光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022102702

基于新型掺钪氮化铝的级联马赫-曾德尔结构(解)复用器

陈心逸[1]，胡　超[1]，郑少南[1*]，赵兴岩[1]，钟其泽[1]，
董　渊[1]，胡　挺[1]，贾连希[1,2,3]，古元冬[1,2]

(1. 上海大学 微电子学院，上海 201800；2. 上海微技术工业研究院，上海 201800；
3. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所，上海 200050)

摘　要： 在新型掺钪(Sc)氮化铝($Al_{1-x}Sc_xN$)集成光学平台上设计了插入损耗低、传输通道谱线平坦的 O 波段四通道波分(解)复用器，并提出了优化方法。所设计的器件结构基于级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)滤波器，结合弯曲波导结构的定向耦合器改善波长敏感度。针对粗波分复用(CWDM)应用的特性，文章使用粒子群算法(PSO)提升器件性能优化的效率，通过调整器件结构的设计参数对四路通道的传输谱线质量进行优化。针对 0%，9%，23%的掺 Sc 浓度，设计的解复用器表现出宽达约 15.6 nm 的 1-dB 带宽和小于 0.1 dB 的插入损耗，传输谱线呈“盒状”响应，各通道间串扰均优于－30.6 dB。

关键词： 硅光子学；波分复用；马赫-曾德尔干涉仪；掺钪氮化铝

中图分类号： TN252　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0025－07

Cascaded Mach-Zehnder Interferometer (De)multiplexers Based on Novel Scandium-doped Aluminum Nitride

CHEN Xinyi[1], HU Chao[1], ZHENG Shaonan[1], ZHAO Xingyan[1], ZHONG Qize[1],
DONG Yuan[1], HU Ting[1], JIA Lianxi[1,2,3], GU Yuandong[1,2]

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN; 2. Shanghai Industrial Micro-Technology Research Institute, Shanghai 201800, CHN; 3. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (SIMIT), Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai 200050, CHN)

Abstract: An O-band 4-channel wavelength division (de)multiplexer with low insertion loss and flat-top transmission spectra is presented based on the novel scandium (Sc)-doped aluminum nitride ($Al_{1-x}Sc_xN$) photonics platform, and an optimization method is proposed. The designed multiplexer was based on cascaded Mach-Zehnder interferometer (MZI) filters, using directional couplers with curved waveguides to reduce wavelength dependence. Particle swarm algorithm (PSO) was adopted to increase the efficiency of device optimization according to the characteristics of coarse wavelength division multiplexing (CWDM) applications. The transmission quality of four channels was improved by adjusting the design parameters of the device structure. For Sc doping concentrations of 0%, 9% and 23%, the designed multiplexer has 1-dB bandwidth as wide as about 15.6 nm and negligible insertion loss of less than 0.1 dB, showing “box-like” transmission response. The crosstalks of four channels are less than －30.6 dB.

Key words: silicon photonics; WDM; MZI; scandium-doped aluminum nitride

收稿日期：2022－10－27.

*通信作者：郑少南　**E-mail:** snzheng@shu.edu.cn

0 引言

近年来,与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的 AlN 材料引起了人们的极大兴趣,AlN 已广泛应用于压电微机电系统(MEMS)[1-3]。在集成光子学中,AlN 也被运用于制备电光调制器[4]、声光调制器[5]、隔离器[6]等器件。向 AlN 中掺杂 Sc 元素可以进一步提升该材料在 MEMS 和集成光子学中的应用潜力[7]。已有工艺验证,在 40%的 Sc 掺杂浓度下,材料压电系数提升了 400%~500%,压电 MEMS 器件的性能显著提高[8]。Huang 等[9]研究了基于绝缘体上硅(SOI)平台上 $Al_{0.6}Sc_{0.4}N$ 的声光调制器,表现出优异的声光耦合性能,实现微波光子滤波和宽光谱的声光调制。AlN 的非中心对称晶体结构使其具有显著的线性电光(Pockels)效应,基于 AlN 材料的光调制器显示出损耗低和调制速度高的优点[10]。进而人们推测,将 Sc 元素掺杂到 AlN 中会引起 AlN 晶体的晶格畸变并增强其电光效应,从而进一步加快其调制速度[11]。

作为光通信系统的另一个关键组成部分,粗波分复用(Coarse Wavelength Division Multiplexing,CWDM)通常与光调制器在片上集成。目前,CWDM(解)复用器主要在 SOI 平台上实现,得益于 Si 的高折射率使得其在波导内对光模式具有良好的限制能力[12-16]。Pathak 等[17]设计了硅基阵列波导光栅(AWG)和阶梯光栅的(解)复用器,并对比了其在不同通道间距下的传输性能。Liu 等[18]在 SOI 平台上设计了基于级联多模波导光栅的四通道 CWDM(解)复用器,并通过引入 SU-8 上包层降低了热灵敏度。但 Si 与包层材料 SiO_2 的折射率差大(Δn 约为 2.02)[19],Si 波导较窄,且 Si 的热光(TO)系数大(约为 1.86×10^{-4}/K)[20],所以当器件存在工艺偏差或工作的环境温度发生变化时,会出现明显的波长漂移,影响器件的传输性能。与之相比,AlN 材料的 TO 系数相对较低(3.56×10^{-5}/K),与 SiO_2 的折射率差较小(Δn 约为 0.55)[21],更有利于降低(解)复用器对环境温度变化和制造误差的敏感度。而目前,基于 $Al_{1-x}Sc_xN$ 材料的多路波分(解)复用器仍未见报道。本文首次提出了一种基于 Sc 掺杂 AlN 的 CWDM(解)复用器,在实现与 $Al_{1-x}Sc_xN$ 调制器的单片集成的同时,优化器件传输性能,使其在 CWDM4 中得到进一步的应用。

级联 MZI 结构有低插入损耗、高带宽的特点[22-23]。Dwivedi 等[24]在 SOI 平台上设计了 100 GbE 的粗波分复用器,在控制插入损耗小于 2.5 dB 的同时实现通道平坦度达到 13 nm。Xu 等[25]在 MZI 结构中加入弯曲的定向耦合器和极化旋转器,设计了偏振不敏感的波分复用器,串扰可达 −24.63 dB。本文在 $Al_{1-x}Sc_xN$ 光学平台上设计了一种基于级联 MZI 结构的四通道滤波器,选用 1 271,1 291,1 311,1 331 nm 作为通道中心波长,使用弯曲波导的定向耦合器代替传统结构来改善定向耦合器对波长敏感的现象[26]。所设计器件显示出盒状光谱响应,具有小于 0.1 dB 的低插入损耗和宽达约 15.6 nm 的 1-dB 带宽,满足 ITU-T G.694.2.[27]的规定标准。器件通道间串扰均小于 −30.6 dB,各通道间隔离度高。

1 基本原理

单级 MZI 由两个定向耦合器(DC)和一对相位延迟臂组成,如图 1 所示,传输光谱使用传输矩阵法(TMM)进行计算[28]。单个 DC 的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix}E_1\\E_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}c & -\mathrm{j}s\\-\mathrm{j}s & c\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_{10}\\E_{20}\end{bmatrix}=\phi_{DC}(\alpha)\begin{bmatrix}E_{10}\\E_{20}\end{bmatrix}\quad(1)$$

其中,E_1,E_2 分别为输出端口 1 和输出端口 2 的电场强度,E_{10},E_{20} 分别为输入端口 1 和输入端口 2 的电场强度,α 为 DC 的耦合效率,同侧端口传输系数 $c=\sqrt{1-\alpha}$,对侧端口传输系数为 $-\mathrm{j}s=-\mathrm{j}\sqrt{\alpha}$。而一对相位延迟臂的传输矩阵为

$$\boldsymbol{\phi}_{delay}=\begin{bmatrix}e^{-\mathrm{j}\Delta\varphi} & 0\\0 & 1\end{bmatrix}\quad(2)$$

其中,相位差 $\Delta\varphi=\Delta L\beta=\Delta L\dfrac{2\pi n_e}{\lambda}$,$\beta$ 为波导的传播常数,n_e 为波导的有效折射率,λ 为输入波长;ΔL 为上下两臂的臂长差,即 L_1-L_2,可以通过以下公式求得:

$$\Delta L=\lambda^2/(FSR\cdot n_g)\quad(3)$$

其中,FSR 为自由光谱范围,n_g 为波导群折射率。所以,单级 MZI 的传输矩阵计算公式为

$$\boldsymbol{\phi}_{MZI}=\boldsymbol{\phi}_{DC}(\alpha_2)\boldsymbol{\phi}_{delay}\boldsymbol{\phi}_{DC}(\alpha_1)\quad(4)$$

其中,α_1,α_2 分别指 MZI 结构中两个 DC 的耦合效率。单级 MZI 呈现一个周期性的、类似于正弦函数的传输谱线,为了配合 CWDM 的传输特点改善滤波谱线,本文选择将单个滤波级的延迟级加为三个,以达到传输通带谱线更平坦、滤波级呈现盒状谱线

响应的效果[22]。此时单个滤波级的计算公式为

$$\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{Filter}}=\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{DC}}(\alpha_4)\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{delay3}}\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{DC}}(\alpha_3)=\begin{bmatrix}\sqrt{1-\alpha_4} & -\mathrm{j}\sqrt{\alpha_4}\\ -\mathrm{j}\sqrt{\alpha_4} & \sqrt{1-\alpha_4}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Delta\varphi_3} & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\cdots\begin{bmatrix}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Delta\varphi_1} & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sqrt{1-\alpha_1} & -\mathrm{j}\sqrt{\alpha_1}\\ -\mathrm{j}\sqrt{\alpha_1} & \sqrt{1-\alpha_1}\end{bmatrix} \tag{5}$$

其中，$\alpha_1\sim\alpha_4$ 分别为四个 DC 的耦合效率，$\Delta\varphi_1\sim\Delta\varphi_3$ 分别为三个延迟级引起的相位差。

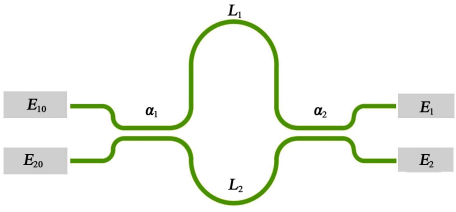
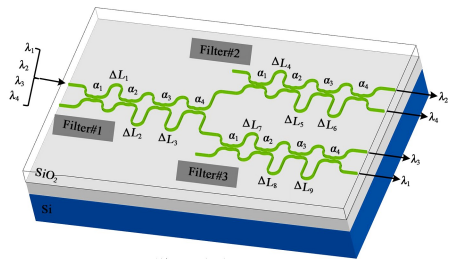


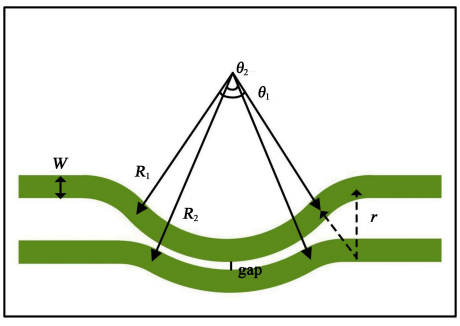
图 1　单级 MZI 结构示意图

2　器件结构

在 CWDM 应用中，同一器件若在接收端作解复用器，则也可在发射端作为复用器使用，所以本文的仿真计算以 CWDM 解复用器为例。其结构如图 2(a)所示，以单级滤波器为单位，由三个滤波级以二叉树结构连接组成四通道解复用器。根据 ITU-T G.694.2.标准[27]，四个通道 λ_1，λ_2，λ_3，λ_4 的中心波长分别为 1 271，1 291，1 311 和 1 331 nm。为了实现四通道解复用，需要两个自由光谱范围(FSR)



(a) 四通道 CWDM 解复用器

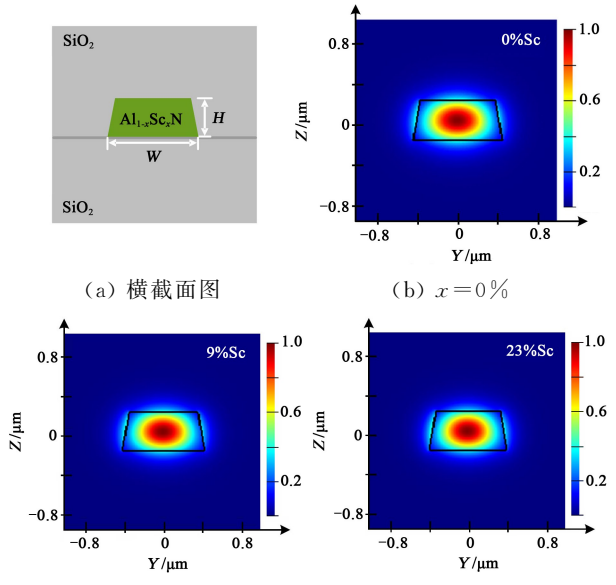


(b) 弯曲 DC

图 2　CWDM 解复用器结构示意图

不同的滤波级[22]，所以滤波器 # 1 的 FSR 为 40 nm，将入射光分成奇数通道(λ_1 和 λ_3)与偶数通道(λ_2 和 λ_4)两组。滤波器 # 2 和滤波器 # 3 的 FSR 为 80 nm，进一步将 λ_1 与 λ_3，λ_2 与 λ_4 分波。

图 3(a)为 $Al_{1-x}Sc_xN$ 波导的横截面示意图，据 Yoshioka 等[29]报道，随着 x 的增加，$Al_{1-x}Sc_xN$ 的二阶非线性($\chi^{(2)}$)增强，但带隙减小，波导的传输损耗也会增大，根据实验结果分析，$Al_{1-x}Sc_xN$ 将在掺 Sc 浓度大于 23%时变为直接带隙。所以本文的掺 Sc 浓度 x 选择了一个最小值 0%和一个较大值 23%，并取一个中间值 9%，在拓展 $Al_{1-x}Sc_xN$ 材料二阶非线性等性能的同时维持较小的波导损耗，表征 CWDM 解复用器在 $Al_{1-x}Sc_xN$ 平台上的可行性。图 3(b)，(c)，(d)显示了在 Sc 掺杂浓度分别为 0%，9%和 23%时横向电场基模(TE0)的电场强度分布情况。$Al_{1-x}Sc_xN$ 薄膜的厚度(H)为 400 nm，参考现有的 AlN 工艺[30-32]，将波导的侧壁角度设为 80°。通过有限差分法(FDM)在中心波长 λ 为 1 301 nm 处仿真，得到不同掺 Sc 浓度下的单模波导宽度(W)分别为 0.9，0.85 和 0.8 μm。计算得其对应的群折射率(n_g)分别为 2.102，2.168 和 2.239，代入公式(3)可计算得各个延迟级的臂长差 $\Delta L_1\sim\Delta L_9$，如表 1 所示。考虑色散关系可以计算得波导在不同波长下的有效折射率。弯曲波导的 DC 结构如图 2(b)所示，使用两个圆心相同、波导宽度相同、半径分别为 R_1 和 R_2 的弯曲波导构成 DC 的耦合区域。弯曲波导圆心角为 θ_1 和 θ_2，其中 θ_1 设为 70°，两个



(a) 横截面图　(b) $x=0\%$

(c) $x=9\%$　(d) $x=23\%$

图 3　$Al_{1-x}Sc_xN$ 波导的横截面图与波导 TE0 模式分布图

波导的间距(G)固定设为 300 nm,则 R_1 和 R_2 符合 $R_2=R_1+W+g$ 的关系。为了减少损耗,弯曲波导与直波导间使用半径(r)为 80 μm 的弯曲波导平缓连接。

表 1 各延迟级臂长差

Sc 浓度/%	ΔL_1/μm	ΔL_2/μm	ΔL_3/μm	ΔL_4/μm	ΔL_5/μm	ΔL_6/μm	ΔL_7/μm	ΔL_8/μm	ΔL_9/μm
0	17.43	34.85	35.15	8.87	17.74	18.04	8.71	17.43	17.73
9	15.82	31.64	31.94	8.06	16.12	16.41	7.91	15.82	16.11
23	15.91	31.82	32.09	8.10	16.20	16.47	7.95	15.91	16.18

3 仿真与优化

3.1 耦合效率优化

由公式(5)可以看出,滤波级的谱线与耦合效率的设计有密切关系。单个滤波级中含有四个 DC,设计时需要调整四个 DC 的耦合效率组合,来改善滤波级的传输谱线形状。如果使用传统的参数迭代方式扫描结构参数,并进行人工筛选来寻找解复用器的最优设计结构,虽然扫描的参数范围能涵盖整个参数取值空间,但需要扫描的参数过多,优化效率低。为了更高效地进行器件参数优化,需要利用计算机算法来辅助搜索庞大的参数空间。因此,本文选用粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)[33-34]调整各单个滤波级中的耦合效率,以寻找传输光谱满足 1-dB 带宽大于 13 nm 且各通道间串扰水平低的最优结构。

该算法计算能力强大且易于与本文所设计器件的结构参数结合。利用 PSO 优化的参数包括每个滤波级中弯曲 DC 的耦合效率,组成一个向量 $\boldsymbol{X}=[\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4]$,称为粒子(Particle),这四个参数的值决定粒子在四维解空间中的位置坐标。若初始设置的粒子数越多,虽然搜索的参数范围越大,但计算量增大,计算效率降低,反之若设置的粒子数过少,则无法搜索整个参数范围。为了更有效率地搜索整个解空间,我们初始设定 20 个粒子,这 20 个粒子的集合称为一个群(Swarm)。每个粒子位置的优劣程度由适应度函数(FF)来评估。选定四个通道中中心波长为 λ_n 的通道进行优化,因为本文优化结构参数的最终目的是得到一定带宽条件下通道间串扰最低的解复用器,首先设定适应度函数:

$$FF=\max\left(\frac{T_{\lambda_n}}{T_{\text{else}}}\right) \tag{6}$$

其中,T_{λ_n} 为 λ_n 通道中心波长处的透射率,而 $T_{\lambda_{\text{else}}}$ 为除 λ_n 通道外其他三个通道中心波长处的透射率,$n=1,2,3,4$。然后,在算法中加入判断条件,即通道 1-dB 带宽不小于 13 nm[28],排除不满足该判断条件的参数组合。设定该算法的最终目标为计算得到适应度函数 FF 的最小值,对应为 λ_n 通道串扰最小的情况。

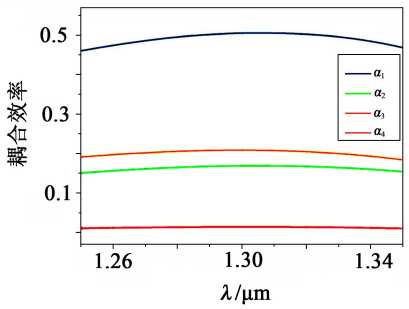
该算法给每个粒子分配随机位置和随机速度作为起始,通过比较两个"最优值"并储存对应粒子坐标的方式在解空间中迭代搜索最优粒子位置,其中一个是粒子找到的最优解,称为个人最佳 p_i,另一个是整个群体找到的最优解,称为全局最佳 p_g。当迭代完成,即适应度函数 FF 最小时,p_g 对应的粒子位置坐标即为所求的最优耦合效率组合。最终计算得到的最优耦合效率如表 2 所示。MZI 的工作原理是将一束光通过 DC 分成两束,经过不同光路产生光程差后,再次合束时出现干涉现象,其通带形状类似于正弦波。通过 DC 的不同分光比调整单级滤波器中各个 MZI 的光束干涉情况,达到通道带宽增加、旁瓣抑制的效果,从而增加器件对波长偏移的容忍度,降低通道间串扰。

表 2 PSO 算法优化得到的耦合效率

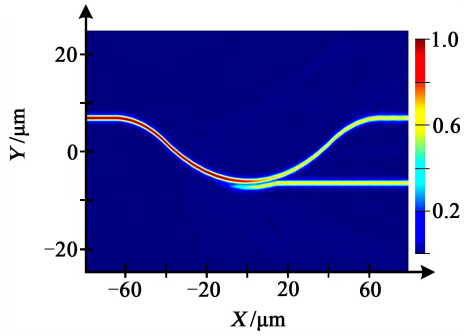
Sc 浓度/%	α_1	α_2	α_3	α_4
0	0.5	0.165 3	0.204 9	0.010 2
9	0.5	0.169 3	0.202 1	0.010 5
23	0.5	0.168 1	0.204 3	0.010 8

3.2 结果分析

本文采用三维时域有限差分法(FDTD)计算了不同弯曲半径 R_1 和圆弧角 θ_2 下弯曲 DC 的耦合效率,并对弯曲 DC 的波长敏感度以 $x=0\%$ 的 $Al_{1-x}Sc_xN$ 材料为例进行了分析。图 4(a)为波长在 1.25~1.35 μm 范围内,弯曲 DC 的耦合效率随波长的变化情况,可以看出 α_1,α_2,α_3 和 α_4 的耦合效率在 100 nm 的波长范围内分别仅变化 0.045,0.025,0.015 和 0.004,在解复用器的工作波长范围内偏移较小。图 4(b)为掺 Sc 浓度为 0%、耦合效率 α 为 0.5 时,弯曲 DC 内部的光强度分布,计算的弯曲 DC 额外损耗可以忽略不计。各浓度器件中弯曲 DC 的结构参数如表 3 所示。



(a) 弯曲 DC 耦合效率随波长的变化



(b) 耦合效率为 0.5 的 DC 内部光强度分布

图 4　0%Sc 弯曲 DC 的耦合性能

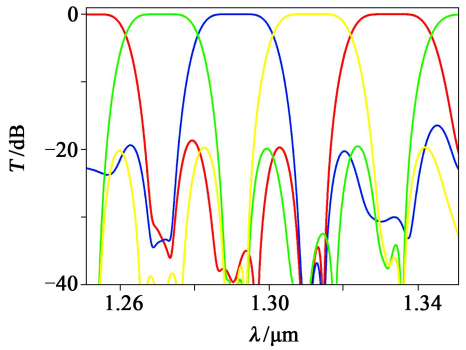
表 3　各浓度器件中弯曲 DC 的结构参数

浓度/%	α_1		α_2		α_3		α_4	
	R_1/μm	θ_2/°	R_1/μm	θ_2/°	R_1/μm	θ_2/°	R_1/μm	θ_2/°
0	117	39.5	85.5	49.5	90	48	72	57
9	115	40	84.3	50.5	86	49.5	70	58
23	117	41	84.5	52	89	50.5	71	60

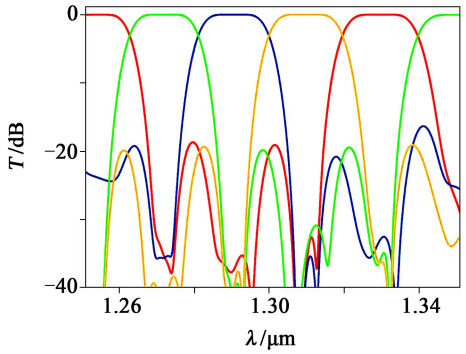
图 5 为针对掺 Sc 浓度分别为 0%，9%和 23%的 AlN 设计的四通道解复用器的透射光谱。通过透射光谱表征得的器件四通道各传输性能的平均值如表 4 所示，可以看出设计所得的解复用器各个通道的平均插入损耗均小于 0.1 dB。器件呈现出较大的平均 1-dB 带宽，均大于 15.1 nm，满足 ITU-TG.694.2.[28]标准规定的大于 13 nm 的 1-dB 带宽，四个通道的透射光谱峰形近似于“盒状”，且顶端谱线平坦，有利于中心波长在通道维持稳定的传输质量。针对不同 Sc 浓度设计的解复用器中，通道中心波长对应的串扰最高为−30.6 dB，串扰水平均优于−30 dB，各通道串扰较低，传输质量好。

表 4　不同 Sc 掺杂浓度的 CWDM 解复用器的四通道传输性能

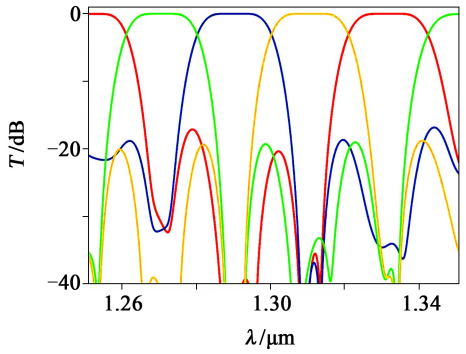
Sc 浓度/%	插入损耗/dB	1-dB 带宽/nm	串扰/dB
0	0.002 0	16.2	−30.6～−40.3
9	0.001 4	15.1	−32.4～−36.9
23	0.001 9	15.9	−31.3～−43.3



(a) $x=0\%$



(b) $x=9\%$



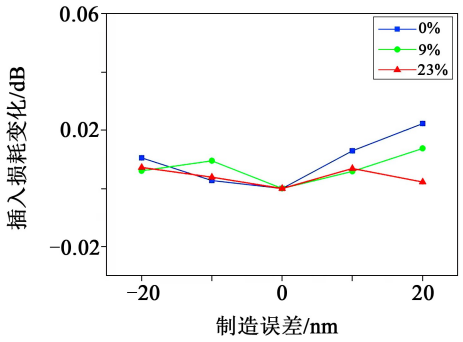
(c) $x=23\%$

图 5　$Al_{1-x}Sc_xN$ 材料 CWDM 解复用器的透射光谱

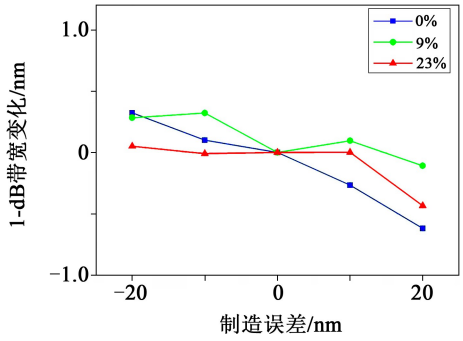
3.3　制造误差分析

本文还对可能制造误差对各个性能的影响进行了分析，计算了器件关键尺寸的制造误差在±20 nm 的情况下对所设计器件的性能影响，有利于考虑制造前可能的结构参数补偿，如图 6 所示。所有性能数据都以没有制造误差的结果为基准进行归一化，负值表示值减小。从图 6(a)，(b)中可以看到，最大插入损耗劣化仅为 0.022 dB，最大 1-dB 带宽劣化为−0.6 nm，证明波导宽度的制造误差对插入损耗和 1-dB 带宽影响有限。值得注意的是，如图 6(c)所示，平均通道串扰的最大变化为+8.8 dB，受波导宽度误差影响较明显，可能是由于波导工艺误差导致弯曲 DC 的耦合效率偏离设计值，耦合效率

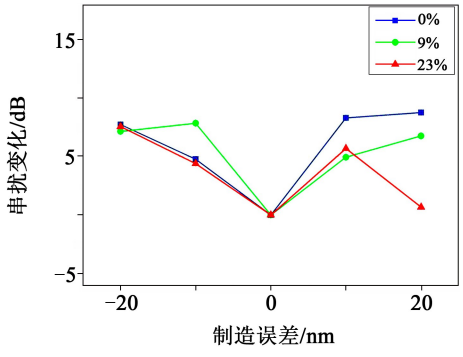
随波长的变化幅度增加[35]，使得串扰水平上升。



（a）插入损耗



（b）1-dB 带宽



（c）通道间串扰

图 6 波导制造误差对器件各性能的影响

4 结论

本文首次基于 $Al_{1-x}Sc_xN$ 光学平台，选用 0%，9%，23%三个掺 Sc 浓度，提出了针对 CWDM 应用的级联 MZI 结构四通道滤波器的设计，并使用弯曲 DC 降低其波长敏感度。基于 TMM 法分析了(解)复用器传输性能与器件设计参数之间的关系，并结合 PSO 算法对器件结构进行设计参数的优化计算，以获得最佳的性能。设计的(解)复用器共有四个通道，通道间距均为 20 nm。不同浓度所设计器件的平均通道插入损耗均小于 0.1 dB，传输通带平坦。设计器件四通道的 1-dB 带宽均大于 15.1 nm 且通道间串扰均优于 −30.6 dB。本文设计的高性能(解)复用器证明新型 $Al_{1-x}Sc_xN$ 集成光学平台在提供高效数据传输方面有很大应用前景。

参考文献：

[1] Marauska S, Dankwort T, Quenzer H J, et al. Sputtered thin film piezoelectric aluminium nitride as a functional MEMS material and CMOS compatible process integration [C]// Procedia Engineering, 2011: 1341-1344.

[2] Ralib A A M, Nordin A N, Alam A, et al. Piezoelectric thin films for double electrode CMOS MEMS surface acoustic wave (SAW) resonator[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(9): 1931-1940.

[3] Segovia-Fernandez J, Do J, Jiang X N, et al. Monolithic AlN MEMS-CMOS resonant transformer for wake-up receivers [C]// 2017 IEEE Inter. Ultrasonics Symposium (IUS), 2017: 1-4.

[4] Zhu S Y, Zhong Q Z, Hu T, et al. Aluminum nitride ultralow loss waveguides and push-pull electro-optic modulators for near infrared and visible integrated photonics [C]// 2019 Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition (OFC), 2019: 1-3.

[5] Tadesse S A, Li M. Sub-optical wavelength acoustic wave modulation of integrated photonic resonators at microwave frequencies[J]. Nature Communications, 2014, 5(11): 5402.

[6] Sohn D B, Kim S, Bahl G. Time-reversal symmetry breaking with acoustic pumping of nanophotonic circuits[J]. Nature Photonics, 2018, 12(2): 91.

[7] Zhang X, Zheng S, Zhong Q, et al. Aluminum scandium nitride waveguide in the near-infrared [C]// 2021 Inter. Photonics and OptoElectronics Meetings (POEM), 2022: 78-85.

[8] Akiyama M, Kano K, Teshigahara A. Influence of growth temperature and scandium concentration on piezoelectric response of scandium aluminum nitride alloy thin films[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 95(16): 162107.

[9] Huang C K, Shi H T, Yu L F, et al. Acousto-optic modulation in silicon waveguides based on piezoelectric aluminum scandium nitride film[J]. Adv. Optical Materials, 2022, 10(6): 2102334.

[10] Xiong C, Pernice W H P, Tang H X. Low-loss, silicon integrated, aluminum nitride photonic circuits and their use for electro-optic signal processing[J]. Nano Lett., 2012, 12(7): 3562-3568.

[11] Zhu S Y, Zhong Q, Li N X, et al. Integrated ScAlN photonic circuits on silicon substrate[C]// 2020 Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2020: 1-2.

[12] Singh N, Xin M, Vermeulen D, et al. Octave-spanning coherent supercontinuum generation in silicon on insulator from 1.06 μm to beyond 2.4 μm[J]. Light Science and Applications, 2017, 6(1): 235-242.

[13] Shi W, Yun H, Lin C, et al. Ultra-compact, flat-top

demultiplexer using anti-reflection contra-directional couplers for CWDM networks on silicon[J]. Opt. Express, 2013, 21(6): 6733-6738.

[14] Yen T H, Hung Y J. Fabrication-tolerant CWDM (de) multiplexer based on cascaded Mach-Zehnder interferometers on silicon-on-insulator[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 39(1): 146-153.

[15] Lin Y J, Lee S L, Yao C L. Four-channel coarse-wavelength division multiplexing demultiplexer with a modified Mach-Zehnder interferometer configuration on a silicon-on-insulator waveguide[J]. Appl. Opt., 2003, 42(15): 2689-2694.

[16] Hu Y, Gardes F Y, Thomson D J, et al. Coarse wavelength division (de) multiplexer using an interleaved angled multimode interferometer structure[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(25): 1394.

[17] Pathak S, Dumon P, Van Thourhout D, et al. Comparison of AWGs and echelle gratings for wavelength division multiplexing on silicon-on-insulator[J]. IEEE Photon. J., 2014, 6(5): 1-9.

[18] Liu D J, Zhang M, Shi Y C, et al. Four-channel CWDM (de) multiplexers using cascaded multimode waveguide gratings[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2020, 32(4): 192-195.

[19] Zheng Y, Li Y, Yan Y, et al. Compact low-loss low-crosstalk echelle grating demultiplexer on silicon-on-insulator for CWDM[J]. Optik, 2022, 249: 168236.

[20] Tao S, Huang Q, Zhu L, et al. Athermal 4-channel (de-) multiplexer in silicon nitride fabricated at low temperature [J]. Photon. Research, 2018, 6(7): 686-691.

[21] Zhu S, Hu T, Xu Z, et al. An improved thermo-optic phase shifter with AlN block for silicon photonics [C]// 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2019: 1-3.

[22] Horst F, Green W M J, Assefa S, et al. Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-) multiplexing [J]. Opt. Express, 2013, 21(10): 11652-11658.

[23] Gao G, Chen D, Tao S, et al. Silicon nitride O-band (de) multiplexers with low thermal sensitivity[J]. Opt. Express, 2017, 25(11): 12260-12267.

[24] Dwivedi S, De Heyn P, Absil P, et al. Coarse wavelength division multiplexer on silicon-on-insulator for 100 GbE[C]// 2015 IEEE Inter. Conf. on Group Ⅳ Photonics (GFP), 2015: 9-10.

[25] Xu H, Liu L, Shi Y. Polarization-insensitive four-channel coarse wavelength-division (de) multiplexer based on Mach-Zehnder interferometers with bent directional couplers and polarization rotators[J]. Opt. Lett., 2018, 43(7): 1483-1486.

[26] Xu H, Shi Y. Flat-top CWDM (de) multiplexer based on MZI with bent directional couplers [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(2): 169-172.

[27] ITU-T R G. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid [Z]. ITU-T G. 694. 2 Recommendation, 2003.

[28] Madsen C K, Zhao J H. Optical Filter Design and Analysis: A Signal Processing Approach [M]. John Wiley & Sons, 1999.

[29] Yoshioka V, Lu J, Tang Z, et al. Strongly enhanced second-order optical nonlinearity in CMOS-compatible $Al_{1-x}Sc_xN$ thin films [J]. APL Materials, 2021, 9(10): 101104. 1-101104. 6.

[30] Jung H, Poot M, Tang H X. In-resonator variation of waveguide cross-sections for dispersion control of aluminum nitride micro-rings[J]. Opt. Express, 2015, 23(24): 30634-30640.

[31] Dong B, Luo X, Zhu S, et al. Aluminum nitride on insulator (AlNOI) platform for mid-infrared photonics [J]. Opt. Lett., 2019, 44(1): 73-76.

[32] Sun Y, Shin W, Laleyan D A, et al. Ultrahigh *Q* microring resonators using a single-crystal aluminum-nitride-on-sapphire platform [J]. Opt. Lett., 2019, 44(23): 5679-5682.

[33] Li J Y, Bao L, Jiang S, et al. Inverse design of multifunctional plasmonic metamaterial absorbers for infrared polarimetric imaging[J]. Opt. Express, 2019, 27(6): 8375-8386.

[34] Coelho L D, Alotto P. Tribes optimization algorithm applied to the Loney's solenoid [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2009, 45(3): 1526-1529.

[35] Morino H, Maruyama T, Iiyama K. Reduction of wavelength dependence of coupling characteristics using Si optical waveguide curved directional coupler [J]. J. of Lightwave Technol., 2014, 32(12): 2188-2192.

作者简介：

陈心逸(1997—)，女，硕士研究生，主要从事基于马赫-曾德尔结构的CWDM波分复用器件方面的研究；

郑少南(1991—)，女，博士，副教授，研究方向为微纳光电子器件、集成光学、中红外光子器件。