \Delta L}{m^2 \cdot n_g} \quad (3)$$

即对于AWG的FSR来说,其随着级数 $m$ 变化。即级数 $m$ 不同,FSR也不同。

对于第一级AWG,其光谱示意图如图2(b),共使用到了25个级数。在1 510 nm~1 590 nm波长范围内,仿真得到的透射光谱如图7(a)所示。由图7(a)可得,第一级AWG的FSR<sub>p</sub>与 $m$ 的关系如图10所示,FSR<sub>p</sub>在不同级数 $m$ 处是不同的。当第一级AWG的 $m=430$ 时,FSR<sub>p}=3.01 nm,对应AWG的中间部分通道,与设计值(3 nm)接近。而当 $m=418$ 时,FSR<sub>p}=3.13 nm;当 $m=442$ 时,FSR<sub>p}=2.85 nm,对应AWG的边缘部分通道,均与设计值(3 nm)相差较大。</sub></sub></sub>

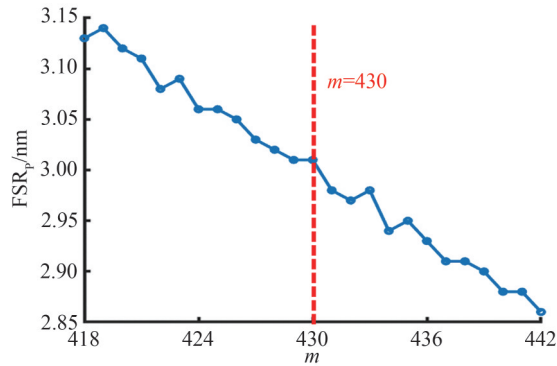


图10 第一级AWG的FSR<sub>p</sub>与 $m$ 的关系

Fig. 10 The relationship between the FSR<sub>p</sub> of the Primary AWG and  $m$

对于第二级AWG,根据仿真结果,其 $\Delta\lambda_s=3$  nm,即相邻通道间隔均为3 nm。故对于第一级AWG,当 $m=430$ 时,可满足级联条件 $\Delta\lambda_s=\text{FSR}_p$ ;当 $m \neq 430$ 时,不满足级联条件 $\Delta\lambda_s=\text{FSR}_p$ 。故中间部分通道插损和串扰小于边缘部分通道。

从图10可以看出, $m$ 越小,FSR<sub>p</sub>越大, $m$ 越大,FSR<sub>p</sub>越小。故两级AWG级联时光谱位置关系如图11所

示,在中间部分通道(order  $m$ ),第一级 AWG 的输出光谱与第二级 AWG 的输出光谱峰值波长相同,故插损和串扰都较小;而在边缘部分通道(order  $m-1$ 、order  $m+1$ ),第一级 AWG 的输出光谱与第二级 AWG 的输出光谱的峰值波长不相同,故导致损耗增大,且如图 11 黑色虚线椭圆框内所示,两级光谱曲线峰值波长不相同,导致级联后的总光谱受到第二级 AWG 的相邻通道串扰影响,导致光谱分析芯片的串扰变大。

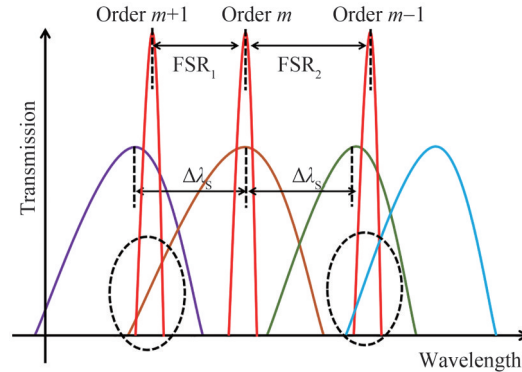


图 11 边缘部分通道插损和串扰较大的原因分析示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the cause analysis of the large channel insertion loss and crosstalk in the edge part

根据上述分析,光谱分析芯片越边缘的通道串扰越大;为了减轻由于第一级 AWG 在不同衍射级数下 FSR 不同造成的串扰,我们可以减少每个第二级 AWG 的输出通道数,同时增加第二级 AWG 的个数,这种方法虽然可以优化边缘通道的串扰,但是会让芯片的面积增大。

## 4 结论

本文在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  平台上,通过级联两级 AWG 结构设计仿真了中心波长为 1 550 nm,分辨率为 0.5 nm,工作带宽为 75 nm 的光谱分析芯片;仿真得到光谱分析芯片的最小通道插损为 4.9 dB,最大通道插损为 7.9 dB;通道间的最大相邻、非相邻串扰约为  $-22.6$  dB、 $-12.5$  dB,最小相邻、非相邻串扰约为  $-27.7$ 、 $-23.0$  dB。本文还分析了这种级联 AWG 结构的光谱分析芯片由于 AWG 在不同衍射级数处的 FSR 不同,在边缘通道不满足级联条件,导致插入损耗、串扰均变大。

## 参考文献

- [1] CROCOMBE R A. Miniature optical spectrometers: the art of the possible, Part IV: new near-infrared technologies and spectrometers[J]. Spectroscopy, 2008, 23(6): 26-37.
- [2] GATKINE P, VEILLEUX S, DAGENAIS M. Astrophotonic spectrographs[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 290.
- [3] JOVANOVIĆ N, CVETOJEVIĆ N, NORRIS B, et al. Demonstration of an efficient, photonic-based astronomical spectrograph on an 8-m telescope[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17753-17766.
- [4] WANG Weiping, JIN Li. Research progress of on-chip spectrometer based on the silicon photonics platform [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 333-342.  
王伟平, 金里. 芯片级硅基光谱仪研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 333-342.
- [5] SMIT M K, VANDAM C. PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(2): 236-250.
- [6] YURTSEVER G, POVAZAY B, ALEX A, et al. Photonic integrated Mach-Zehnder interferometer with an on-chip reference arm for optical coherence tomography[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(4): 1050-1061.
- [7] AKCA B I, DOERR C R, SENGO G, et al. Broad-spectral-range synchronized flat-top arrayed-waveguide grating applied in a 225-channel cascaded spectrometer[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 18313-18318.
- [8] WIJK AVAN, DOERR C R, ALI Z, et al. Compact ultrabroad-bandwidth cascaded arrayed waveguide gratings [J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14618-14626.
- [9] AKCA B I, DOERR C R. Interleaved silicon nitride AWG spectrometers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 90-93.
- [10] ZHU H H, ZHENG S N, ZOU J, et al. A High-resolution Integrated Spectrometer based on cascaded a ring resonator and an AWG[Z]. 2020 Conference On Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2020.
- [11] ZHENG S, CAI H, SONG J, et al. A single-chip integrated spectrometer via tunable microring resonator array[J]. IEEE



- Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-9.
- [12] ZOU J, LE Z, HE J J. Temperature self-compensated optical waveguide biosensor based on cascade of ring resonator and arrayed waveguide grating spectrometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(21): 4856-4863.
- [13] PATHAK S, VANSLEMBROUCK M, DUMON P, et al. Optimized silicon AWG with flattened spectral response using an MMI aperture[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 87-93.
- [14] ZHANG Liyao, WU Yuanda, AN Junming, et al. Flat spectral response of arrayed waveguide grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(4): 379-385.  
张俐耀, 吴远大, 安俊明, 等. 阵列波导光栅平坦化的研究[J]. 光子学报, 2013, 42(4): 379-385.
- [15] CAO S, CHEN J, DAMASK J N, et al. Interleaver technology: Comparisons and applications requirements[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 281-289.
- [16] YE T, FU Y F, QIAO L, et al. Low-crosstalk Si arrayed waveguide grating with parabolic tapers[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31899-31906.
- [17] WANG J, SHENG Z, LI L, et al. Low-loss and low-crosstalk  $8 \times 8$  silicon nanowire AWG routers fabricated with CMOS technology[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9395-9403.
- [18] LU Si, YAN Yingbai, JIN Guopan, et al. Design of low insertion loss arrayed waveguide grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(7): 769-772.  
陆思, 严瑛白, 金国藩, 等. 低插入损耗阵列波导光栅的设计[J]. 光子学报, 2003, 32(7): 769-772.
- [19] GUHA B, CARDENAS J, LIPSON M. Athermal silicon microring resonators with titanium oxide cladding[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26557-26563.
- [20] YANG Y, HU X N, SONG J F, et al. Thermo-optically tunable silicon AWG with above 600 GHz channel tunability[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(22): 2351-2354.

## Design of Spectral Analysis Chip Based on Cascaded AWG

HAN Zheng, YUN Bin Feng

(Advanced Photonics Center, School of Electronic Science and Engineering, Southeast University,  
Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With fast developments and wide applications of spectrum analysis, there is a great requirement for the miniaturization and chipization of spectrum analyzer. Spectrometers based on photonic integrated chips have great advantages in size, weight and power consumption, which can be applied in many fields such as chemical and biological sensing, spectroscopy, spectral imaging and radio frequency spectrum analysis, etc. Some on-chip spectrum analyzing schemes have been proposed, such as cascading Arrayed Waveguide Grating (AWG) with Micro-Ring Resonators (MRR) and cascading multi-stage AWGs. For the scheme of cascading AWG with tunable MRRs, a long measurement time is needed due to its wavelength scanning mechanism and the crosstalk is relatively large. On the contrary, spectrum analysis chip based on cascade AWGs without wavelength scanning processes can achieve much faster spectrum acquisition.

Arrayed Waveguide Grating (AWG), as a planar dispersive device, is one of the effective ways to be used as an on-chip spectrometer since it has a compact size and can be integrated with other components easily. However, it is rather difficult to achieve high resolution and large working wavelength range simultaneously with just single AWG. This intrinsic contradiction can be alleviated by cascading several AWGs. On the other hand, silicon nitride waveguide, which has the merits of low loss, transparent from visible to infrared and compatible with the Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) processes, has become one of the main photonic integration platforms. Various silicon nitride AWGs with low losses have been demonstrated. In this paper, a spectrum analysis chip constructed by cascading two silicon nitride AWGs is proposed, designed and optimized.

In the proposed spectrum analysis chip, a silicon nitride  $1 \times 6$  AWG with high resolution is cascaded with six  $1 \times 25$  AWGs with coarse resolutions. By using the periodic routing property of the  $1 \times 6$  AWG and setting its Free Spectral Range (FSR) equal to the channel spacing of the  $1 \times 25$  AWG, spectral interleaving can be achieved between the two cascade AWG stages, then relative large working bandwidth and high resolution can be achieved simultaneously. In other words, the first stage AWG is used to provide

high resolution, and the second stage AWG is used to increase the working bandwidth.

In order to optimize the proposed spectrum analysis chip, the first stage AWG and the second stage AWG were designed and optimized firstly. The following results are obtained. For the primary AWG: the center wavelength, the wavelength channel spacing and the free spectral range are 1 549.90 nm, 0.5 nm and 3.0 nm, respectively. The obtained channel insertion loss, adjacent channel crosstalk and non-adjacent channel crosstalk of the center channels are about 1.2 dB,  $-26.1$  dB and  $-39.0$  dB, respectively. The channel insertion loss, adjacent channel crosstalk and non-adjacent channel crosstalk of edge channels are about 2.5 dB,  $-28.7$  dB and  $-24.4$  dB, respectively. The central wavelengths of the six secondary AWGs are set as 1 548.80 nm, 1 549.30 nm, 1 549.75 nm, 1 550.20 nm, 1 550.73 nm and 1 551.22 nm. For each secondary AWG, the wavelength channel spacing and the free spectral range are 3.0 nm and 90.0 nm, respectively. The obtained channel insertion loss, adjacent channel crosstalk and non-adjacent channel crosstalk of the center channels are about 3.6 dB,  $-17.8$  dB and  $-42.2$  dB, respectively. The channel insertion loss, adjacent channel crosstalk and non-adjacent channel crosstalk are about 4.5 dB,  $-12.7$  dB and  $-32.3$  dB, respectively. Then the obtained spectra of the cascade two-stage AWGs were multiplied to obtain the performances of the proposed spectrum analysis chip. Simulation results show that total 150 channels with wavelength resolution of 0.5 nm, which covers a working bandwidth of 75 nm can be achieved. In addition, minimum channel insertion loss of about 4.9 dB and maximum channel insertion loss of about 7.9 dB were obtained. The minimum adjacent and non-adjacent crosstalk between channels are about  $-27.7$  dB and  $-23.0$  dB, respectively. The maximum adjacent channel crosstalk and the maximum non-adjacent crosstalk are about  $-22.6$  dB and  $-12.5$  dB, respectively.

According to the simulation results, we find that the performances of the middle channels are better than those of the edge channels. The reasons cause this phenomenon are analyzed theoretically and simulation results show that different FSRs are obtained for the primary AWG at different diffraction orders, while the wavelength interval of adjacent channels of the secondary AWG is the same. This will introduce center wavelength misalignment between the primary AWG and the secondary AWG, which deteriorates the insertion losses and crosstalks of the edge channels. Finally, some suggestions are given for future optimization.

**Key words:** On-chip integrated spectrometer; Arrayed waveguide grating; Spectral analysis chip; Dispersive device; Integrated optical device

**OCIS Codes:** 130.3120; 230.3120; 120.6200; 300.6190; 060.4230