

激光与光电子学进展

用于 FBG 解调的阵列波导光栅设计与性能分析

张咸休¹, 王存义², 袁配^{1*}, 张东亮¹, 王永千¹

¹北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;

²北京卫星制造厂有限公司机械产品事业部, 北京 100190

摘要 首先从理论上详细分析阵列波导光栅的串扰、插入损耗和带宽对解调系统的动态范围、波长分辨率及解调精度的影响。结果表明, 带宽越大, 解调系统的动态范围越大, 但波长分辨率会有所下降; 串扰越小, 解调精度越高。然后从理论上研究影响阵列波导光栅输出光谱带宽的因素, 如阵列波导光栅的衍射级数、阵列波导数及喇叭口宽度等。结果表明, 当阵列波导数越小和锥形波导的开口宽度越大时, 则阵列波导光栅的通带带宽越大。最后设计一款基于 2% 折射率差二氧化硅材料体系的阵列波导光栅, 其具有带宽宽、损耗低和串扰低等特点, 为基于阵列波导光栅的光纤光栅解调系统的研究提供理论指导, 并指明器件及系统的优化方向。

关键词 光学器件; 阵列波导光栅; 光纤光栅解调系统; 相对光强解调; 光子集成

中图分类号 TN253; TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0923002

Array Waveguide Gratings for FBG Demodulation Design and Performance Analysis

Zhang Xianxiu¹, Wang Cunyi², Yuan Pei^{1*}, Zhang Dongliang¹, Wang Yongqian¹

¹Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

²Mechanical Products Division, Beijing Satellite Manufacturing Co. LTD, Beijing 100190, China

Abstract We theoretically analyze influence of the crosstalk, insertion loss, and bandwidth of the arrayed waveguide grating on the dynamic range, wavelength resolution, and demodulation accuracy of the demodulation system. The results show that the larger the bandwidth, the larger is the dynamic range of the demodulation system; however, the wavelength resolution will decrease. It also shows that the smaller the crosstalk, the higher is the demodulation accuracy. Then, we theoretically investigate the factors affecting the output spectral bandwidth of the arrayed waveguide grating, such as the number of diffraction orders of the arrayed waveguide grating, the number of arrayed waveguides, and the width of the horn. The results show that the passband bandwidth of the arrayed waveguide grating is larger when the number of waveguides is smaller and the width of the tapered waveguide opening is larger. Finally, we design an arrayed waveguide grating based on a 2% refractive index difference silica material system, which has the characteristics of wide bandwidth, low loss, and low crosstalk. It provides theoretical guidance for research on fiber-grating demodulation systems based on arrayed waveguide grating. We then specify the optimization direction of the device and system.

Key words optical devices; arrayed waveguide grating; fiber grating demodulation system; relative light intensity demodulation; photonic integration

OCIS codes 230.7380; 230.7370; 280.4788

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-10-01; 录用日期: 2020-10-22

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(D17021)

*E-mail: yuanpei@semi.ac.cn

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、结构简单和多路复用能力强等内在优点,在测量和监控中有着广泛的应用^[1-2]。波长传感解调是FBG解调的主流方式之一,当FBG所处环境的物理参量发生变化时,FBG的中心波长将发生偏移,通过检测FBG的波长偏移量来检测外界物理参量的变化,这就是FBG波长解调的传感机制^[3]。解调精度决定传感系统性能的优劣,高精度的FBG解调技术是FBG传感应用的关键技术之一。近年来,国内外对FBG解调技术^[4-7]进行大量研究。目前已报道的FBG传感解调方法有可调谐窄带滤波器法、光干涉检测法、匹配光栅滤波器法、可调谐扫描激光器法、CCD(Charge Coupled Device)成像光谱分析法以及宽带光源滤波法等^[8],这些方法均已发展成熟并具有良好的性能。但是随着技术的不断提高,人们对FBG波长解调系统的性能提出了新的要求,即向着尺寸更小、重量更轻、功耗更低和稳定性更好等方向发展。因此,有必要寻找一种新的方法来实现对FBG传感器波长的精确解调,而光子集成回路(PIC)的兴起和发展为FBG解调系统性能的进一步优化和成本进一步降低提供了可能。

近年来,光子集成解调系统中,常用的无源分光器件有马赫-曾德尔干涉仪(MZI)^[9-10]、微环谐振器(MRR)^[11-12]以及阵列波导光栅(AWG)^[13-15]等。其中基于AWG的解调系统依靠相对强度进行解调,其解调速率只受探测器(PD)的响应时间以及数据采集(AD)的采样率的影响,为此可以实现高速解调。因此,基于AWG的解调方法逐渐被人们采纳,在光纤传感领域具有广泛的应用前景^[16-18]。

现有基于AWG的解调系统存在的主要问题:动态范围和波长分辨率受到AWG的影响,两个参数会相互制约。为深入研究并解决这一问题,本文

从理论上详细分析阵列波导光栅的插入损耗、串扰和带宽对解调系统动态范围及波长分辨率的影响,并设计出满足FBG解调系统应用需求的大带宽、低损耗和低串扰的AWG。本研究为基于阵列波导光栅的光纤光栅解调系统的研究提供理论指导,并指明器件及系统的优化方向。

2 AWG性能对解调性能的影响

2.1 AWG解调原理

阵列波导光栅波长解调系统的基本组成框架如图1所示,该系统利用AWG相邻的两个输出通道实现一个FBG的波长解调,其中PC为计算机,ASE为放大自发辐射, λ 为入射光波长, λ_{m+1} 和 λ_m 分别为AWG第 $m+1$ 和第 m 通道的中心波长, λ_{FBG} 为FBG的中心波长。AWG具有波分解复用的功能,可以将宽谱光解复用为具有不同峰值波长的高斯型透射谱,而不同峰值波长的光在不同的输出通道输出,图1(b)中 C_m 和 C_{m+1} 分别为AWG第 m 通道与第 $m+1$ 通道的透射谱, P_{m+1} 和 P_m 分别为AWG第 $m+1$ 及第 m 通道的输出光强。宽谱光源发出的光经过环形器后到达FBG,FBG反射回某波长的窄带高斯光,该高斯光束经过环形器后进入AWG中,AWG各输出通道的光强为光源发射谱、FBG反射谱和AWG透射谱三者的乘积在整个光谱范围的积分,如图1(b)阴影部分所示。当FBG的反射波长随外界压力或温度等的变化而发生漂移时,AWG各通道输出光功率的分布就会发生变化。每个AWG输出通道后连接一个PD,由此可将光信号转换为电信号,利用数据处理电路分析AWG每个输出通道的光功率分布情况,进而得到由FBG反射回的光信号的波长变化情况,从而完成解调^[19]。

假设AWG光谱和FBG光谱的串扰值均为 $-\infty$,则AWG透射谱和FBG反射光谱的表达式为

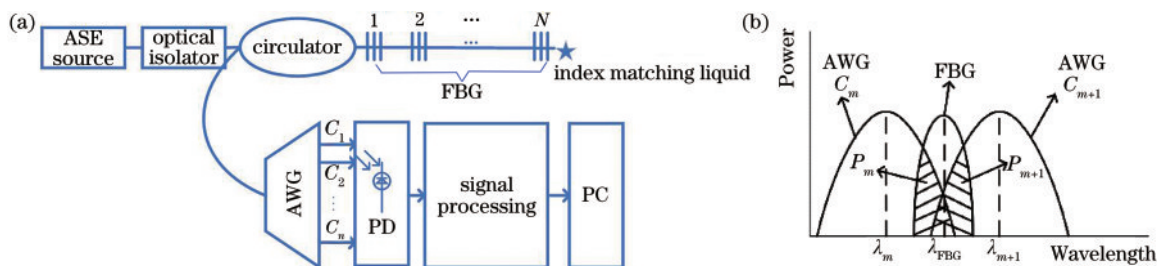


图1 AWG波长解调系统。(a)基本组成;(b)原理示意图

Fig. 1 AWG wavelength demodulation system. (a) Basic component; (b) schematic of principle

$$T_{\text{AWG}}(m, \lambda) = T_0 \exp \left\{ -4 \ln \left[2 \frac{(\lambda - \lambda_m)^2}{\Delta \lambda_m^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

$$R_{\text{FBG}}(\lambda) = R_0 \exp \left\{ -4 \ln \left[2 \frac{(\lambda - \lambda_{\text{FBG}})^2}{\Delta \lambda_{\text{FBG}}^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: $T_{\text{AWG}}(m, \lambda)$ 为 AWG 第 m 通道的透射谱; T_0 为 AWG 传输谱的归一化因子; $\Delta \lambda_m$ 为第 m 通道的半峰全宽, 视相邻通道的半峰全宽相等; $R_{\text{FBG}}(\lambda)$ 是 FBG 的反射谱; R_0 为 FBG 反射谱的归一化因子; $\Delta \lambda_{\text{FBG}}$ 为 FBG 的半峰全宽。解调公式为

$$\ln \left(\frac{P_{m+1}}{P_m} \right) = \frac{8(\ln 2) \Delta \lambda_c}{\Delta \lambda_{\text{FBG}}^2 + \Delta \lambda_m^2} \lambda_{\text{FBG}} - \frac{4 \ln 2 (\lambda_{m+1}^2 + \lambda_m^2)}{\Delta \lambda_{\text{FBG}}^2 + \Delta \lambda_m^2}, \quad (3)$$

式中: $\Delta \lambda_c$ 为 AWG 的信道间隔。由 (3) 式可知, AWG 相邻两通道输出的光强比的对数与 FBG 传感器的反射波长呈线性关系。

2.2 解调性能分析

在实际情况下, AWG 和 FBG 的串扰值不可能是无穷大的, 因此对 (1)~(3) 式进行一定的修正, 通过求解光栅的耦合模方程可以得到 FBG 的反射谱 $B(\lambda)$, 采用高斯近似的方法得到

$$B(\lambda) = b \exp \left\{ -4 \ln \left[2 \frac{(\lambda - \lambda_{\text{FBG}})^2}{\Delta \lambda_{\text{FBG}}^2} \right] \right\} + b_0, \quad (4)$$

式中: b 为光栅的反射谱峰值; b_0 为光栅的背景噪声^[20]。AWG 各通道的输出光谱也可以用高斯函数表达出来, 同时每个通道输出的光谱包含串扰参数, AWG 输出光谱可表示为

$$A_m(\lambda) = a_m \exp \left\{ -4 \ln \left[2 \frac{(\lambda - \lambda_m)^2}{\Delta \lambda_m^2} \right] \right\} + a_{0m}, \quad (5)$$

式中: a_{0m} 为串扰项; a_m 为 AWG 第 m 通道输出的光谱峰值。当 FBG 反射的光同时进入 AWG 的相邻两个通道 (第 m 和第 $m+1$ 通道) 时, 两个通道输出的光强表达式为

$$P_m = \int_0^\infty B(\lambda) \cdot A_m(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

$$P_{m+1} = \int_0^\infty B(\lambda) \cdot A_{m+1}(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

式中: A_m 和 A_{m+1} 分别为 AWG 第 m 和第 $m+1$ 通道的光谱函数。根据 (3) 式可以定义波长解调函数 $\rho(\lambda)$ 为

$$\rho(\lambda) = \ln \left(\frac{P_{m+1}}{P_m} \right). \quad (8)$$

在不同串扰、插入损耗和带宽的情况下, 计算 $\rho(\lambda)$ 与 λ_{FBG} 的关系, 进而分析 AWG 参数对解调性能的影响。

2.2.1 AWG 的串扰对波长解调的影响

假设 $\Delta \lambda_m = \Delta \lambda_{m+1} = 0.3 \text{ nm}$ 、 $\lambda_m = 1550 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{m+1} = 1550.8 \text{ nm}$ 和 $\Delta \lambda_{\text{FBG}} = 0.2 \text{ nm}$ 。串扰分别取 -20 dB 、 -40 dB 和 -60 dB , 计算 AWG 在不同串扰下的解调函数 $\rho(\lambda)$ 随 FBG 波长变化的情况, 结果如图 2 所示。从图 2 可以看到, 当串扰增大时, 解调函数的非线性误差增大, 因此在相同的动态范围内, 增大 AWG 的串扰会降低系统的解调精度。这是因为当 AWG 的串扰增大时, 在其他参数都相同的情况下, AWG 相邻通道之间的交叠范围变小, 而解调函数的线性区只存在于 AWG 通道光谱交叠处, 超出交叠波长范围就会呈现非线性变化, 从而出现图 2 的变化趋势, 所以降低了解调精度。因此, 在设计 AWG 的过程中, 需要尽量降低 AWG 的串扰。

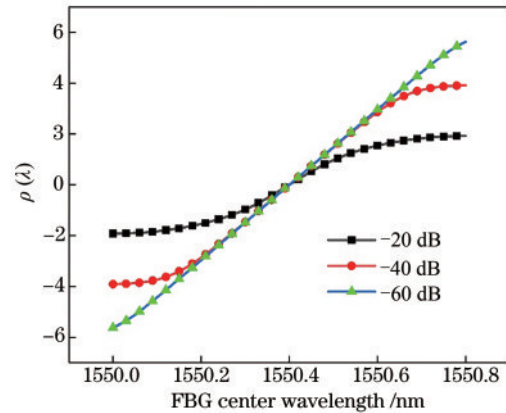


图 2 AWG 在不同串扰下的解调函数与 FBG 中心波长的关系

Fig. 2 Relationship between AWG demodulation function and FBG central wavelength at different crosstalk

2.2.2 AWG 的插入损耗对波长解调的影响

假设 $\Delta \lambda_m = \Delta \lambda_{m+1} = 0.3 \text{ nm}$ 、 $\lambda_m = 1550 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{m+1} = 1550.8 \text{ nm}$ 和 $\Delta \lambda_{\text{FBG}} = 0.2 \text{ nm}$ 。AWG 的串扰为 -40 dB , 计算 AWG 在不同插入损耗的情况下, 解调函数 $\rho(\lambda)$ 随 FBG 波长变化的情况, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看到, 不同插入损耗下的解调函数互相重叠, 说明在光学方面, AWG 的插入损耗不影响解调系统的解调性能。这是因为当 AWG 产生损耗时, 第 m 和第 $m+1$ 通道的插入损耗值 a_m 和 a_{m+1} 基本相等。根据 (4)~(8) 式可知, 解调函数是

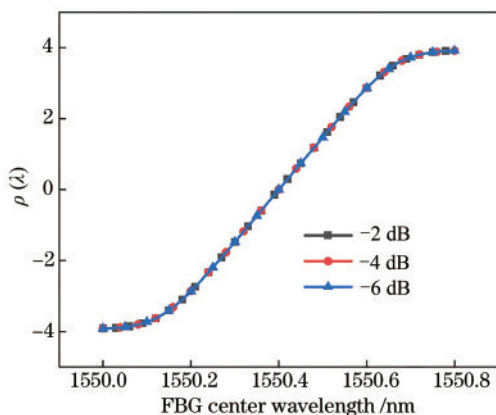


图3 AWG在不同插入损耗下的解调函数与FBG中心波长的关系

Fig. 3 Relationship between AWG demodulation function and FBG central wavelength at different insertion loss

光功率的比对数,所以解调函数不受AWG的插入损耗的影响。但在实际情况下,由于探测器存在暗电流及探测极限,插入损耗的增大将会使探测器接收到的光信号强度变弱,而且会带来两个方面的问题。一方面会给信号采集和电路设计带来很大的难度,另一方面光电流的减小,会使探测误差增大,从而降低分辨率、动态范围和精度等解调参数。因此,考虑实际情况,仍需尽量减小AWG的插入损耗。

2.2.3 AWG的半峰全宽对波长解调的影响

AWG的半峰全宽指光谱峰值一半处的带宽,假设 $\lambda_m = 1550 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{m+1} = 1550.8 \text{ nm}$ 、 $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 0.2 \text{ nm}$ 、AWG的串扰为 -40 dB 和 $\Delta\lambda_m = \Delta\lambda_{m+1}$,信道的半峰全宽分别取 $0.2, 0.3, 0.4 \text{ nm}$,计算AWG在不同半峰全宽下的解调函数 $\rho(\lambda)$ 随FBG波长变化的情况,结果如图4所示。从图4可以看到,当信道的半峰全宽增大时,解调函数的斜率逐渐减小且解调函数的线性区变长,说明解调动态范围增大,但解调分辨率降低,或者说在动态范围相同的条件下,解调精度变高,但分辨率降低。这是因为当半峰全宽增大时,AWG相邻两通道输出光谱的交叠范围增大,可解调范围增大,同时两通道输出光谱的斜率减小,解调分辨率降低。因此,在设计AWG的半峰全宽时,应综合考虑各项性能指标的要求,一般情况下仍需要采用更大带宽的AWG以获得更大的动态范围和精度,采用其他方法(如减小FBG带宽和增大AWG信道间隔等)提高解调分辨率。

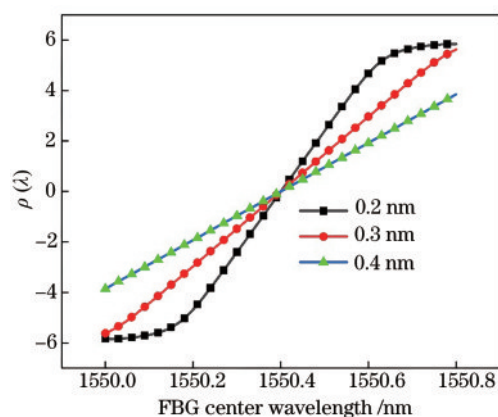


图4 AWG在不同半峰全宽下的解调函数与FBG中心波长的关系

Fig. 4 Relationship between AWG demodulation function and FBG central wavelength at different half-peak full widths

3 AWG设计及仿真

根据第2节的计算与分析,设计一款具有插入损耗小、串扰低和带宽宽的AWG器件,其可以用于实现高精度、高动态范围和高分辨率的光子集成FBG解调系统。使用2%折射率差的硅基二氧化硅材料计算出阵列波导、平板波导和输入/输出波导的有效折射率,信道间隔为 3.2 nm ,中心波长设为 $1.5 \mu\text{m}$,通道数为 3×16 (输入通道数为3,输出通道数为16),包层二氧化硅的折射率为 1.447 ,芯层的折射率为 1.476 ,阵列波导的有效折射率 $n_c = 1.466957$,平板波导的折射率 $n_s = 1.471753$,群折射率 $n_g = 1.480628$ 。本节首先优化AWG中波导的弯曲半径以及减小器件的插入损耗,优化AWG的输入/输出/阵列波导间的最小间距以降低串扰,随后本节模拟AWG的衍射级数、阵列波导数以及AWG中锥形物的开口宽度对AWG光谱带宽的影响,以制备带宽宽的AWG。最后根据仿真数据得到优化后的AWG结构参数并绘制AWG的版图,仿真AWG的光谱图。

3.1 AWG的插入损耗优化

AWG的插入损耗主要来自波导的传输损耗、波导弯曲损耗和波导间耦合损耗,其中传输损耗主要受到半导体工艺的影响,这里可以忽略不计,弯曲损耗主要来自弯曲波导,耦合损耗主要来自AWG的自由传播区(FPR)与阵列/输入/输出波导之间的模式失配。

首先通过光束传播法(BPM)计算波导输出的归

一化功率和弯曲半径的关系,结果如图 5 所示。从图 5 可以看到,随着弯曲半径的增大,弯曲损耗逐渐降低;当弯曲波导大于 $1500\ \mu\text{m}$ 时,输出光功率趋于稳定。因此,实验选取最小的弯曲半径为 $1500\ \mu\text{m}$ 。

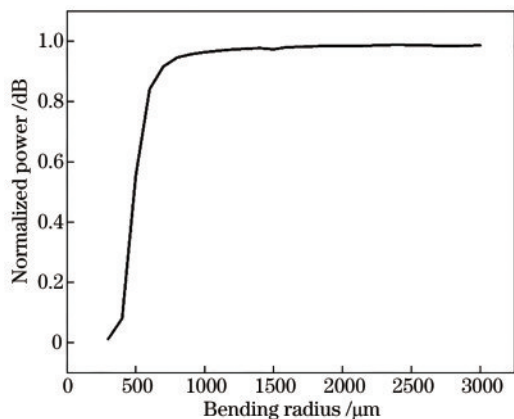


图 5 波导输出的归一化功率与弯曲半径的关系

Fig. 5 Relationship between normalized power of waveguide output and bending radius

在 AWG 中,为了降低波导与 FPR 之间的模式失配,通常使用一个锥形波导进行连接,锥形波导的开口越宽,锥形波导的长度越长,AWG 的插入损耗越低;但同时锥形波导的长度越长,波导之间的光场耦合越大,串扰越大^[21]。鉴于此,模拟锥形波导的开口宽度从 $6\ \mu\text{m}$ 线性变化至 $4\ \mu\text{m}$,锥形波导输出的归一化功率和锥形波导长度的关系如图 6 所示。

从图 6 可以看到,光场的归一化功率随锥形波导长度的增加而变大,但当锥形波导的长度为 $100\ \mu\text{m}$ 时,输出功率变得很缓慢,因此选取锥形波导的长度为 $150\ \mu\text{m}$,开口宽度为 $6\ \mu\text{m}$ 。另外锥形波导的开口宽度会影响到 AWG 的光谱带宽,这将在后续进行说明。

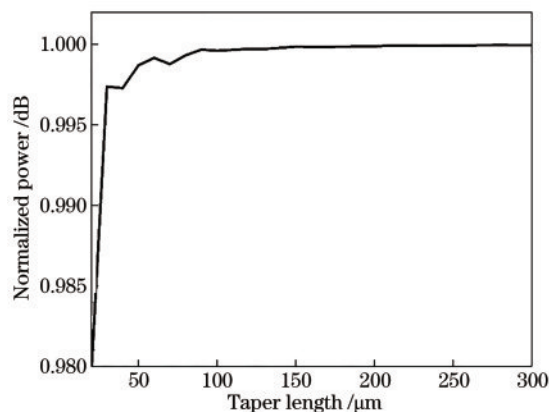


图 6 波导的归一化输出功率与锥形波导长度的关系

Fig. 6 Relationship between normalized output power of waveguide and length of tapered waveguide

3.2 AWG 的串扰优化

AWG 的串扰主要来自阵列波导和输出波导间的耦合,增大波导间距会有效降低 AWG 的串扰。采用 BPM 算法计算不同波导间距的光耦合情况^[21],如图 7 所示。

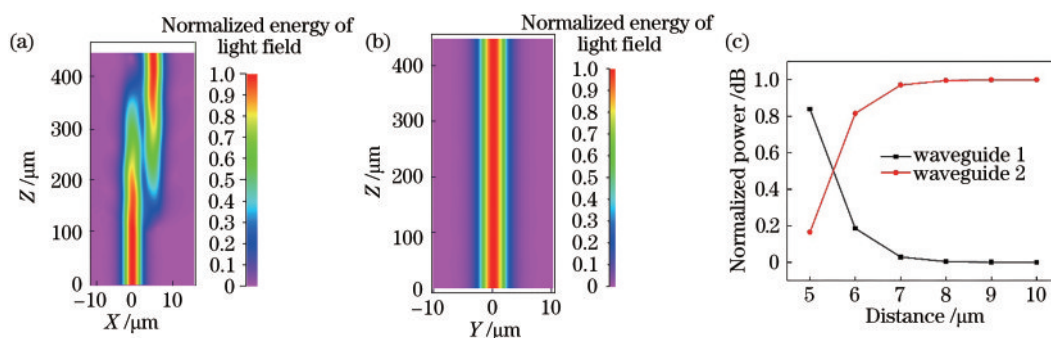


图 7 相邻波导的光场耦合仿真结果。(a)波导间距为 $5\ \mu\text{m}$; (b)波导间距为 $10\ \mu\text{m}$; (c)波导间距与归一化功率的关系

Fig. 7 Simulation results of light field coupling of adjacent waveguides. (a) Waveguide spacing is $5\ \mu\text{m}$; (b) waveguide spacing is $10\ \mu\text{m}$; (c) relationship between waveguide spacing and normalized power

从图 7(a) 可以看到,当波导间距为 $5\ \mu\text{m}$ 时,波导之间很容易发生耦合。从图 7(b) 可以看到,当两相邻波导间距为 $10\ \mu\text{m}$ 时,波导之间几乎没有耦合。从图 7(c) 可以看到,相邻波导的最小间距为 $7\ \mu\text{m}$ 。

3.3 AWG 带宽优化

为了满足解调范围大和解调精度高的要求,需

要对 AWG 的通道带宽进行优化。本节模拟阵列波导数、AWG 衍射级数以及锥形波导的开口宽度对 AWG 带宽的影响。

当衍射级数为 95 时,改变 AWG 的阵列波导数 (PA),可以得到 AWG 的其中一个单通道的输出波形变化,结果如图 8 所示。从图 8 可以看到,当阵列

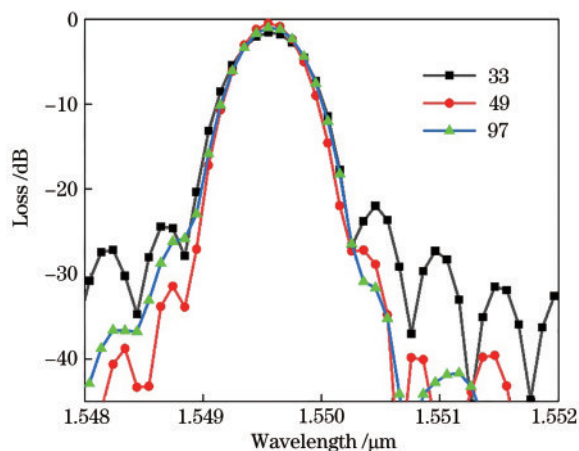


图 8 不同阵列波导数的输出波形变化
Fig. 8 Variation of output waveforms with different array waveguide numbers

波导数减小时,对 AWG 的信道带宽和损耗的影响较小,但串扰增大。

随后,本节模拟 AWG 的衍射级数对 AWG 带宽的影响。当阵列波导数为 49 时,改变 AWG 的衍射级数,可以得到 AWG 的其中一个单通道的输出波形变化,结果如图 9 所示。从图 9 可以看到,当衍射级数减小时,信道带宽增大,但串扰增大,同时损耗也会增大,因此在设计过程中可以选择满足设计需求的衍射级数。

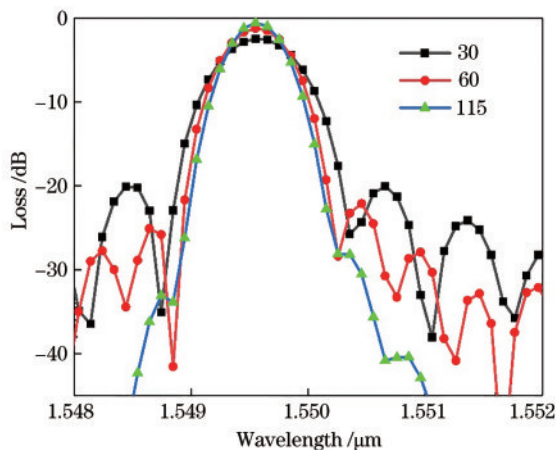


图 9 不同衍射级数的输出波形变化
Fig. 9 Variation of output waveform of different diffraction orders

当 AWG 的其他参数保持不变时,改变锥形波导(锥形波导宽度大的一端)的开口宽度,可以得到 AWG 的其中一个单通道的输出波形变化,结果如图 10 所示。从图 10 可以看到,当锥形波导的开口宽度小于相邻波导间距时,开口宽度越大,AWG 的信道带宽增大,损耗减小,串扰减小。

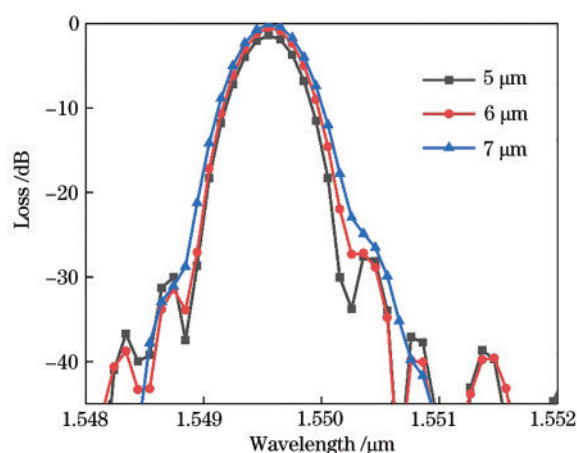


图 10 不同开口宽度的输出波形变化
Fig. 10 Variation of output waveform with different opening widths

综合考虑串扰和损耗,应选择锥形波导的开口宽度宽,衍射级数较小,并适当减少阵列波导数,从而满足 AWG 信道带宽的需求。

根据已有模拟结果以及 AWG 的设计公式,即

$$R \cdot M = \frac{\Delta x \cdot n_s \cdot d \cdot n_c}{\Delta \lambda_c \cdot n_g}, \quad (9)$$

$$F_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_0 \cdot n_c}{\Delta \lambda_c \cdot n_g}, \quad (10)$$

$$F_{\text{FSR}} \geq N \cdot \Delta \lambda_c, \quad (11)$$

$$n_c \cdot \Delta L = M \cdot \lambda_0, \quad (12)$$

可以得到 AWG 的结构参数,如表 1 所示。式中: R 为罗兰圆半径; M 为衍射级数; d 为信道波导的间距; Δx 为阵列波导的间距; F_{FSR} 为自由光谱的光谱谱宽; N 为 AWG 的输出通道数; λ_0 为传输光谱的中心波长; ΔL 为相邻阵列波导的长度差。

采用 BPM 算法对 AWG 进行建模,得到 AWG 的版图如图 11(a) 所示,器件尺寸为 27 mm ×

表 1 AWG 的主要参数
Table 1 Main parameters of AWG

Parameter	Value
Number of channels	16
Central wavelength /nm	1550
Channel spacing /nm	0.8
Free spectral range /nm	16.1387
Diffraction order	95
Length increment /nm	100.6005255
Pitch of adjacent arrayed waveguides /nm	9
Pitch of adjacent input (output) waveguides /nm	7
Length of FPR /nm	1205.155
Number of arrayed waveguides	49

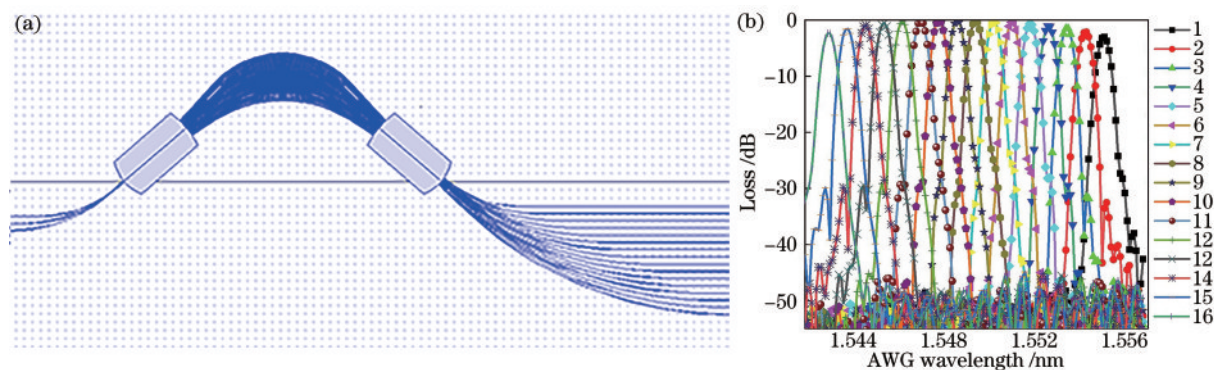


图 11 AWG 的版图及光谱。(a) AWG 设计版图;(b) AWG 光谱图

Fig. 11 AWG map and spectrum. (a) AWG design layout; (b) AWG spectrogram

13 mm, AWG 的光谱如图 11(b)所示。从图 11 可以看到,仿真得到 AWG 的信道半峰全宽大于 1 nm,串扰小于 -35 dB,插入损耗约为 3 dB,满足 FBG 解调应用的需求。

4 结 论

从理论上分析 AWG 的插入损耗、串扰、带宽及信道间隔对解调系统的动态范围、波长分辨率及解调精度的影响。结果表明,AWG 的插入损耗对解调精度及分辨率等性能没有影响,但会增大数据采集及电路设计的难度;串扰越大,解调精度越低;带宽越大,解调动态范围越大,解调分辨率越低。根据分析设计 AWG,从理论上研究 AWG 的各项参数对其输出光谱带宽的影响,分析表明当阵列波导数越小和锥形波导的开口宽度越大时,则输出信道的带宽越大。从理论上指导 AWG 解调系统的设计方法及 AWG 器件的优化方向,为研究 AWG 解调系统奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Trita A, Vickers G, Mayordomo I, et al. Design, integration, and testing of a compact FBG interrogator, based on an AWG spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9133: 91330D.
- [2] Li H Q, Ma X D, Cui B B, et al. Chip-scale demonstration of hybrid III-V/silicon photonic integration for an FBG interrogator[J]. Optica, 2017, 4(7): 692-700.
- [3] Buck T C, Müller M S, Plattner M, et al. Performance analysis of interrogators for fiber Bragg grating sensors based on arrayed waveguide gratings[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7389: 738930.
- [4] Zhu Y S, Gui L, Zhu Y X. Temperature sensing for wavelength demodulation based on recognition by maximum intensity of radio frequency[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728003.
- [5] Zhang W, Su C Q, Zhang M, et al. Theory and method for improving optimization objective function in demodulation algorithm of fiber Bragg grating strain distribution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206002.
- [6] Xu Y L, Ni Y, Yu T, et al. Fiber Bragg grating displacement sensor based on beat frequency demodulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170622.
- [7] Xu O, Fu X S. Temperature-insensitive method for interrogating fiber grating sensor using dual phase-shifted fiber grating and optoelectronic oscillator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(15): 150601.
- [8] Niewczas P, Willshire A J, Dziuda L, et al. Performance analysis of the fiber Bragg grating interrogation system based on an arrayed waveguide grating[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(4): 1192-1196.
- [9] Zhang Z G, Zhang M, Ye P D. MZI-based wavelength demodulation based on recognition by maximum intensity of radio frequency[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728003.

- interrogation system with tunable-FBG[J]. Optoelectronics Letters, 2007, 3(5): 368-371.
- [10] Wu X P, Liu C L, Liu W, et al. Monolithic integrated cyclic 64-channel AWG with MZI filters and arrayed vertical reflecting mirrors for WDM-PON application[J]. Applied Optics, 2019, 58(30): 8282-8289.
- [11] Mesaritakis C, Argyris A, Grivas E, et al. Adaptive interrogation for fast optical sensing based on cascaded micro-ring resonators[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(7): 1595-1601.
- [12] Thanh L T. Optical biosensors based on multimode interference and microring resonator structures[J]. VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology, 2018, 34(1): 118-127.
- [13] Marin Y E, Nannipieri T, Oton C J, et al. Current status and future trends of photonic-integrated FBG interrogators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 946-953.
- [14] Marin Y, Nannipieri T, Oton C J, et al. Fiber Bragg grating sensor interrogators on chip: challenges and opportunities[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1032: 103230D.
- [15] Marin Y E, Celik A, Faralli S, et al. Integrated dynamic wavelength division multiplexed FBG sensor interrogator on a silicon photonic chip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4770-4775.
- [16] Moon H M, Kwak S C, Im K, et al. Wavelength interrogation system for quasi-distributed fiber Bragg grating temperature sensors based on a 50-GHz array waveguide grating[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2598-2604.
- [17] Aswathy C J, Sheela D A C. An interrogation system for spectrally multiplexed fiber Bragg grating sensors[J]. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2016, 5(2): 855-860.
- [18] Marin Y E, Nannipieri T, Oton C J, et al. Integrated FBG sensors interrogation using active phase demodulation on a silicon photonic platform[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3374-3379.
- [19] Su H, Huang X G. A novel fiber Bragg grating interrogating sensor system based on AWG demultiplexing[J]. Optics Communications, 2007, 275(1): 196-200.
- [20] Sano Y, Yoshino T. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(1): 132-139.
- [21] Yuan P, Wu Y D, Wang Y, et al. A 16-channel arrayed waveguide grating based on SOI platform[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(3): 313-317, 326.
- 袁配, 吴远大, 王玥, 等. 基于 SOI 的 16 通道 200GHz 阵列波导光栅[J]. 半导体光电, 2016, 37(3): 313-317, 326.