

引用格式: ZHANG Jiashun, AN Junming, SUN Bingli, et al. Fabrication of Silica Based Silicon 20 Channel Cyclic Arrayed Waveguide Grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):0623003

张家顺,安俊明,孙冰丽,等. 硅基二氧化硅 20 通道循环型阵列波导光栅制备[J]. 光子学报, 2022, 51(6):0623003

硅基二氧化硅 20 通道循环型阵列波导光栅制备

张家顺^{1,2}, 安俊明², 孙冰丽³, 陈军³, 胡炎彰³, 单崇新¹

(1 郑州大学 物理学院 河南省金刚石光电材料与器件重点实验室, 郑州 450001)

(2 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(3 河南仕佳光子科技股份有限公司, 河南 鹤壁 458030)

摘 要:采用硅基二氧化硅材料, 针对 G.698.4 标准, 设计并制作了适用于 5G 前传的 20 通道循环型阵列波导光栅, 通道间隔为 100 GHz。相较于传统的周期性阵列波导光栅结构, 采用的 2×20 循环型阵列波导光栅结构可实现通道波长的严格对准, 且插损均匀性更高。另外, 采用指数型锥形波导取代矩形多模干涉结构以实现阵列波导光栅通带平坦化, 减小因波导结构上的突变带来的损耗, 且不带来光谱性能的恶化。通过机械补偿无热封装后, 制备的 20 通道循环型阵列波导光栅模块损耗约为 5.5 dB, 在 -40 °C/25 °C/80 °C 三温温度变化时, 波长偏移量在 -40 ~ 80 pm 范围内。该无热模块具有小型化、低成本、大规模化生产的优势, 可广泛应于 5G 前传网络。

关键词:光波导; 阵列波导光栅; 硅基二氧化硅; 5G 前传; 无热封装

中图分类号: TN2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225106.0623003

0 引言

当前全球进入大数据时代, 随着云计算、数据中心、移动互联网的兴起, 急需引入下一代端口技术以满足应用需求。随着第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)非独立(Non-StandAlone, NSA)和独立(Stand-Alone, SA)组网标准的正式冻结, 我国运营商同步启动规划和设计 5G 试点和预商用方案, 5G 迈向商用的步伐逐步加快。“5G 商用, 承载先行”, 随着 5G 诸多新特性的引入和 5G 试验及预商用计划的逐步推进, 面向 5G 的承载架构与多样化的技术方案更是成为业界普遍关注的焦点。基于 5G 承载需求, 跟随密集波分复用技术在 5G 承载产业整体发展态势, 研究密集波分复用在 5G 承载网络应用的关键共性技术问题^[1], 将为 5G 承载架构及技术方案部署及产业灵活有序发展奠定基础。5G 无线接入网(Radio Access Network, RAN)在建设初期主要采用 5G 基站((next)generation NodeB, gNB)以及集中单元(Centralized Unit, CU)和分布单元(Distributed Unit, DU)合设模式, 分前传和回传两级架构。未来可能采用 CU 和 DU 分离模式, 承载网络分前传、中传和回传三级架构, 实现 CU 云化部署。

目前最具代表性的适用于 5G 前传的密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)技术方案, 是基于国际电信联盟电信标准分局(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)的 G.698.4 标准的波长自适应城域接入型 DWDM 系统。该协议由中国信息通信研究院牵头制定, 2018 年 2 月 9 日, 在日内瓦举行的 ITU-T 第 15 研究组全会上正式通过。相比于单纤双向光纤直驱方案和基于粗波分复用(Coarse Wavelength Division Multiplex, CWDM)或者局域网波分复用(Local Area Network-Wavelength Division Multiplex, LAN-WDM)的波分复用技术方案, 该方案采用波

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(No.XDB43000000), 郑州重大科技项目(No. 18XTZX12008)

第一作者: 张家顺(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无源光波导芯片、器件。Email: zhangjiashun@semi.ac.cn

导师(通讯作者): 安俊明(1969—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为无源波导芯片及集成。Email: junming@semi.ac.cn

收稿日期: 2021-12-15; 录用日期: 2022-03-03

[http:// www.photon.ac.cn](http://www.photon.ac.cn)

长可调谐光模块,具备端口无关、波长自适应特性。尾端设备(Tail End Equipment, TEE)具备自动将其光模块工作波长调节至其所连光解复用器/复用器(Optical Demultiplexer/Optical Multiplexer, OD/OM)或光分插复用器(Optical Add-drop Multiplexer, OADM)端口的能力。光模块只需连纤至正确物理端口,上电后即可正常工作,无需波长配置,极大简化网络建设和运维,并减少备品种类和数量。该系统采用单纤双向传输,对称性好,同时采用了DWDM技术,系统容量大。

阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)^[2-7]波分解复用器,具有低损耗、低串扰、高均匀性,且结构紧凑等优点,是波分复用光网络中的核心器件,也是高速光互连中的重要器件。5G承载的20通道波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)系统,其输入包含20个上行波长和20个下行波长,而20个输出端分别包含一个上行波长和一个下行波长,类似一个循环结构,需求专用的循环型AWG。而G.698.4标准发布时间较短,针对5G承载所需要的循环型AWG,通常采用的是薄膜滤波片(Thin Film Filter, TFF)拼凑方案,或者采用两个分立的AWG,一个工作在上行波段,一个工作在下行波段,再通过21个TFF,在输入、输出端分波和合波,从而实现循环型波长分配方案。

以上两种方案虽然能实现循环型波长分配方案,但是结构复杂,成本高,体积大,可靠性难以控制。本文采用高折射率差硅基SiO₂单AWG实现循环型波长分配方案,并利用常规AWG无热^[8-11]封装技术,针对前传-45℃~80℃工业温度要求,开展硅基二氧化硅20通道循环型阵列波导光栅制备工作,以满足G.698.4定义的波长分配方案。

1 阵列波导光栅芯片设计

阵列波导光栅型波分复用/解复用器的结构如图1,它由输入/输出波导、输入/输出平板波导和阵列波导组成。输入/输出平板波导采用罗兰圆结构,输入/输出波导和阵列波导由输入/输出平板波导相连。 $\Delta x_i/\Delta x_o$ 为相邻输入/输出波导间的最小间距, d 为相邻阵列波导之间的最小间距, R 为罗兰圆直径,也是光栅圆半径, ΔL 为相邻阵列波导间的长度差, $\Delta\theta_i/\Delta\theta_o$ 为相邻输入波导/输出波导间的夹角, θ_i/θ_o 为输入波导/输出波导与中心输入/输出波导的夹角。阵列波导的两端以等间距(d)排列在光栅圆周上,输入/输出波导排列在罗兰圆周上。

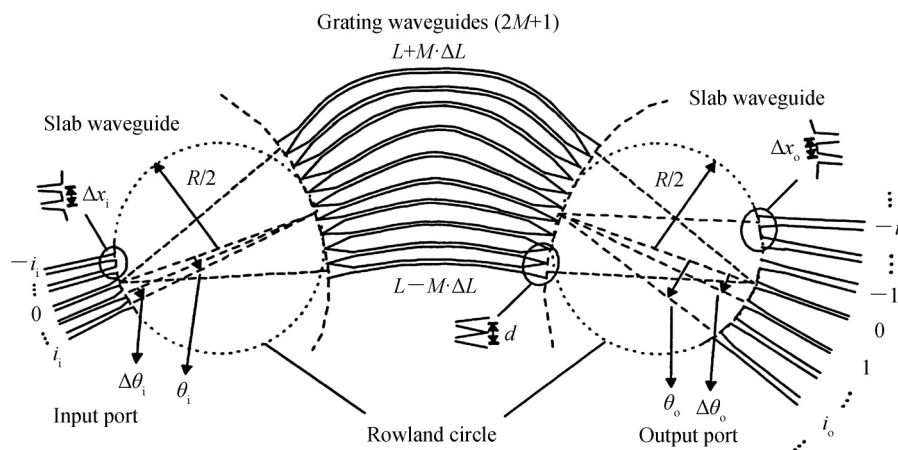


图1 AWG结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of arrayed waveguide grating

对从中心输入波导输入,同时从中心输出波导输出的光,即掠射角为零时,应满足

$$n_c \Delta L = m \lambda_0 \quad (1)$$

式中, λ_0 为中心输入时,中心输出通道的输出光波长, m 为衍射级数, n_c 为阵列波导有效折射率。从式(1)中可以看出,当掠射角为零度时,光栅仍能工作在高阶衍射。因光栅的波长分辨率与衍射级数的倒数成正比,所以阵列波导光栅有很高的波长分辨率,这是其与普通光栅的最大差异。

通道间隔 $\Delta\lambda$ 可以从角色散得到

$$\Delta\lambda = \Delta\theta_0 \left(\frac{d\theta_0}{d\lambda} \right)^{-1} = \Delta\theta_0 \frac{n_s d n_c}{m n_g} = \frac{\Delta x_0 n_s d n_c}{R m n_g} \quad (2)$$

式中, n_s 为输入/输出平板波导有效折射率, n_g 为群折射率。从式(2)可以看出, $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\theta_0$ 呈线性关系, 即从输入波导输入的等间隔波长的光信号将从等间距排列的输出波导输出。同时可以看出, $\Delta\lambda$ 与输出波导间距 Δx_0 、阵列波导间距 d 成正比, 与罗兰圆直径 R 、衍射级数 m 成反比。

满足式(1)和式(2)的 m 和 λ 有许多不同的组合, 即在相同的入射条件下, 不同波长的光可能从相同的端口输出, 则此时这两个波长之差, 定义为自由频谱区(Free Spectrum Region, FSR), 以波长表示自由频谱区的宽度为

$$\text{FSR}_\lambda = \frac{\lambda_0}{m} \left(\frac{n_g}{n_c} \right)^{-1} \quad (3)$$

对于不同的衍射级数 m , 自由频谱区 FSR_λ 不同。自由频谱区 FSR_λ 可以确定 AWG 的最大通道数。

系统采用单纤双向传输, 对于每一个传输通道, HE 至 TE 方向(上行)和 TE 至 HE 方向(下行)需要使用不同的中心波长(频率)。为了保证不同通道双向传输的频率差值均最小, 通道内两个方向上的中心波长(频率)需要配对使用, 20 通道波分复用系统频率配对方式如表 1^[12], 8/12 通道波分复用系统, 采用与 20 通道波分复用系统相同的频率配对方式, 其标称中心频率, 采用表 1 中的 Ch1~Ch8 和 Ch1~Ch12。

表 1 20 通道波分复用系统中心频率
Table 1 20 Ch WDM system center frequency

Channel	HE→TE /THz	TE→HE /THz	Channel	HE→TE /THz	TE→HE /THz
Ch20 ($\lambda_{20}/\lambda_{46}$)	194.1	191.5	Ch10 ($\lambda_{10}/\lambda_{36}$)	195.1	192.5
Ch19 ($\lambda_{19}/\lambda_{45}$)	194.2	191.6	Ch9 (λ_9/λ_{35})	195.2	192.6
Ch18 ($\lambda_{18}/\lambda_{44}$)	194.3	191.7	Ch8 (λ_8/λ_{34})	195.3	192.7
Ch17 ($\lambda_{17}/\lambda_{43}$)	194.4	191.8	Ch7 (λ_7/λ_{33})	195.4	192.8
Ch16 ($\lambda_{16}/\lambda_{42}$)	194.5	191.9	Ch6 (λ_6/λ_{32})	195.5	192.9
Ch15 ($\lambda_{15}/\lambda_{41}$)	194.6	192.0	Ch5 (λ_5/λ_{31})	195.6	193.0
Ch14 ($\lambda_{14}/\lambda_{40}$)	194.7	192.1	Ch4 (λ_4/λ_{30})	195.7	193.1
Ch13 ($\lambda_{13}/\lambda_{39}$)	194.8	192.2	Ch3 (λ_3/λ_{29})	195.8	193.2
Ch12 ($\lambda_{12}/\lambda_{38}$)	194.9	192.3	Ch2 (λ_2/λ_{28})	195.9	193.3
Ch11 ($\lambda_{11}/\lambda_{37}$)	195.0	192.4	Ch1 (λ_1/λ_{27})	196.0	193.4

针对 5G 前传波长分配需求, 需要 AWG 一个通道输出两个不同波长, 根据 AWG 器件的特性, 有两种基本结构可以实现: 结构一利用 AWG 自身周期性设计, 如图 2 所示的 1×20 循环型 AWG; 结构二在一个 AWG 内设计, 上下行两个波段工作在两个相邻的衍射级数, 在输入端将两个波段分开, 不同波段的光, 分别调整其输入位置, 可实现 ITU 规定的波长对准, 如图 3 所示的 2×20 循环型 AWG。

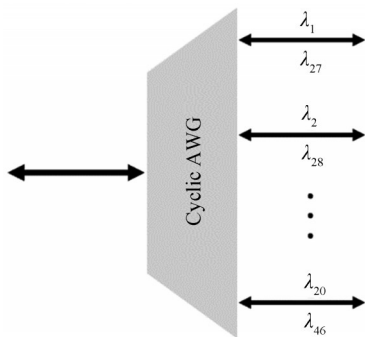


图 2 1×20 循环型 AWG 示意
Fig.2 The diagram of 1×20 cyclic AWG

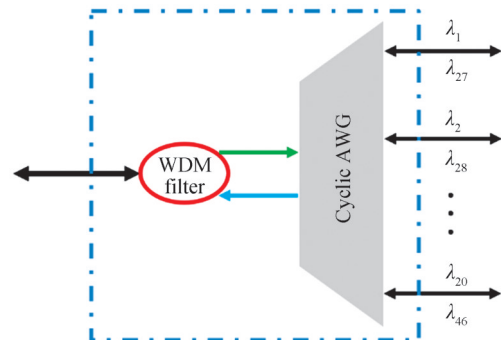


图 3 2×20 循环型 AWG 示意
Fig.3 The diagram of 2×20 cyclic AWG

1.1 参数设计

在AWG输入波导的末端引入多模干涉(Multi-mode Interferometer, MMI)结构可以实现输出光谱平坦化。根据自映像原理,输入光场可以在MMI的输出像面上形成两个像。在自映像平面上,总的场分布可以表示成两个高斯像的叠加,最终形成一个平顶的输出谱线。但是,引入方形的MMI结构,在光的传播方向上波导结构发生了突变,会增加插入损耗。为此,本文引入了指数型锥形波导代替方形结构,可以减小因波导结构上的突变带来的损耗^[13-16],且不带来光谱性能的恶化,如图4。

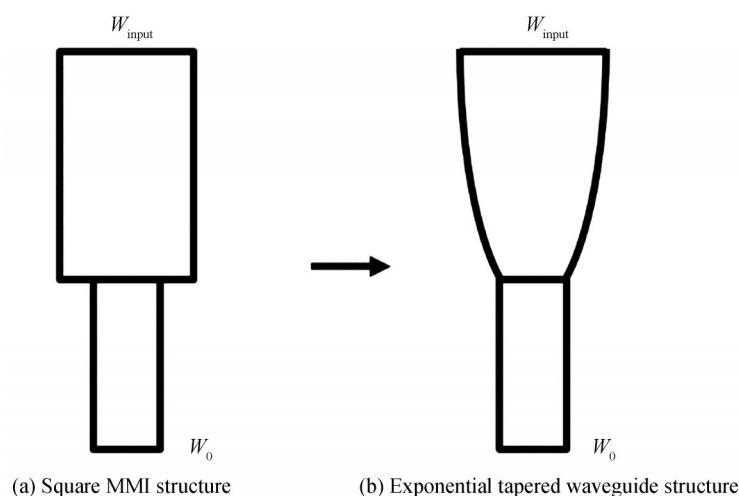


图4 输入波导结构示意图

Fig. 4 Schematic structure of input waveguide

最小波导宽度 $W_0=6\ \mu\text{m}$,输入端口径(W_{input})大于等于 $6\ \mu\text{m}$ 。图5显示了指数型锥形波导不同 W_{input} 输入宽度下,AWG的输出光谱。从图中可以看到,口径越小,插入损耗越小,串扰也越小,同时其光谱曲线顶部也越不平坦。当输入端口径从 $18\ \mu\text{m}$ 增加到 $22\ \mu\text{m}$ 时,AWG的插入损耗从 $0.75\ \text{dB}$ 增加到 $2.25\ \text{dB}$,同时传输谱线实现了很好的平坦化效果,模拟结果表明,在 W_{input} 输入宽度为 $22\ \mu\text{m}$ 时, $0.5\ \text{dB}$ 带宽约为 $45\ \text{GHz}$ (约 $0.35\ \text{nm}$)。

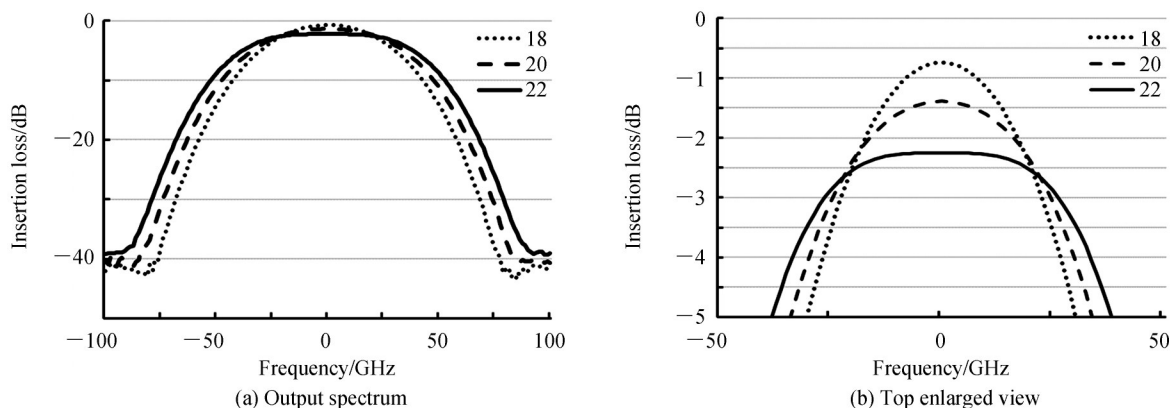


图5 不同指数型锥形波导输入端宽度的输出光谱模拟

Fig.5 Simulated spectra of different exponential tapered waveguide widths

针对 1×20 循环型AWG,以Ch10为中心波长,针对上行波长 λ_1 (波长 $1\ 529.55\ \text{nm}$) 与下行波长 λ_{27} ($1\ 550.12\ \text{nm}$) 对准,均从Ch1输出,则要求FSR为该两个波长差,即 $20.57\ \text{nm}$;针对 0.75% 折射率差硅基二氧化硅工艺平台,根据式(3)及 m 为整数,推算出衍射级数 m 为 74 ,推算出AWG的结构参数如表2。

表2 1×20循环型AWG设计几何参数表
Table 2 Design geometric parameters of 1×20 cyclic AWG

Parameter	Value
Diffraction order m	74
Roland circle diameter $R / \mu\text{m}$	5 390.101
Length difference $\Delta L / \mu\text{m}$	78.381 244 3
Wavelength spacing $\Delta\lambda / \text{nm}$	0.788
Input/Output waveguide spacing $\Delta x_0 / \mu\text{m}$	22
Array waveguide spacing $d / \mu\text{m}$	10
No. of array waveguides	151
Input taper width $/ \mu\text{m}$	22
Output taper width $/ \mu\text{m}$	10
Array waveguide taper width $/ \mu\text{m}$	9
Center wavelength λ_0 / nm	1 536.61

针对2×20循环型AWG,上下行两个波段工作在两个相邻的衍射级数,针对上行波段 λ_1 (波长1 529.55 nm)与 λ_{20} (1 544.53 nm),其总波长间隔 $\Delta\lambda_{\text{up}}$ 为14.98 nm,针对下行波段 λ_{27} (波长1 550.12 nm)与 λ_{46} (1 565.50 nm),其总波长间隔 $\Delta\lambda_{\text{down}}$ 为15.38 nm;针对0.75%折射率差硅基二氧化硅工艺平台,忽略材料色散对参数的影响,根据式(2),则 $\Delta\lambda_{\text{up}}/\Delta\lambda_{\text{down}}=m/(m+1)$,推算出衍射级数 m 为37.45,因为 m 为整数,取 $m=37$ 则推算出AWG的结构参数如表3。

表3 2×20循环型AWG设计几何参数表
Table 3 Design geometric parameters of 2×20 cyclic AWG

Parameter	Value
Diffraction order m	37
Roland circle diameter $R / \mu\text{m}$	10 780.202
Length difference $\Delta L / \mu\text{m}$	38.935 596 03
Wavelength spacing $\Delta\lambda / \text{nm}$	0.788
Input/Output waveguide spacing $\Delta x_0 / \mu\text{m}$	22
Array waveguide spacing $d / \mu\text{m}$	10
No. of array waveguides	301
Input taper width $/ \mu\text{m}$	22
Output taper width $/ \mu\text{m}$	10
Array waveguide taper width $/ \mu\text{m}$	9
Center wavelength λ_0 / nm	1 526.61

以中心输入中心输出波长1 536.61 nm,估算出衍射级数为37时FSR为40.57 nm,大于实际要求的20.57 nm($\lambda_{27}-\lambda_1$)。相比上行波段的输入,下行波段输入位置要向上移动,移动的波长偏移量为40.57 nm-20.57 nm=20.00 nm。假定设计的两个输入接近上下对称,则上行波段的输入位置为中心输入位置向下偏移,波长偏移量为10 nm,下行波段的输入位置为中心输入位置向上偏移,波长偏移量为10 nm,同时中心输入中心输出波长要修正为1 526.61 nm。

1.2 仿真结果及版图

由于时域有限差分算法(Finite Difference Time Domain, FDTD)模拟花费时间较长,对AWG器件传输特性的模拟,常用的一种方式简单传输函数法。光在AWG器件中传输,可以大概分4个步骤:第一步入射光在输入波导中传播;第二步为入射光在平板波导内衍射并被阵列波导收集;第三步为光波在阵列波导内传播,按波长不同产生不同的相位差;第四步为在第二个平板波导内聚焦成像,并且耦合进位于输出罗兰圆周的输出波导。

用 δ 函数来近似波导的模场分布,光波在器件内的传输可表示为

$$T = \left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \cdot \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} [jn_c d(\theta_i + \theta_o) + j(n_c \Delta L + \phi(j))] \right\} \right|^2 \quad (4)$$

式中, M 为阵列波导数量的一半, $\rho_g(j, 0)$ 为第 j 根阵列波导的高斯模场分布, $\phi(j)$ 是由于阵列波导随机尺寸波动等引起的光在阵列波导中传输时产生的光程随机扰动。简单传输函数法, 在处理输出谱时忽略了传输损耗, 模拟耗时短, 直接给出输出响应谱, 虽然不能对光信号在器件中的传输细节进行分析, 但在分析中心波长、串扰时更为简洁。

采用简单传输法, 对所设计的 1×20 循环型 AWG 进行了传输特性模拟, 模拟的传输谱图模拟结果如图 6。结果表明, 理论上实现波长循环输出的基本功能。同时, 该设计由于 FSR 很小, 外侧通道会很靠近 FSR 的边缘, 而对于 AWG 而言, 边缘通道插入损耗大, 插损均匀性难以满足系统要求。

进一步分析 1×20 循环性 AWG 传输谱线的各通道中心波长 (即传输谱线峰值下降 3 dB 对应两个波长的中心值), 芯片各通道中心波长与 ITU-T G.698.4 设定的通道中心波长之差为波长偏移量, 模拟的芯片波长偏移量如图 7。上行波长的偏移量很小, 约为 6 pm, 而下行波长的偏移量在 50 ~ 200 pm 之间, 无法满足波长偏移量小于 60 pm 的要求。其主要原因是, 1×20 循环性 AWG 结构设计, 是基于通道 1 的波长循环设计的, 没有考虑上行波段和下行波段的色散关系 (应与波长间隔匹配), 因此导致了在上行波段波长对齐的情况下, 下行波长出现较大波长偏移。

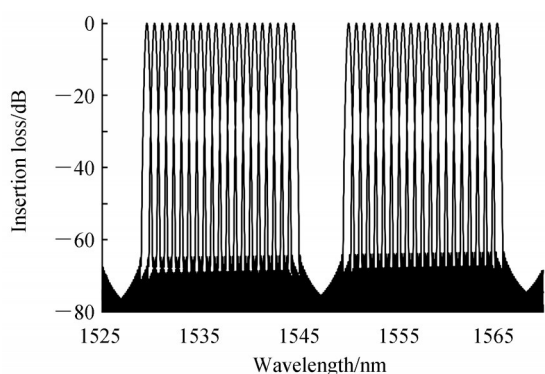


图 6 1×20 循环性 AWG 模拟传输谱
Fig.6 Simulated spectra of 1×20 cyclic AWG

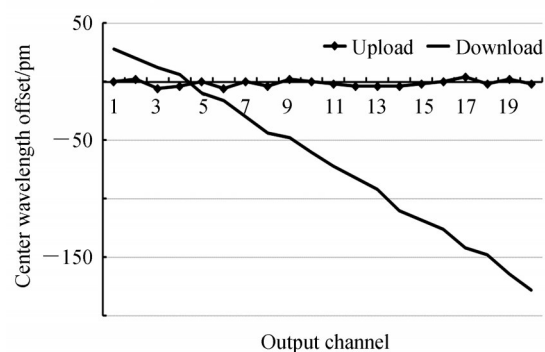


图 7 1×20 循环性 AWG 中心波长偏移量
Fig.7 Center wavelength offset of 1×20 cyclic AWG

对所设计的 2×20 AWG 进行了传输特性模拟, 2×20 循环性 AWG 模拟传输谱图模拟结果如图 8。结果表明, 理论上实现波长循环输出的基本功能, 左侧上行波段 (黑色曲线) 由输入第二通道输入, 右侧下行波段 (蓝色曲线) 由输入第一通道输入。模拟的芯片波长偏移量如图 9, 由于 2×20 循环性 AWG 结构设计, 是基于上行波段和下行波段的色散关与波长间隔匹配来设计, 因此可以实现上/下行通道中心波长的严格对准 (offset < 10 pm); 同时, 由于 FSR 大于两倍的工作波导需求, 外侧通道远离 FSR 的边缘, 插损均匀性也会

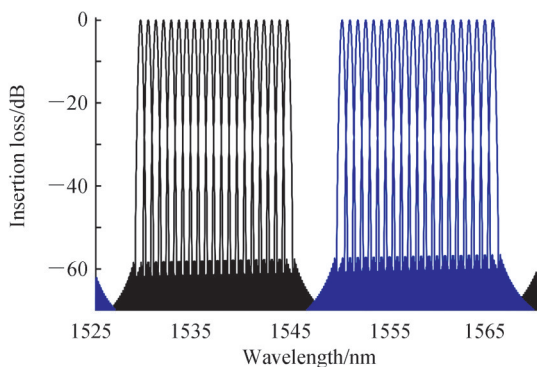


图 8 2×20 循环性 AWG 模拟传输谱图
Fig.8 Simulated spectra of 2×20 cyclic AWG

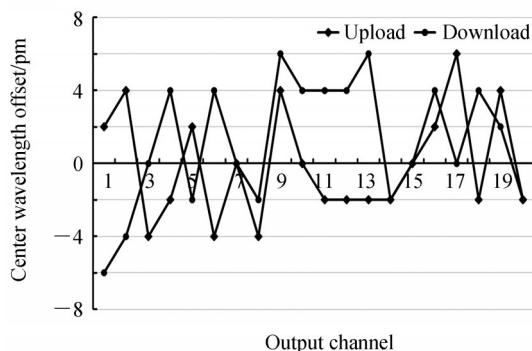


图 9 2×20 循环性 AWG 中心波长偏移量
Fig.9 Center wavelength offset of 2×20 cyclic AWG

远远优于结构一。

通过各种参数设计及优化,最终采取 $2 \times N$ 结构实现5G前传的波长分配方案, 2×20 循环性AWG版图如图10。

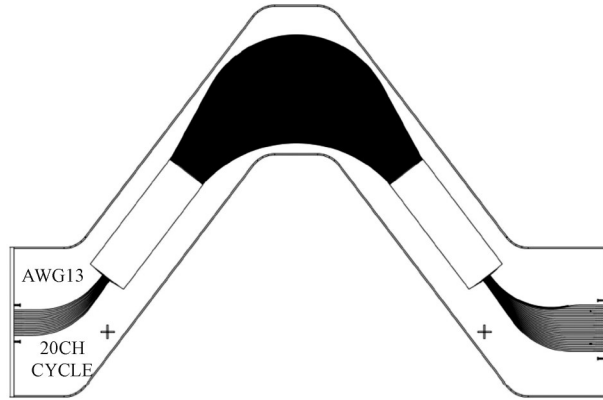


图10 2×20 循环性AWG版图
Fig. 10 The layout of 2×20 cyclic AWG

2 工艺制备及测试封装

2.1 工艺制备

采用等离子体增强化学气相沉积(Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)、低压化学气相沉积(Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD)、光刻及感应耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀等工艺制备硅基二氧化硅AWG,影响图像转移质量的一个关键性因素是刻蚀工艺。本文通过调整ICP工艺参数,精确配比刻蚀气体,提升ICP上电极射频电源功率、优化线圈设计及侧向进气改进设计等新方法,实现了高效、均匀、侧壁陡直、平滑、高深宽比的 SiO_2 波导刻蚀,通过精确调整生长 SiO_2 中B、P组分,结合优化退火工艺,实现了上包层硼磷硅玻璃(Boro-phospho-silicate Glass, BPSG)厚膜的低损耗致密化,降低了波导包芯层间的应力,制备出的超高折射率差AWG芯片显微镜照片及上包回流后扫描电子束显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)照片如图11。

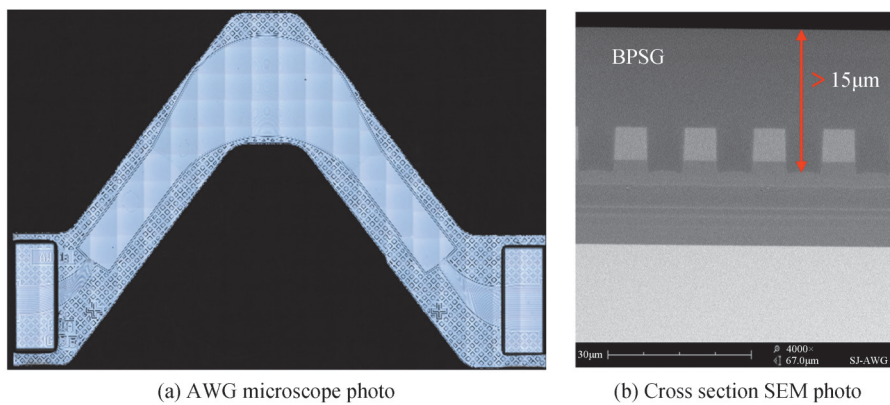


图11 AWG显微镜照片及截面扫描电镜照片
Fig.11 AWG microscope photo and cross section SEM photo

采用 2×20 循环型AWG,通过在输入端接入一个低通TFF,将上行波段和下行波分开,分别接入AWG对应的两个输入端口。并采用热膨胀机械位移补偿方式进行AWG的无热封装,补偿温度变化引入的输出波长漂移,实现AWG的温度不敏感,研制出C波段20通道循环型AWG无热模块,并且在输入端接入5:95的 2×2 非均匀分路器,实现上/下行的功率监控,模块照片如图12。

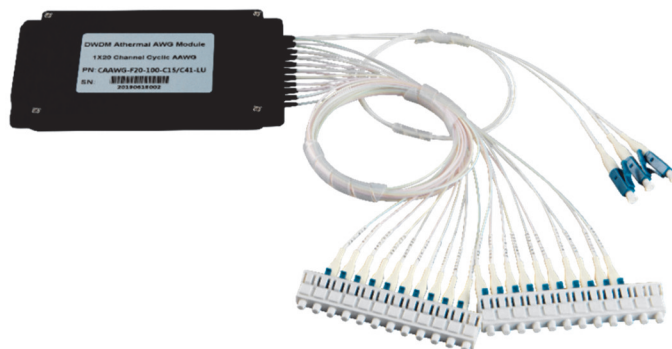


图12 20通道循环型AWG无热封装模块照片
Fig.12 Photo of 20 channel cyclic AWG athermal module

2.2 测试分析及耦合

采用可调谐光源、偏振控制器、光功率计、温循箱等测试设备对AWG模块进行测试。测试输出光谱如图13。测量结果表明,最终模块的插入损耗约为5.5 dB,0.5 dB带宽约为0.31 nm。相比常规AWG而已,由于前段引入了非均匀光分束器和TFF器件,导致模块插入损耗在普通AWG模块的基础上增加约1.0 dB。0.5 dB带宽相比模拟值小0.04 nm,主要原因是由于系统的相位误差,使得AWG的传输谱线不是对称的平坦曲线,而是在顶部有一定的倾斜,从而导致0.5 dB带宽减小;另外,制备过程中线条宽度、折射率差的偏移,也会导致0.5 dB带宽的减小。

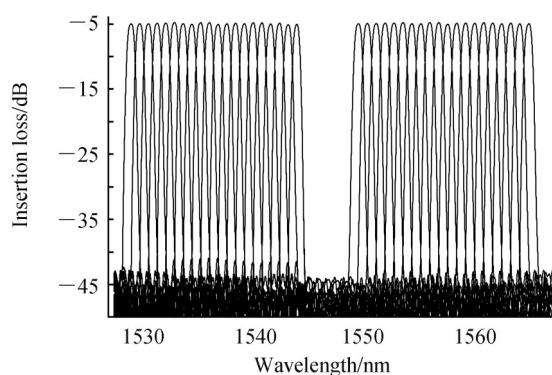


图13 20通道循环型AWG无热封装模块测试输出光谱
Fig.13 Test spectrum of 20 channel cyclic AWG athermal module

在 $-40^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}/80^{\circ}\text{C}$ 下的三温通道中心波长偏移量测试曲线如图14,通道中心波长偏移范围为40~80 pm。由测量结果可知,上行波段和下行波段的通道中心波长偏移量平均相差25 pm,可以通过向下微调

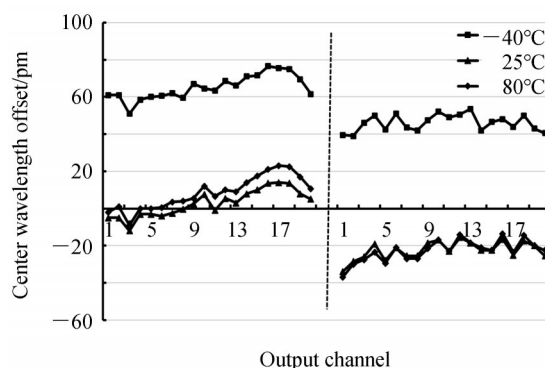


图14 20通道循环型AWG无热封装模块中心波长偏移
Fig.14 Test center wavelength offset of 20 channel cyclic AWG athermal module

下行波段的输入波导位置 $0.69\ \mu\text{m}$,使得上/下行波段的通道中心波长偏移量水平一致。同时,可以看出,在温度为 $-40\ ^\circ\text{C}$ 时,通道中心波长的偏移量相比常温 $25\ ^\circ\text{C}$ 时平均偏移 $68\ \text{pm}$,而在温度为 $80\ ^\circ\text{C}$ 时,通道中心波长的偏移量相比常温 $25\ ^\circ\text{C}$ 平均偏移为 $-5\ \text{pm}$ 。高、低温的波长偏移量不均衡一致,主要与AWG无热封装的夹具相关,采用的封装夹具不是最匹配结构。可以通过微调夹具膨胀螺杆尺寸,均衡高、低温的波长偏移量,从而实现高、低温时,通道中心波长偏移量的进一步减小。

3 结论

本文设计并制作了针对G.698.4标准、基于硅基二氧化硅材料的20通道循环型AWG,采用的 2×20 循环型AWG结构可实现通道波长的严格对准,且插损均匀性更好。另外,采用指数型锥形波导取代矩形MMI以实现AWG通带平坦化,减小因波导结构上的突变带来的损耗,而且不带来光谱性能的恶化。通过机械补偿无热封装,实验测得该20通道循环型AWG模块的损耗约为 $5.5\ \text{dB}$, $0.5\ \text{dB}$ 带宽约为 $0.31\ \text{nm}$,在 $-40\ ^\circ\text{C}/25\ ^\circ\text{C}/80\ ^\circ\text{C}$ 三温温度变化时,波长偏移量在 $-40\sim 80\ \text{pm}$ 范围内。基于 2×20 通道循环型AWG芯片制备的无热模块,具有小型化、低成本、大规模化生产的优势。通过进一步改进设计和制作工艺,降低通道中心波长的偏移量,该器件将可广泛应于5G前传复用/解复用场景。

参考文献

- [1] GUAN Xun, SHI Wei, LIU Jia, et al. Silicon photonics in optical access networks for 5G communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(6):126-131.
- [2] FOTIADIS K, PITRIS S, MORALIS-PEGIOS M, et al. Silicon photonic 16×16 cyclic AWGR for DWDM O-band interconnects[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(19):1233-1236.
- [3] LIN B C. Advanced crosstalk reduction in an $N\times N$ two-stage AWG-based switch with odd N - ScienceDirect[J]. Optik, 2020, 225:165656.
- [4] NISHI H, FUJI T, DIAMANTOPOULOS N P, et al. Integration of eight-channel directly modulated membrane-laser array and SiN AWG multiplexer on Si[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2):266-273.
- [5] WU Xiaoping, LIU Chenglu, LIU Wen, 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.
- [6] WANG Wenmin, LIU Wen, MA Weidong. Novel compact low refractive index contrast silica-on-silicon AWG[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(8):1137-1142.
王文敏, 刘文, 马卫东. 小尺寸低折射率差硅基二氧化硅阵列波导光栅[J]. 光子学报, 2011, 40(8):1137-1142.
- [7] WANG Liangling, ZHANG Jiashun, AN Junming, et al. Same side arrayed waveguide grating multiplexer for data center transmitter [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1):0123002.
王亮亮, 张家顺, 安俊明, 等. 用于数据中心发射端的同侧阵列波导光栅复用器[J]. 光子学报, 2021, 50(1):0123002.
- [8] KAMEI S. Recent progress on athermal AWG wavelength multiplexer [C]. 2009 Conference on Optical Fiber Communication, 2009.
- [9] KANEKO A, KAMEI S, INOUE Y, et al. Athermal silica-based arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexers with new low loss groove design [C]. Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 1999.
- [10] ZHOU Tianhong, MA Weidong. A novel fabrication approach for an athermal arrayed-waveguide grating[J]. Journal of Semiconductors, 2010, 1:39-41.
- [11] HIRABAYASHI K, KOSHOBU N, KOBAYASHI J, et al. Reduction of second-order temperature dependence of silica-based athermal AWG by using two resin-filled grooves[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 2011, 23(11): 676-678.
- [12] ITU-T G. 698.4-2018, Multichannel bi-directional DWDM applications with port agnostic single-channel optical interfaces (Study Group 15)[S]. Geneva, International Telecommunication Union, 2018.
- [13] WANG Wenmin, MA Weidong, CHEN Guang, et al. Optimum design of AWG router with flattened passband and low loss [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9):1049-1052.
王文敏, 马卫东, 陈光, 等. 低插损平坦谱响应阵列波导光栅解复用器优化设计[J]. 光子学报, 2003, 32(9):1049-1052.
- [14] 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.
- [15] DAI Daoxin, MEI Weiquan, HE Sailing. Using a tapered MMI to flatten the passband of an AWG [J]. Optics Communications, 2003, 219(1-6):233-239.
- [16] KAMEI S, INOUE Y, SHIBATA T, et al. Low-loss and compact silica-based athermal arrayed waveguide grating using resin-filled groove[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(17):3790-3799.

Fabrication of Silica Based Silicon 20 Channel Cyclic Arrayed Waveguide Grating

ZHANG Jiashun^{1,2}, AN Junming², SUN Bingli³, CHEN Jun³, HU Yanzhang³, SHAN Chongxin¹

(1 Henan Diamond Optoelectronic Materials and Devices Key Laboratory, School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(2 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(3 Henan Key Laboratory of Optoelectronic Circuit and Integration, Henan Shi Jia Photons Technology Co., Ltd, Hebi, Henan 458030, China)

Abstract: At present, the world has entered the era of big data, with the rise of cloud computing, big data and mobile Internet, it is urgent to introduce the next generation port technology to meet the application requirements. With the formal freezing of the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) the 5th generation mobile communication technology (5G) Non Standalone (NSA) and Standalone (SA) networking standards, Chinese operators have started planning and designing 5G pilot and pre commercial schemes simultaneously. The pace of 5G moving towards commercial use has been gradually accelerated. Up till now, the most representative Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) technology suitable for 5G fronthaul is the multichannel bidirectional metro access DWDM System with port agnostic, which based on the G.698.4 standard adopted and released by International Telecommunication Union Telecommunication standardization sector (ITU-T) in 2018. The scheme adopts wavelength tunable optical module, which has port independent and wavelength adaptive characteristics. The tail end equipment has the ability to automatically adjust the working wavelength of the optical module to the port connected, including optical demultiplexer, multiplexer and optical add drop multiplexer. The 20 channel WDM system carried by 5G contains 20 uplink wavelengths and 20 downlink wavelengths, and each output contains one uplink wavelength and one downlink wavelength. It is similar to a cyclic structure and requires a special cyclic Arrayed Waveguide Grating (AWG). It is usually composed of many discrete devices, which has complex structure, high cost and large volume, and difficult to produce on a large scale. According to ITU-T G.698.4 standard, a 20 channel cyclic AWG suitable for 5G fronthaul transmission is designed and fabricated with a channel spacing of 100 GHz. Compared with the traditional periodic AWG structure, the 2×20 cyclic AWG structure can achieve strict alignment of channel wavelength and higher insertion loss uniformity. In addition, the exponential tapered waveguide is used to replace the rectangular Multimode Interferometer (MMI), which can reduce the loss caused by the sudden change of waveguide structure, and do not bring the deterioration of spectral performance. And a flattened AWG passband is realized. After mechanical compensation athermal packaging, the insertion loss of the prepared 20 channel cyclic AWG module is about 5.5 dB, 0.5 dB bandwidth is about 0.31 nm, and the center wavelength offset is in the range of -40 pm to 80 pm when the temperature changes at -40 °C/25 °C/80 °C. The center wavelength offset is a litter large, mainly due to the following two reasons: 1) the average difference of central wavelength offset between uplink band and downlink band is 25 pm, the two are not equal; 2) the central wavelength offset at low-temperature is 68 pm on average compared with normal temperature, and the offset at high-temperature is -5 pm. The wavelength offset at high and low temperature is unbalanced. For the above two problems, the input waveguide position of the downlink band can be fine-tuned downward to make the center wavelength offset of the uplink / downlink band equal. The length of the expansion screw can be adjusted to balance the wavelength offset at high and low temperatures, so as to further reduce the center wavelength offset. The athermal AWG module has the advantages of miniaturization, low cost and large-scale production, and can be widely used in 5G fronthaul transmission network.

Key words: Optical waveguide; Arrayed waveguide gratings; Silica based silicon; 5G fronthaul; Athermal packaging

OCIS Codes: 230.7370; 060.4230; 130.7408; 230.7408; 060.4510