

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.009

具有平顶光谱响应的氮化硅阵列波导光栅

张赞允^{1,2}, 姜浩¹, 李美欣¹, 孟翠然¹, 杜小伟¹, 张文静¹

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387)

摘要: 为了将氮化硅阵列波导光栅具有的大通道容量、低插入损耗、低串扰、高工艺容差、低温度敏感性等优势应用于光电子通信领域实现波分复用功能, 设计了一种应用于稀疏波分复用(CWDM)的具有平顶光谱响应的四通道氮化硅阵列波导光栅。研究了输出端口非对称宽度的线性模斑转换器及罗兰圆与光栅圆的半径比对器件插入损耗、均匀度及平顶光谱响应的影响。结果表明: 通过提升输出波导宽度以及提高星型耦合器的圆半径比, 使器件在 1 310 nm 波长附近工作时, 能够实现通道间距为 20 nm 的稀疏波分复用/解复用功能, 此时插入损耗为 -1.28 dB (非均匀度为 0.18 dB), 平均串扰为 -25.18 dB; 同时该器件 1 dB 带宽达 11.93 nm, 实现了低损耗、高均匀度的平顶光谱响应, 相比较传统的高斯型器件, 能够有效地提升器件带宽与系统稳定性, 更有利于氮化硅阵列波导光栅器件的商业化应用。

关键词: 波分复用技术; 阵列波导光栅(AWG); 氮化硅; 光子集成技术; 平顶光谱响应; 非均匀度

中图分类号: TN256

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0059-07

Silicon nitride arrayed waveguide grating with flat-top spectral response

ZHANG Zanyun^{1,2}, JIANG Hao¹, LI Meixin¹, MENG Cuiran¹, DU Xiaowei¹, ZHANG Wenjing¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and Systems, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to apply the advantages of silicon nitride arrayed waveguide grating (AWG), such as large channel capacity, low insertion loss, low crosstalk, high process tolerance, and low temperature sensitivity, to the field of optoelectronic communication for achieving functions like wavelength division multiplexing (WDM), a four-channel AWG with a flat-top spectral response for coarse wavelength division multiplexing (CWDM) was designed. The impact of linear mode spot converters with the asymmetric width at the output ports and the radius ratio of the Roland circle to the grating circle on device insertion loss, uniformity, and flat-top spectral response was investigated. The results show that by increasing the output waveguide width and increasing the circular radius ratio of the star coupler, the device achieves sparse wavelength division multiplexing/demultiplexing with a channel spacing of 20 nm when operating near the 1 310 nm wavelength. The insertion loss is -1.28 dB with a non-uniformity of 0.18 dB, and the average crosstalk is -25.18 dB. Meanwhile, this device has a 1 dB bandwidth of 11.93 nm and achieves a flat-top spectral response with low loss and high uniformity. Compared to traditional Gaussian-shaped devices, this device effectively enhances the device bandwidth and system stability, making it more suitable for the commercial applications of silicon nitride AWG devices.

Key words: wavelength division multiplexing technology; array waveguide grating(AWG); silicon nitride; photonic integration technology; flat-top spectral response; non-uniformity

光波分复用是一种高效低成本的提升单传输线传输容量的技术方式, 该技术可以扩展并充分利用光

带宽来满足日益庞大的通信需求。阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 是实现以密集波分复用

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675191, 61974099); 天津市光电检测技术与系统重点实验室开放课题(2023LOTDS004)

通信作者: 张赞允(1986—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为硅基光电子集成方向。E-mail: zhangzanyun@tiangong.edu.cn

(dense wavelength division multiplexing, DWDM)为主、囊括稀疏波分复用(coarse wavelength division multiplexer, CWDM)等其他波分复用技术的核心器件之一。光子集成领域如角度多模干涉耦合器(angle multimode interference coupler, AMMI)^[1-5]、级联马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[6-7]、微环谐振器(ring resonator, RR)^[8-9]、一维光子晶体纳米梁腔^[10]等器件对制造误差非常敏感,这意味着上述器件在实际工作时需要采用热调谐等方式进行波长校准,不利于实现低功耗与低结构复杂度的器件设计。AWG具有大通道容量、低插入损耗、均匀度好等优点,适合与其他器件如光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)等实现集成设计^[11-13]。

AWG 器件的研究较为广泛,在不同的波导平台如平面光波导(planar lightwave circuit, PLC)、绝缘硅(silicon on insulator, SOI)、氮化硅等平台上都取得了重要的研究进展^[14-15]。PLC 平台作为 AWG 目前主流的也是最早的商业平台,基于其低折射率差的特性可以实现良好的器件性能及工艺容差。Li 等^[16]基于二氧化硅平台提出了一种用于 1 Tb/s 或更高速通信系统的 O 波段 20 通道 800 GHz 的阵列波导光栅,成功实现了高速信号的单通道低损耗传输并具有良好的平谱响应;然而该器件尺寸庞大(20.5 mm × 6.85 mm),导致其并不适用于片上集成。SOI 平台有着十分成熟的工艺,这使器件基于高折射率差能实现较小的器件尺寸。Seryinger 等^[17]基于 SOI 平台设计了一种 10 GHz 的 256 通道阵列波导光栅,可在 C 波段实现 1.65 dB 信道均匀性、低于 -18.00 dB 的串扰以及 -1.65 dB 的插入损耗。Fang 等^[18]利用 SOI 高折射率差的特性,通过设计小尺寸的环反射器及层间转换器,在保证性能的同时实现了器件占地面积减半,然而高斯形的输出光谱意味着该器件对于波长偏移的容差能力较差,尤其是对于具有高热光系数及高工艺误差敏感性的硅材料而言。目前主流的平谱实现方式是在输入波导中添加如多模干涉耦合器^[19](multimode interference coupler, MMI coupler)、抛物线形 taper^[19-20]、MZI^[21]等结构,这会使光在进入器件之前激发高阶模式,所实现的平顶光谱响应在插入损耗、通道串扰等方面会有较大的恶化。相比上述 2 种材料平台,氮化硅在集成度、热稳定性以及工艺容差能力等方面可以取得良好的平衡,与此同时,在器件性能方面也表现出色^[22]。Hiraki 等^[23]提出了一种具有硅氧氮薄膜包层的 200 GHz 氮化硅 AWG,其可实现 -5.6 dB 的插损、-27 dB 的串扰以及小于 0.1 nm 的偏振相关波长偏移。Hu 等^[24]提出了一种

结合氮化硅 AWG 与硅基反射环的设计方式,实现了器件尺寸的减小,然而多层材料结构的制备工艺比较复杂。Li 等^[25]提出了一种应用于 2 μm 波段的氮化硅 AWG,具有 2.67 nm 的通道间距,可实现 -1.57 dB 的插入损耗以及 -23.06 dB 的最小串扰,但是均匀度较差且为高斯光谱响应。综上所述,尽管目前关于 AWG 的研究已取得诸多阶段性成果^[26-29],但其在插入损耗、非均匀度以及带宽等关键性能指标上,与实际应用的要求仍存在一定差距。

实现平顶响应对于保证器件在集成系统中实现波长对准具有重要意义。基于此,本文设计了基于 400 nm 氮化硅厚度、应用于 CWDM 的四通道平顶光谱响应 AWG,采用二氧化硅作为包覆层,通过添加非对称的线性模斑转换器(taper)作为输出端口,实现聚焦波长范围的增加,继而得到平顶光谱响应。与传统平顶光谱响应相比,该方法的插入损耗大幅减小;与传统的均匀度优化方式相比,该方法通过优化罗兰圆与光栅圆的半径比实现了更好的非均匀度,更有利于器件尺寸的减小。本文采用光束传播法(beam propagation method, BPM)、本征模式扩展法(eigen mode expansion, EME)以及变分域有限差分法(variational finite difference time domain, varFDTD)对器件结构进行优化,分别设计了参考 AWG 以及具有平顶光谱响应的优化 AWG,并进行建模仿真,以期实现低损耗、高均匀度的平顶光谱响应,满足片上集成的 CWDM 性能需求。

1 阵列波导光栅基本原理

阵列波导光栅的结构示意图如图 1 所示^[30]。

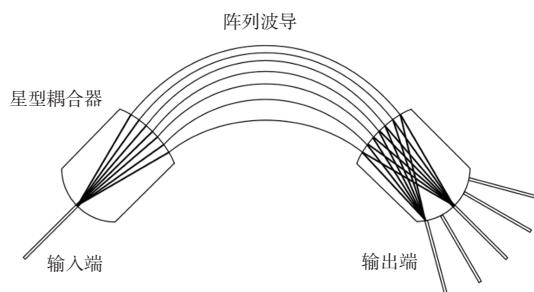


图 1 阵列波导光栅的结构示意

Fig.1 Structural schematic of arrayed waveguide grating

入射光在输入星型耦合器中将发散并被阵列波导耦合,阵列长度差 ΔL 将使相同波长的光信号以不同的波前倾斜抵达输出端,从而实现稳定的光谱输出。

根据光栅方程,AWG 的应用公式可表示为:

$$n_s d \sin \theta_i + n_c d \sin \theta_o + n_c \Delta L = m \lambda \quad (1)$$

式中: n_s 与 n_c 分别表示平板波导与条形波导的有效折射率; d 为中心阵列波导与相邻阵列波导在与光栅圆接口处两点的间距; θ_i 与 θ_o 分别为输入输出波导与罗兰圆中心轴夹角; λ 为聚焦波长; ΔL 为相邻阵列波导之间的长度差; m 表示衍射级数。式(1)简化可得:

$$n_c \Delta L = m \lambda_0 \quad (2)$$

式中: λ_0 表示当 θ_i 与 θ_o 同时为零时,该位置干涉聚焦的中心波长。同样的对于其他波长通道而言,保持 θ_i 为 0 即光从星型耦合器中心位置输入时,式(1)可改写为:

$$n_s d \sin \Delta \theta + n_c \Delta L = m \lambda' \quad (3)$$

式中: $\Delta \theta$ 为输出通道和中心输出通道之间的角度; λ' 为对应不同输出角度处干涉聚焦的波长。根据几何关系与能量发散角及上述公式,通过确定已知参数即可得到星型耦合器的聚焦半径以及最小阵列波导数目,其简化公式分别可表示为:

$$R = \frac{n_s n_c}{n_g} \frac{d_a d_r}{m \Delta \lambda} \quad (4)$$

$$N \geq \frac{2 \lambda_0 R}{w_c n_s d_a \sqrt{2 \pi}} + 1 \quad (5)$$

式中: R 为聚焦半径; d_a 为阵列波导间距; d_r 为输出波导间距; n_g 为波导群折射率; $\Delta \lambda$ 为通道间距; N 为最小阵列波导数目; w_c 为模场尺寸,通常可近似为波导宽度。星型耦合器工作原理如图 2 所示。

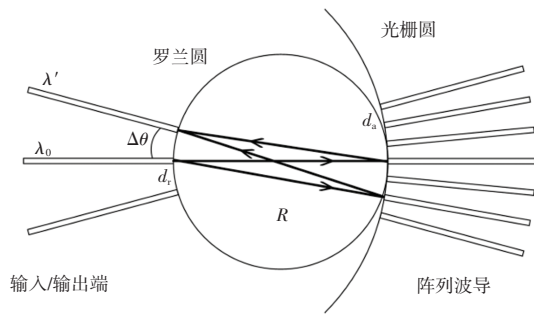


图 2 星型耦合器原理示意

Fig.2 Schematic of the principle of the star coupler

传统的平顶光谱响应是使输入光在进入星型耦合器前由于特定的结构设计激发模场后,由在输出面形成的像场以及输出波导中的模场相叠加产生的。由式(3)可知,为实现一种低损耗的平顶光谱响应,可在维持输入结构不变的同时增加输出波导的宽度,以提升聚焦范围 $\Delta \theta$,通过对相邻聚焦波长的高斯形光谱进行叠加即可实现平顶光谱响应。由于采用该方式仅增加了输出波导宽度,因此对器件的插入损耗没有带来明显恶化。然而由于中心波长不同以及对高斯形输出

包络应用范围的扩展,使得输出波形存在不一致性且均匀度较差。

为了解决由平顶光谱响应导致的均匀度恶化,可以从自由光谱范围(free spectral range, FSR)进行分析。FSR 决定着 AWG 可以实现的最大输出通道数目及非均匀度,由于单个 FSR 表现为一种高斯形包络,典型方法是通过增加各 FSR 中心间距使输出包络展宽,从而优化边缘通道的损耗及通道均匀度,但会导致中心通道损耗增加。根据角色散方程可确定:

$$FSR = \frac{n_c \lambda_0}{m n_g} \quad (6)$$

典型 AWG 通常将 FSR 设为总输出通道间距的 2 倍以上来优化非均匀度,或是在原有结构上直接增加阵列波导数目,这会导致器件尺寸增大,恶化阵列间串扰并降低可靠性。本文采用了一种改变罗兰圆与光栅圆半径比的方法,能够在维持各 FSR 中心间距不变的同时拓展单个 FSR 高斯形输出包络的宽度,从而实现边缘通道与中心通道非均匀度的优化。图 3 展示了参考 AWG 以及优化后 AWG 的原理示意。

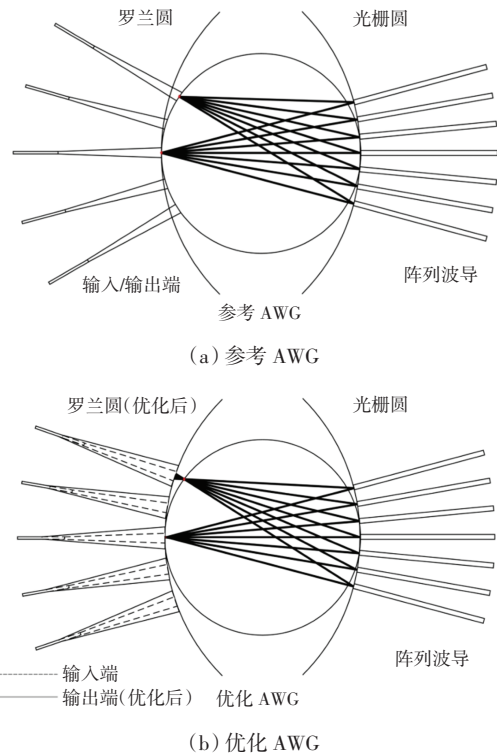


图 3 参考 AWG 与优化 AWG 原理示意

Fig.3 Schematic of principles of reference AWG and optimized AWG

图 3 中:参考 AWG 采用了典型设计;优化 AWG 如输出端所示提升了圆半径比,以期改善通道均匀度,并拓宽了输出波导宽度,以期实现低损耗的平顶响应。

2 阵列波导光栅结构设计

氮化硅 AWG 器件的整体设计版图如图 4 所示, 结构采用端面耦合方式进行布局。



图 4 氮化硅 AWG 版图

Fig.4 Layout of silicon nitride AWG

本文基于 400 nm 厚的氮化硅薄膜进行设计, 采用满足单模传输条件的条形波导作为阵列波导及输入输出波导, 以避免光在传播过程中激发高阶模式而引起相位误差与额外损耗, 其波导宽度与有效折射率曲线如图 5 所示。当波导宽度小于 1.2 μm 时满足单模传输, 为实现低损耗的 TE 模传输以及避免阵列波导之间发生倏逝波耦合, 本文选择 0.7 μm 作为条形波导宽度, 此时波导的有效折射率约为 1.648。

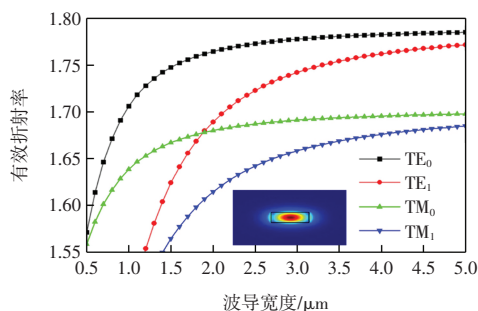


图 5 模式有效折射率与波导宽度曲线

Fig.5 Mode effective index as a function of waveguide width

根据选定的波导尺寸, 本文对弯曲半径与损耗进行分析, 如图 6 所示, 为实现低弯曲损耗以及小尺寸的版图面积, 本文选取最小弯曲半径为 50 μm, 此时弯曲损耗约为 0.01 dB, 能够满足低弯曲损耗的设计需求且不会导致版图面积过大。

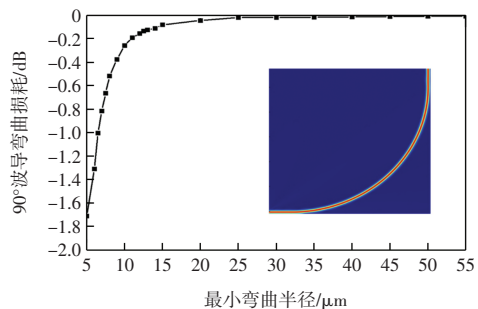


图 6 90°弯曲波导传输损耗曲线

Fig.6 Transmission loss curve of 90° curved waveguide

注: 插图 of 最小弯曲半径为 50 μm 的 90°弯曲波导的场场。

典型 AWG 输出光谱为高斯形, 由于制造工艺或特定工作环境的影响, 器件可能会发生波长偏移而无法正常工作。目前业界通常采用有源的方式进行波长校准^[3], 这会导致工艺复杂并使能耗增加。实现平顶光谱响应不仅有利于提高器件工艺容差, 从系统级应用考虑, 更有利于与外围器件实现波长对准从而提高系统可靠性。本文将输入 taper 宽度设计为 3 μm, 以避免模式泄露以及光在星型耦合器内的反射。当输入波导宽度保持不变时, 增加输出波导宽度有利于提高光谱响应的 1 dB 带宽, 但会导致平坦度下降, 如图 7 所示。此外, 由于通道间输出波长存在差异, 对于不同通道选择了不同的输出波导宽度以实现通道一致性、矩形系数与 1 dB 带宽之间的平衡。通过对通道间距、特征工艺尺寸等方面的综合考虑, 分别取 5.20、5.30、5.30 及 5.39 μm 作为 4 条输出波导的宽度, 来调整不同输出通道的输出波形。

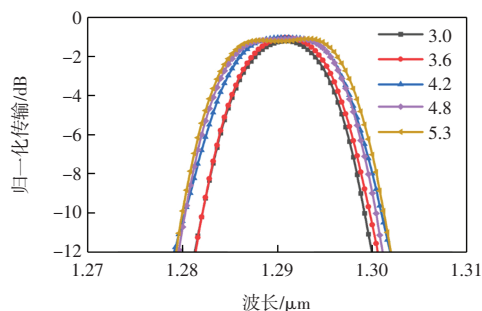


图 7 输出波导宽度与光谱响应关系

Fig.7 Relationship between output waveguide width and spectral response

典型 AWG 采用罗兰圆及凹面光栅原理设计, 使罗兰圆与光栅圆的半径长度比为 0.5。通过改变这一比值, 可在维持各 FSR 中心波长位置不变的同时对单个周期的输出包络进行展宽, 从而优化均匀度。图 8 展示了均匀度与半径长度比的关系。

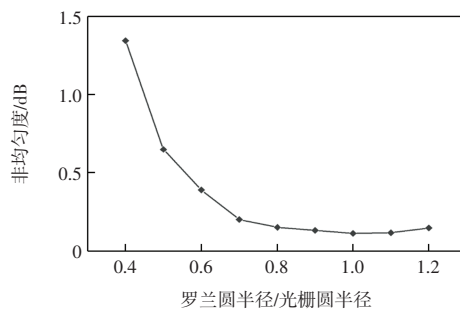


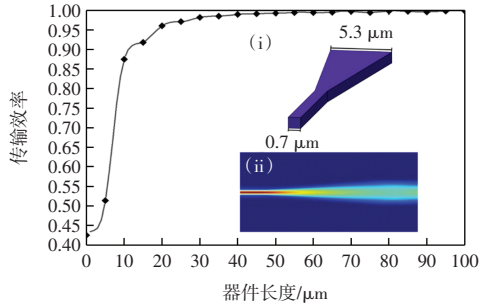
图 8 均匀度与半径比关系

Fig.8 Relationship between nonuniformity and ratio of radius

由图 8 可以看出, 非均匀度随着半径长度比的增大而逐渐减小, 且优化的趋势也逐渐放缓, 并最终在

半径长度比为 1.0 时到达最低点。因此,本文选用 1.0 作为星型耦合器半径长度比。

为了进一步优化 AWG 中央通道,本文基于 EME 算法设计了线性 taper,如图 9 所示。



注:插图 i 为结构模型,ii 为 taper 的模场。

图 9 输出端线性 taper 结构及性能仿真

Fig.9 Structure and performance simulation of output linear tapers

由于采用线性 taper,为避免引入损耗,需要设计较大的 taper 长度,因此将终端宽度为 5.3 μm 的线性 taper 的长度设计为 81.55 μm。对其他 3 个不同终端宽度的输出 taper 的长度也进行了类似的调整。

3 阵列波导光栅仿真结果与分析

笔者根据设计公式得到初步的设计参数,并基于 BPM 算法建模仿真,利用其快速仿真的优点迭代器件结构设计。将迭代优化后的器件结构基于 varFDTD 算法进行性能验证,并适当调整模型。参考 AWG 与优化 AWG 采用的关键参数如表 1 所示。

表 1 参考 AWG 与优化 AWG 参数

Tab.1 Parameters for reference AWG and optimized AWG

结构参数	参考 AWG 数值	优化 AWG 数值
衍射级数	5	5
阵列波导间距/μm	2.2	2.2
输出波导间距/μm	5.49	5.49
光栅圆半径/μm	200	200
阵列波导数目	35	35
圆半径比	0.5	1
阵列 taper 长度/μm	40	40
阵列 taper 宽度/μm	2.1	2.1
输入 taper 长度/μm	60	60
输入 taper 宽度/μm	3	3
输出 taper 长度/μm	60.00	79.55/81.55/81.55/83.60
输出 taper 宽度/μm	3.00	5.20/5.30/5.30/5.39

参考 AWG 与优化 AWG 采用的衍射级数均为 5,这表明 2 种器件的高斯形输出包络是相同的。衍射级

数 m 与自由光谱范围 FSR 呈负相关,即 m 减小时会使各周期的 FSR 展宽,当总输出通道范围固定时,这种展宽会使高斯形包络在该范围内的衰减趋势放缓,从而实现更高的通道均匀度。优化 AWG 通过采用改变半径比的方法一步扩展输出包络,从而实现高均匀度、高一致性的平顶光谱响应,但改变半径比会导致各周期的输出包络边缘发生重叠,从而导致可用的通道容量下降。因此,采用该方法需要综合考虑对通道容量的需求。

参考 AWG 与优化 AWG 的仿真结果如图 10 所示。由图 10 可知,本文提到的 2 种优化方式(即采用非对称宽度的线性 taper 并调整半径长度比)能够以较小的性能牺牲实现低损耗的平顶光谱响应。器件的 1 dB 带宽与 3 dB 带宽都得到了很大的提升,且 4 个输出通道的输出波形都比较均匀。

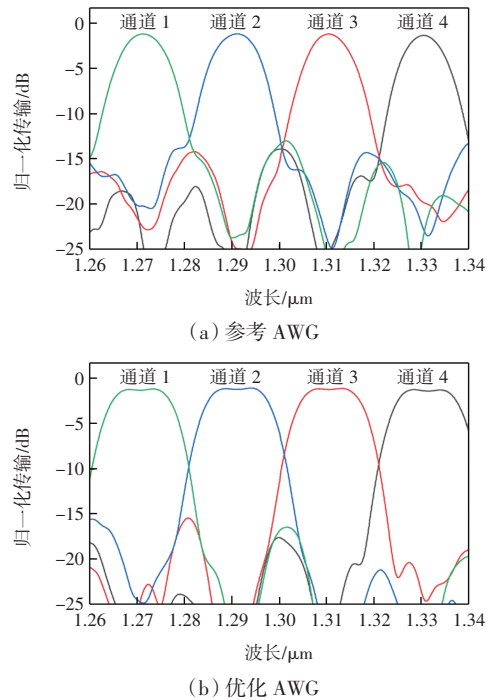


图 10 AWG 仿真结果

Fig.10 Simulation results of AWG

该氮化硅 AWG 波分(解)复用器的仿真数据结果如表 2 所示。

由表 2 可知,相比参考器件,优化器件插入损耗仅有约 0.03 dB 的恶化,造成这一光损的原因可能是对半径长度比的调整使得聚焦位置与输出波导位置没有严格对准以及非对称输入/输出波导本身的影响。此外,平均串扰得到了约 4.5 dB 的优化,这是由于边缘通道的 taper 尺寸与中央通道不同,有利于通道间串扰的降低。边缘通道的串扰性能相比中央通道较差,这可能是由于在像面上输出通道两侧未设置输出

表 2 参考 AWG 与优化 AWG 性能

Tab.2 Performances of reference AWG and optimized AWG

性能参数	参考 AWG 数值	优化 AWG 数值
插入损耗/dB	-1.25	-1.28
通道串扰/dB	-20.71	-25.18
非均匀度/dB	0.18	0.18
1 dB 带宽/nm	6.28	11.93
3 dB 带宽/nm	10.45	15.03
占用面积/($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	850 \times 300	850 \times 300

波导的成像位置,导致边缘通道发生光泄露。通过在边缘通道两侧设置冗余波导对非工作所需的光进行引导,有助于提升工作输出通道的平均通道串扰。虽然本文采用调整半径长度比的方法对光谱均匀度进行优化,但是优化 AWG 相比参考 AWG 在均匀度性能上没有变化,这是由于输出波长范围扩展所导致的边缘通道光谱形状恶化抵消了这种优化。这种恶化主要源自于器件通道容量不足,即设计 FSR 无法满足扩展后的输出波长范围。最终优化器件的 1 dB 带宽相比参考器件提升了约 5.65 nm,并实现了均匀的平顶光谱响应。但遗憾的是器件的 3 dB 带宽也增加了约 4.58 nm,尽管两种带宽的增量并非线性,但 3 dB 带宽的提升对于大滚降、低串扰的性能需求仍是不利的,因此,器件仍具有一定的优化空间。

4 结 论

本文提出了一种基于 400 nm 厚度的氮化硅、应用于稀疏波分(解)复用的高性能阵列波导光栅设计。研究表明:

(1) 采用非对称宽度的线性 taper 作为输出端口可实现低损耗的平顶光谱响应,其插入损耗为-1.28 dB,其 1 dB 带宽达 11.93 nm,对于提升器件稳定性、系统应用可靠性具有积极作用。

(2) 通过优化罗兰圆与光栅圆半径长度比的方法,均衡了多模波导及抛物线形 taper 对均匀度的恶化,器件尺寸为 850 $\mu\text{m}\times$ 300 μm ,各个通道之间的串扰平均为-25.18 dB,在插入损耗、非均匀度等性能指标方面可与参考器件相比拟。

(3) 采用本文结构优化方法能够实现一种低损耗、高均匀度的平顶光谱响应,可以满足片上集成的 CWDM 性能需求,展现了氮化硅 AWG 器件良好的商业化应用前景,但在插入损耗、通道串扰、器件尺寸、光谱矩形系数等方面仍有优化空间。

参考文献:

- [1] BUCIO T D, KHOKHAR A Z, MASHANOVICH G Z, et al. N-rich silicon nitride angled MMI for coarse wavelength division (de) multiplexing in the O-band[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1251-1254.
- [2] 张赞允,程倩,刘宏伟,等.应用于 CWDM 的四通道角度多模干涉耦合器的仿真设计[J].聊城大学学报(自然科学版), 2021, 34(3):33-39.
ZHANG Z Y, CHENG Q, LIU H W, et al. Simulation design of four-channel angled multimode interference coupler for cwdm applications[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2021, 34(3): 33-39(in Chinese).
- [3] ZHANG Z Y, LIU T J, ZHANG K X, et al. Bidirectional grating based interleaved angled mmi for high-uniformity wavelength division (de) multiplexing and surface-normal fiber packaging[J]. Applied Optics, 2021, 60(19): 5615-5622.
- [4] ZHANG Z Y, XING J M, HUANG B J, et al. Interleaved bidirectional angled multimode interferometer for wavelength division (de)multiplexings[J]. Optical Engineering, 2023, 62(10): 107101.
- [5] ZHANG Z Y, ZHANG W J, JIANG H, et al. Integrating angled multimode interferometer with bragg grating filters for coarse wavelength division (de) multiplexing with optimized shape factor[J]. Journal of Optics, 2024, 26(11): 115802.
- [6] ZHANG Z Y, DU X W, JIANG H, et al. Flat-passband silicon nitride cascaded mach-zehnder interferometer for coarse wavelength division multiplexing[J]. Journal of Nanophotonics, 2025, 19(1): 016004.
- [7] YEN T H, HUNG Y J. Fabrication-tolerant CWDM (de) multiplexer based on cascaded Mach-Zehnder interferometers on silicon-on-insulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(1): 146-153.
- [8] HOSNI M I, SINGH K, MANDALAWI Y, et al. Filterless and compact ANy-WDM transmission system based on cascaded ring modulators[J]. IEEE Access, 2022, 10: 122226-122233.
- [9] CHEN X L, GU M M, CHEN J J, et al. Low-power and tunable silicon-photonics micro-ring WDM device with NiSi heater[J]. Optik, 2021, 245: 167624.
- [10] 王水柔,陈鹤鸣,刘雪,等.波长间隔为 3.2 nm 的电光调制和波分复用集成器件研究[J].光子学报, 2022, 51(5): 0551312.
WANG S R, CHEN H M, LIU X, et al. An integrated device for electro-optic modulation and wavelength division multiplexing with the wavelength channel spacing of 3.2 nm[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5): 0551312 (in Chinese).
- [11] LI H Q, ZHANG S, ZHANG Z, et al. Silicon waveguide integrated with germanium photodetector for a photonic-integrated FBG interrogator[J]. Nanomaterials, 2020, 10(9): 1683.

- [12] LI S F, YUAN P, LI T, et al. SOI-based 15-channel arrayed waveguide grating design for fiber Bragg grating interrogator[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2023, 53: 101113.
- [13] YUE Z Z, LI W B, ZHENG D, et al. Performance enhancement of arrayed waveguide grating-based fiber Bragg grating interrogation assisted by random forest[J]. *Electronics Letters*, 2023, 59(1): e12682.
- [14] KARNIK T S, DAO K P, DU Q Y, et al. High-efficiency mid-infrared InGaAs/InP arrayed waveguide gratings[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 5056-5068.
- [15] DOERR C R, CHEN L, BUHL L L, et al. Eight-channel SiO₂/Si₃N₄/Si/Ge CWDM receiver[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(17): 1201-1203.
- [16] LI S Y, ZHANG J S, WANG L L, et al. The O-band 20-channel 800 GHz arrayed waveguide grating based on silica platform for 1 Tb/s or higher-speed communication system[J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 156: 108475.
- [17] SEYRINGER D, SERECUNOVA S, UHEREK F, et al. 256-channel 10 GHz AWG demultiplexer for ultra-dense WDM[C] //2023 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bucharest, Romania: IEEE, 2023: 1-4.
- [18] FANG Q, CHEN X, ZHAO Y, et al. Folded silicon-photonics arrayed waveguide grating integrated with loop-mirror reflectors[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 1-8.
- [19] 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.
ZHANG L Y, WU Y D, AN J M, et al. Research on flattening of arrayed waveguide grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4): 379-385(in Chinese).
- [20] 袁博, 姜浩, 刘艺林, 等. 超紧凑抛物线形硅基光模斑转换器[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2024, 37(1): 1-8.
YUAN B, JIANG H, LIU Y L, et al. Ultra-compact parabolic silicon-based optical spot-size converter[J]. *Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition)*, 2024, 37(1): 1-8(in Chinese).
- [21] KAMEI S, KOHTOKU M, SHIBATA T, et al. Athermal mach-zehnder interferometer-synchronised arrayed waveguide grating multi/demultiplexer with low loss and wide passband[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(3): 201-202.
- [22] LELIT M, SŁOWIKOWSKI M, FILIPIAK M, et al. Passive photonic integrated circuits elements fabricated on a silicon nitride platform[J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1398.
- [23] HIRAKI T, AIHARA T, NISHI H, et al. Deuterated SiN/SiON waveguides on Si platform and their application to C-band WDM filters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 2500207.
- [24] HU H, FANG Q, WANG S, et al. Folded 15-channel arrayed waveguide gratings on silicon nitride platform with loop reflector[J]. *Optics Communications*, 2021, 500: 127321.
- [25] LI D, LIU Y, XU K. Design of silicon nitride arrayed waveguide grating at 2 μm wavelength band[C]//Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application. Kunming, China: SPIE, 2021, 11763: 2712-2715.
- [26] LI H Q, WANG Y J, SUN Y Q, et al. Design and fabrication of SU-8 polymer arrayed waveguide gratings based on flexible PDMS substrates[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(9): 2213-2218.
- [27] LI H Q, WANG Y J, LIN Z, et al. Design, fabrication and characterization of arrayed waveguide grating devices based on different polymers[J]. *Optics Communications*, 2023, 530: 129139.
- [28] HAN Q, MÉNARD M, SHI W. Superlattice arrayed waveguide grating in silicon nitride[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(22): 1411-1414.
- [29] HUANG R, ZHAO Y X, SHE X J, et al. High resolution, high channel count silicon arrayed waveguide grating router on-chip[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 14308-14316.
- [30] SMIT M K, VAN DAM C. Phasor-based WDM-devices: Principles, design and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(2): 236-250.
- [31] LIU Y J, LI Z Y, LI D, et al. Thermo-optic tunable silicon arrayed waveguide grating at 2 μm wavelength band [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 4900308.

本文引文格式:

张赞允, 姜浩, 李美欣, 等. 具有平顶光谱响应的氮化硅阵列波导光栅[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(5): 59-65.
ZHANG Z Y, JIANG H, LI M X, et al. Silicon nitride arrayed waveguide grating with flat-top spectral response[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(5): 59-65(in Chinese).

(责任编辑:孙广宇)