

硅基亚波长光栅波导在微波光子学中的应用

王俊嘉¹, 房崇宝¹, Lawrence R Chen²

(1. 东南大学光传感通信综合网络国家地方联合工程研究中心, 江苏南京 210096;

2. 麦吉尔大学电子工程系, 加拿大蒙特利尔 H3A 0E9)

摘要: 为了满足集成微波光子学的发展需要, 随着硅基光子学的发展, 硅基亚波长光栅波导被提出并受到关注. 硅基亚波长光栅具备灵活度高、折射率可调等特性, 主要用于实现光学滤波器、调制器、延迟线等集成微波光子学组件. 本文对这类器件进行举例与讨论, 并且在结尾提出对硅基亚波长光栅波导在集成微波光子学中应用的展望.

关键词: 硅基光子学; 亚波长光栅波导; 集成微波光子学; 滤波器; 调制器; 光学延迟线

中图分类号: TN256; TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)09-2233-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220090

Subwavelength Grating Waveguide for Microwave Photonic Applications

WANG Jun-jia¹, FANG Chong-bao¹, CHEN Lawrence R²

(1. National Research Center for Optical Sensors/Communications Integrated Networks, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University, Montreal, Quebec H3A 0E9, Canada)

Abstract: In order to meet the increasing integration demand from integrated microwave photonics, the devices based on subwavelength grating waveguide is proposed and studied. The subwavelength grating waveguide is mainly used in filters and optical delay lines in integrated microwave photonics, with design freedom in refractive index. We review and discuss the developments of these applications, and provide the outlook on the application of the subwavelength grating waveguide devices in integrated microwave photonics at the end.

Key words: silicon photonics; subwavelength grating waveguide; integrated microwave photonics; filters; EO modulators; optical delay lines

1 引言

微波光子学是微波(射频)技术和光子技术的融合产物^[1,2]. 它的基本原理是利用光电子器件如光学滤波器、光学延迟线、电光调制器、光电探测器等基本元件, 通过组合来完成对微波信号的产生、处理和传输. 随着电子信息系统向宽带化、阵列化和小型化不断发展, 微波光子技术由于具有光子技术大带宽与速度快的优点, 成为解决电子系统面临的速率和带宽瓶颈的关键技术之一. 微波光子学中对微波信号的处理包括了微波信号的延迟、相移、滤波和频率测量等微波系统中常见的功能. 为了达到减小系统尺寸、降低损耗、实现功能可编程及可重构的目的, 人们将传统的微波光子学

中多个光电器件集成到了单个芯片上. 目前在微波光子集成领域国内外已经有了诸多成果和解决方案^[3-10].

硅基亚波长光栅波导, 是由间距小于波长的周期性排布的波导构成^[11-20]. 亚波长周期结构使得衍射和折射表现得像均匀介质一样, 其支持的 Bloch 模可通过周期波导传播, 而不会产生由衍射或包层模式引起的损耗. 亚波长光栅波导展示了宽带宽、高耦合效率等优点^[21-24], 基于这些优点的器件与装置已被设计和演示, 包括耦合器^[25]、偏振器^[26]、偏振分束器^[27]等. 硅基亚波长光栅波导另一个重要优点是它们允许灵活地控制复合波导的光学性质, 基于该优点所设计出的器件与装置包括布拉格光栅谐振腔^[11,28,29]、微环谐振腔^[18,20]、真延迟线^[30,31]等. 这些器件可在光域内对微波信号进行

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-04-12; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2019YFB2205303); 江苏省自然科学基金(No. BK20210207); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2242021k30007, No. 2242021R10015)

处理,可应用于集成微波光子系统中。

本文将对基于亚波长光栅波导的微波光子器件的一些研究进展进行探讨。在2.1节中介绍集成微波光子学中的亚波长光栅;在2.2节中将介绍亚波长光栅的原理;在2.3节中将介绍基于亚波长光栅的布拉格光栅滤波器;在2.4节中将介绍基于亚波长光栅微环的谐振腔和调制器;在2.5节中主要介绍基于亚波长光栅波导的光学延迟线。最后进行总结与展望。

2 原理与应用

2.1 集成微波光子学中的亚波长光栅

集成微波光子系统一般由光源、光调制器、光信号处理器和光电探测器构成,如图1所示^[4]。入射射频信号通过光调制器加载至光信号的边带,通过信号处理器加工或者修改边带的频谱特性,并由光学探测器通过拍频转换至射频信号。这一套系统具有天线重构、射频光子滤波、延迟、移相、光波束形成、任意波形产生、频率上下转换、微波信号产生和频率测量等功能。基于亚波长光栅宽带宽、高耦合效率、折射率可控等优点,亚波长光栅可用于实现光源的耦合^[32-35],光调制器^[36,37],信号处理中的滤波、延迟、波束形成等功能。本文着重讨论亚波长光栅调制、滤波和延迟。

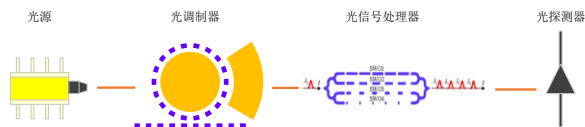


图1 集成微波光子系统示意图

2.2 亚波长光栅原理

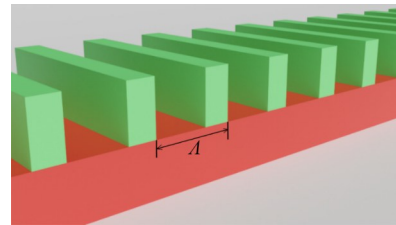
一般情况下,一维周期结构包括折射率分别为 n_1 和 n_2 的平板介质,可以被用作衍射光栅。Rytov发现^[38],当光栅周期远小于光的波长时,亚波长光栅在光学范畴内会等价于一个垂直于层的单轴晶体,如图2(a)所示。光栅结构的色散关系如图2(b)所示:当频率在辐射区域,光波经过光栅被散射到外界;当频率在布拉格反射区域,依然没有导波模式存在,光波由于反射损耗指数型增加;当频率在亚波长区域,周期性的波导可以支持Floquet-Bloch模无损传输,其对应模场分布如图2(c)所示^[39]。入射在光栅上的光具有平行或垂直于周期性结构的电场偏振,并且相应的等效折射率分别为

$$n_{\parallel}^2 \approx \frac{a}{A} n_1^2 + \left(1 - \frac{a}{A}\right) n_2^2 + o\left(\frac{A^2}{\lambda^2}\right) \quad (1)$$

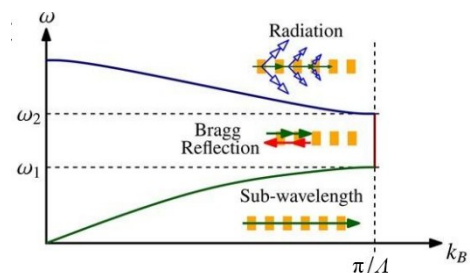
$$n_{\perp}^2 \approx \frac{a}{A} n_1^{-2} + \left(1 - \frac{a}{A}\right) n_2^{-2} + o\left(\frac{A^2}{\lambda^2}\right) \quad (2)$$

这里 a 是材料折射率为 n_1 的平板介质的宽度, A 是光栅的周期, λ 是光波长。这种将光栅结构视为等效均

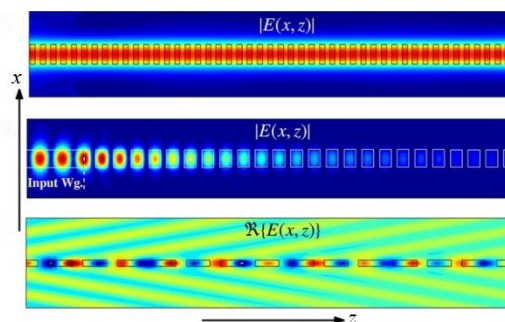
匀材料的处理方法也被称为有效介质理论^[40,41]。值得注意的是,等效结构的折射率是偏振敏感的。亚波长光栅结构的原理已被揭示,亚波长光栅在集成光学领域的应用在过去的几年里受到广泛关注^[42,43]。



(a) 亚波长光栅示意图



(b) 沿z轴纵向传播的周期性波导第一布里渊区色散示意图



(c) 从上到下分别对应于(b)的3个区域的仿真图像

图2 亚波长光栅原理图^[43]

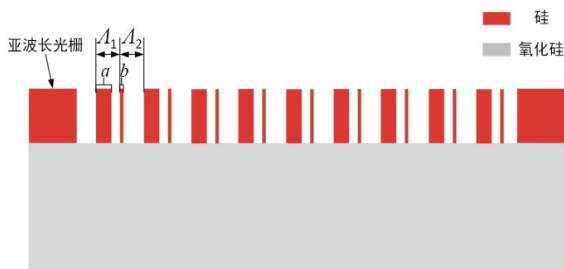
在通信波段的亚波长光栅结构,周期需要满足的条件为 $A < A_{\text{Bragg}} \approx 300 \text{ nm}$,正好在电子束光刻和深紫外光刻条件范围内。由于在更长的波长条件下,对尺寸的限制条件更低,因此亚波长光栅结构也可被应用于中红外光范围^[44,45]。目前,硅基亚波长光栅波导可以通过周期性排列硅和二氧化硅来实现。为了配合CMOS工艺,亚波长光栅波导高度一般为220 nm,氧化硅掩埋层为2~3 μm ,被2 μm 的氧化硅包层所覆盖^[46]。亚波长光栅波导的小尺寸、结构简单、低非线性^[47]、易于加工、易于集成等优势,和硅成熟的工艺平台结合为高性能光电器件提供了良好的支持。

2.3 基于亚波长光栅的布拉格光栅滤波器

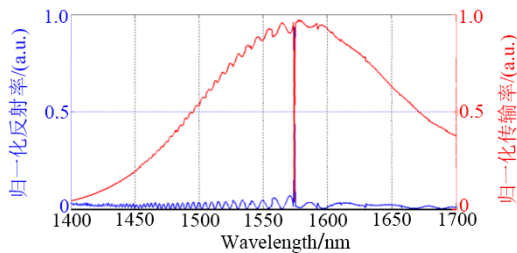
布拉格光栅是应用于微波光子信号处理系统的常用设备,提供滤波、分插复用以及色散补偿等功能。布

长光栅基于折射率的周期性变化,因此布拉格光栅可以通过折射率可调的亚波长光栅波导构成。

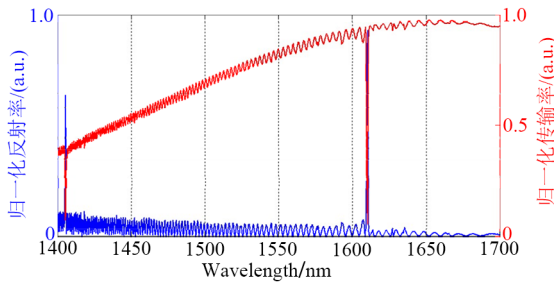
Wang 等人^[11]基于绝缘硅平台设计了亚波长光栅布拉格光栅,他们利用交错的 2 个亚波长光栅波导形成布拉格光栅。他们定义 2 个亚波长光栅波导的占空比分别为 $D_1 = a/A_1, D_2 = a/A_2$, 所以亚波长光栅布拉格光栅的周期变成了 $A_1 + A_2$, 通过改变这 2 个亚波长光栅波导的占空比,可以得到有效折射率的周期变化并因此可以获得布拉格反射,如图 3 所示。本文通过仿真证明随着占空比 D_2 的变大,布拉格波长以及不同 Bloch 模式下的光栅折射率都在变大。



(a) Wang 等人设计的亚波长布拉格光栅示意图



(b) 当占空比为 $D_1 = 50%, D_2 = 40%$ 时亚波长布拉格光栅的传输和反射谱

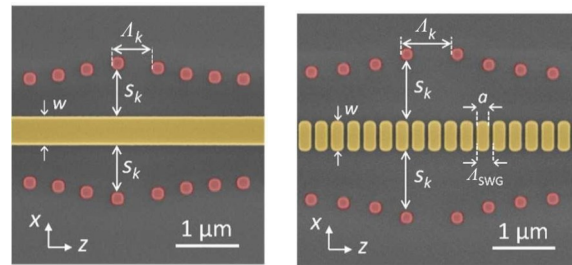


(c) 当占空比为 $D_1 = 50%, D_2 = 53.33%$ 时亚波长布拉格光栅的传输和反射谱

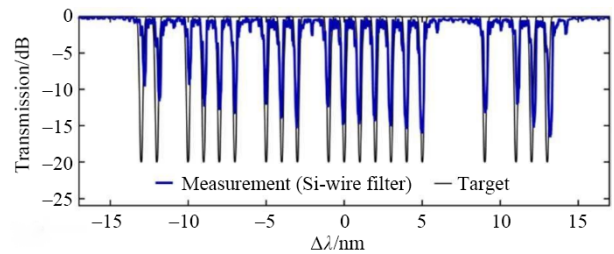
图 3 亚波长光栅布拉格光栅图^[11]

Pereira-Martín 等人^[48]随后提出了一种基于包层调制亚波长光栅的复杂光谱滤波器,结构如图 4(a)和(b)所示。本文研究了 2 种边带调制亚波长光栅结构,一种是硅波导芯,另一种是亚波长光栅波导芯,测试结果如图 4(c)和(d)所示。这项工作基于先前提出的亚波

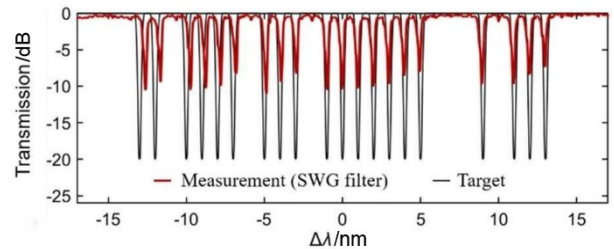
长光栅布拉格光栅,同时加入边带实现精细调控可用作任意光谱滤波器,为后续集成频谱整形和任意波形产生提供了新方案。



(a) 硅芯结构图 (b) 亚波长波导芯结构



(c) 硅芯滤波器(蓝色的)的归一化透射比



(d) 亚波长光栅滤波器(红色的)的归一化透射比

图 4 基于包层调制亚波长光栅的复杂光谱滤波器^[48]
注:其中黑线代表对应的目标光谱

表 1 总结了基于亚波长光栅布拉格光栅滤波器的部分成果^[48-50]。由表 1 可以看出,目前亚波长光栅布拉格光栅滤波器的品质因子达到了 10^5 级别,线宽达到 10.97 pm,优于传统硅基布拉格光栅,后续想要进一步提高,需要在材料和工艺方面寻求突破。

表 1 亚波长布拉格光栅滤波器相关成果

Style	Q	Linewidth/pm	ER/dB
SWG Bragg ^{1[48]}	~7 000	210~340	7~11
SWG Bragg ^{2[49]}	8 000	10.97	23
SWG Bragg ^{3[50]}	11 800	—	—

2.4 亚波长光栅微环谐振腔和调制器

除了布拉格光栅,环形谐振腔也可以实现滤波和色散补偿等功能。亚波长光栅波导可直接构成亚波长

光栅环形谐振腔. 图 5(a)为 Wang 等人^[11]提出的亚波长光栅环形谐振腔的示意图. 其中环形波导和直波导的间隙 g 为 640 nm, 亚波长光栅波导的周期 A 为 300 nm. 图 5(b)是 2.5D FDTD 仿真的电场分布结果, 可以看出亚波长环形谐振腔的工作原理与传统环形谐振器类似, 即光耦合到腔中并在腔中循环, 区别在于模式的不同. 亚波长光栅在波导和环的区域内都是 Bloch 模. 制备出的亚波长光栅环形谐振腔如图 5(c)所示. 图 5(d)~(f)显

示了具有不同环半径的亚波长光栅环形谐振腔的实验结果, 并在表 2 中总结了这些结果. 从表 2 可知, 较大的环导致较小的自由光谱范围 (FSR). 谐振峰的品质因子 Q 值 (定义为 $\lambda_0/\Delta\lambda$, 其中 λ_0 是谐振的中心波长, $\Delta\lambda$ 是相应的 3 dB 带宽) 和消光比 (ER) 取决于损耗, 而损耗取决于亚波长光栅波导的占空比和弯曲半径. 为了进一步改善消光比, Wang 等人设计了跑道型亚波长光栅环形谐振腔, 最后得到了 33 dB 的消光比, 详见文献^[51].

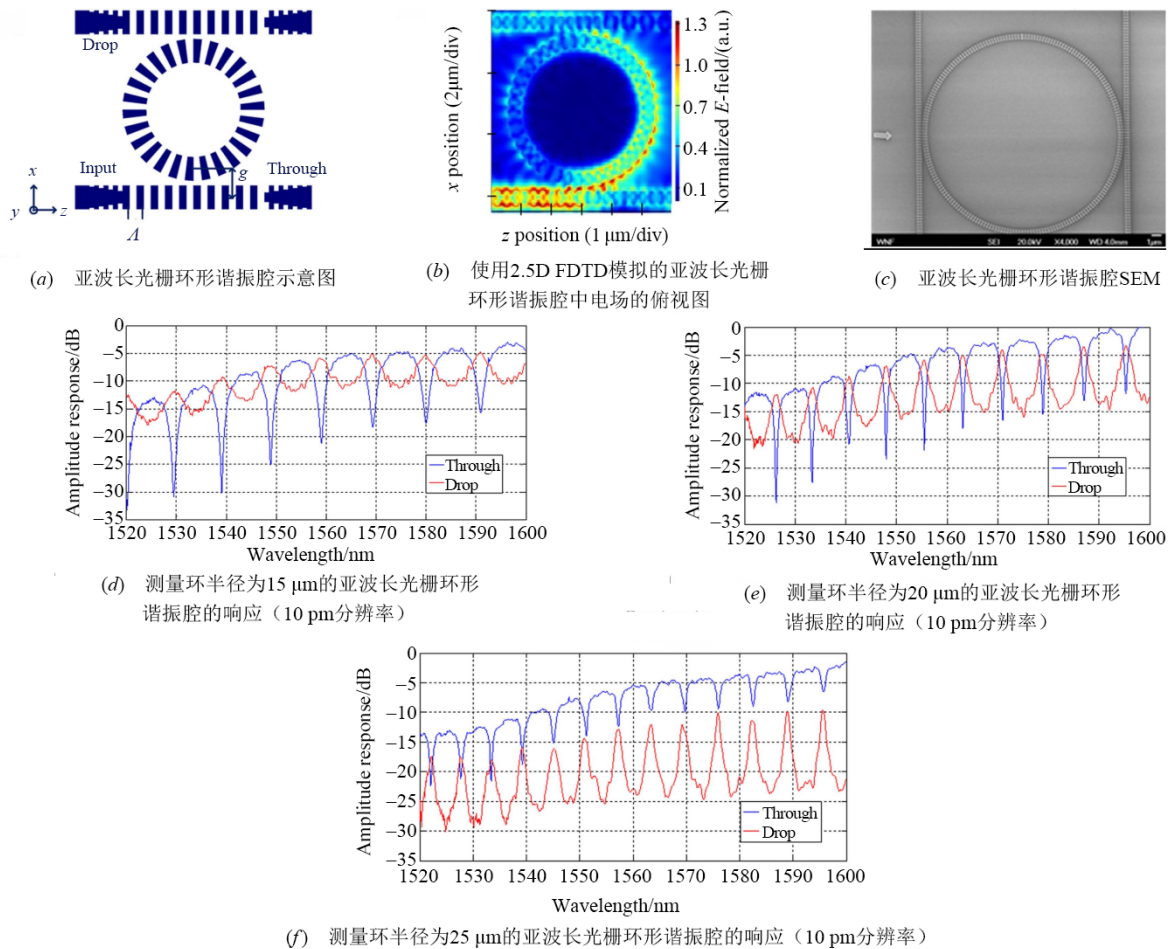


图 5 亚波长光栅微环谐振腔和调制器^[11]

表 2 不同半径的亚波长光栅微环谐振腔

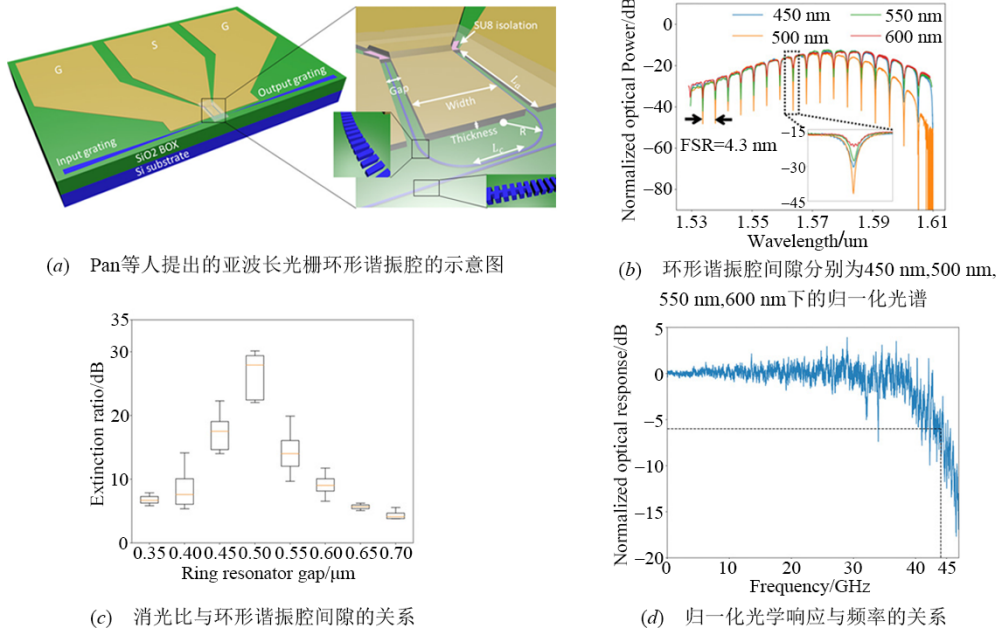
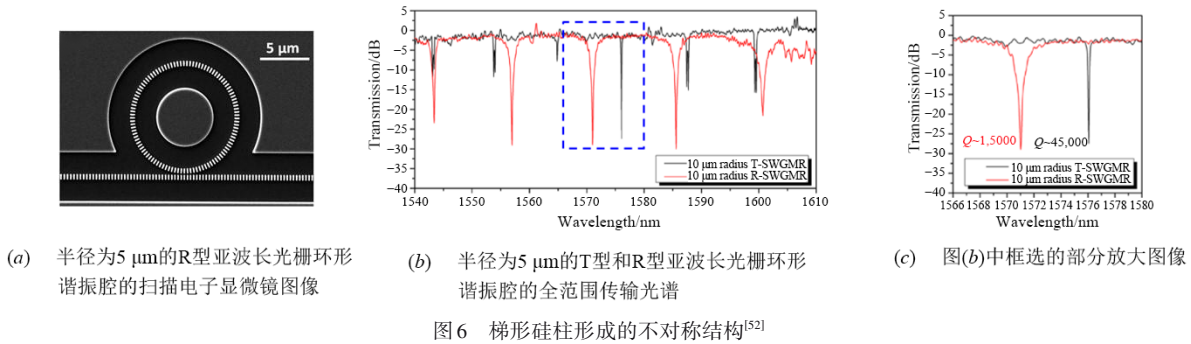
Ring radius/ μm	FSR/nm	Average ER/dB	Average Q -factor/dB
15	9.8	16.0	355.5
20	7.3	15.5	845.9
25	5.8	7.1	1281.1

为了进一步提高品质因子, Wang 等人^[52]提出了梯形硅柱形成的不对称结构, 如图 6 所示. 该结构利用了梯形硅柱的结构可有效控制传播模场, 增加内环模场分量, 从而可以显著降低外环弯曲损耗. 该结构代替了传统的矩形硅柱制备出了半径为 5 μm 的亚波长光栅环

形谐振腔, 将传输损耗大幅降低到 6.07 dB/cm, 使其 Q 值最高达到 45 000.

基于亚波长光栅环形谐振腔, Pan 等人^[53]提出了一种电光聚合物渗透的高速调制器, 如图 7 所示. 亚波长光栅波导的 Bloch 模式与电光聚合物大面积重叠, 优化后可达到 36.2%. 该调制器的 3 dB 调制带宽大于 40 GHz, 能耗低于 26 fJ/bit, 为硅基调制器提供了新方案.

目前亚波长光栅环形谐振腔的品质因子高于布拉格光栅, 同时具备高速可调谐特性. 通过此类滤波器/调制器进行频谱整形, 可在光域中进行信号处理, 从而



获得低损耗、高带宽、不受电磁干扰的微波信号。

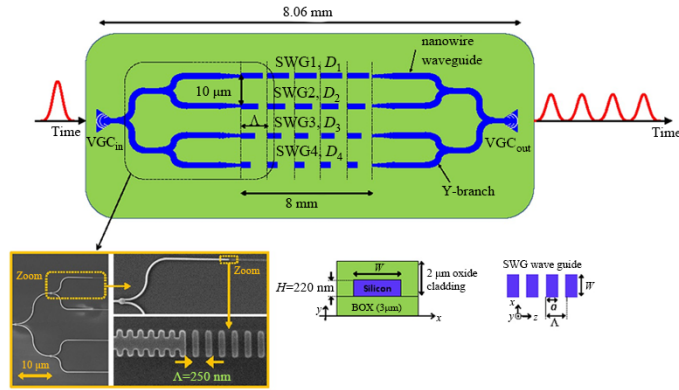
2.5 亚波长光栅延迟线

光学延迟线是集成微波光子信号处理的重要模块,被广泛应用于移相控制中。高延迟、连续可调谐、较宽的运行带宽以及低损耗都是光学延迟线的重要需求^[54]。

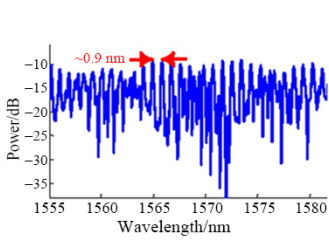
Wang 等人^[30]提出了基于亚波长光栅不同有效折射率、相同长度波导阵列的集成光学真延迟线,如图8所示。该器件相比于传统波长可变延迟线具有更大的运行带宽,超过几十太赫兹,可以用于超宽带宽光信号。如图8(e)所示,观察到的光谱具有9 nm的周期性特征,对应于9 ps的时间延迟增量。为了进一步证实研究时间延迟的增量,Wang 等人在 Mach-Zehnder 干涉仪每个臂上设有不同占空比的亚波长光栅波导(图8(e))。通过测量光谱响应,可证实亚波长光栅延迟线可获得亚

皮秒的分辨率。该工作给硅基延迟线的发展提供了新思路。

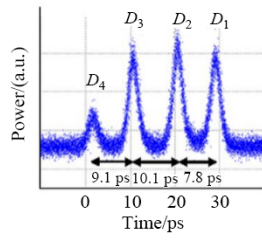
Sun 等人^[55]提出了一种基于亚波长光栅啁啾布拉格光栅做成的光学延迟线。其通过串联10个亚波长光栅布拉格光栅形成了阶梯式啁啾来实现延迟线,如图9所示。与先前的结构相比,该设计可以通过调节负载部分的间隙来控制带宽和布拉格波长。该器件测试得出6 ps的步进延迟和41.7 nm的总带宽以及60 ps的总延迟,结果如图9(b)和图9(c)所示。该研究中所设计出的亚波长光栅啁啾布拉格光栅光学延迟线在运行带宽和延迟范围之间取得了较好的平衡。同时该研究也展示了典型应用示范,即相控阵天线的光波束形成,如图9(d)所示。同时,该课题组的Wang 等人^[56]设计了一种基于亚波长光栅波导且折射率可变的光学延迟线。该设计利用弯曲的结构节省了空间,在紧凑的空间内实现了高延迟性能。



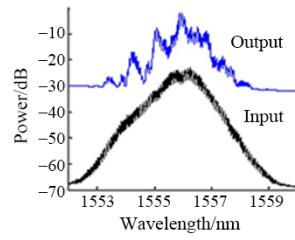
(a) 示意图、SEM图和亚波长光栅波导的横截面



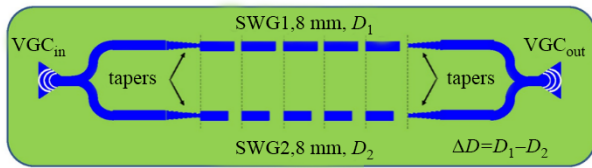
(b) 测得的光谱响应图



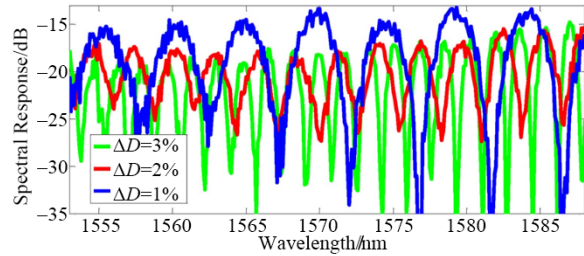
(c) 对应单个光脉冲输入时的输出产生的时域脉冲



(d) 输入和放大输出的信号光谱

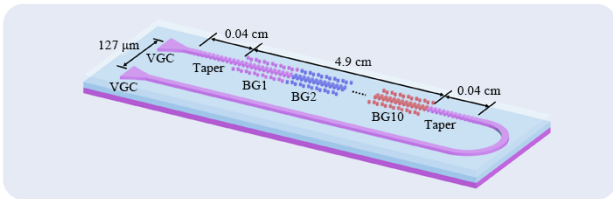


(e) Mach-Zehnder干涉示意图

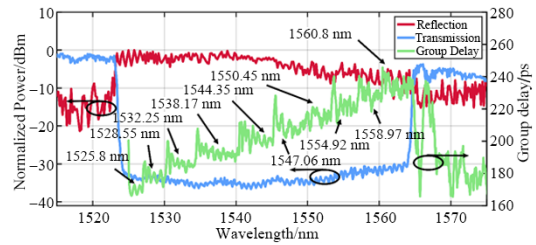


(f) 在ΔD分别为3%, 2%, 1%时Mach-Zehnder干涉的光谱响应

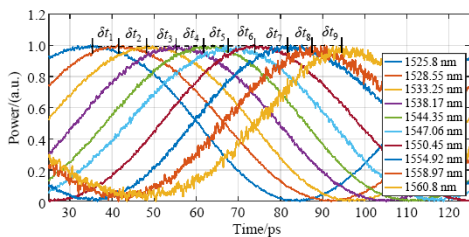
图8 集成光学真延迟线^[30]



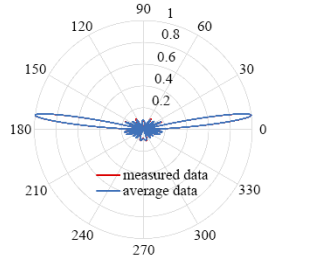
(a) 亚波长光栅啁啾布拉格光栅延迟线的示意图, 其中VGC为垂直光栅耦合器



(b) 亚波长光栅啁啾布拉格光栅延迟线的实验结果



(c) 不同波长信号的时间延迟



(d) 10 GHz射频信号的天线阵列的测量结果

图9 基于亚波长光栅啁啾布拉格光栅做成的光学延迟线^[55]

3 结论与展望

本文主要介绍了集成微波光子学中的硅基亚波长光栅波导滤波器、调制器和光学延迟线。对于滤波器,这里主要介绍了亚波长布拉格光栅以及亚波长光栅环形谐振腔2种亚波长光栅滤波器。亚波长光栅布拉格光栅通过改变其占空比或边带形貌来调整布拉格波长和线宽;亚波长光栅环形谐振腔亦是通过对占空比和形貌等参数优化以获得较高的品质因子;基于亚波长光栅环形谐振腔掺入光学聚合物可形成高速光调制器;而光学延迟线,则是通过改变其亚波长光栅波导的占空比和形貌来控制时间延迟,以获得自由度更高的调控。

与传统的硅基集成微波光子学中的滤波器、调制器和光学延迟线相比,由硅基亚波长光栅波导构成的滤波器、调制器和光学延迟线具有更灵活、更高可调谐性和理论上更低损耗等特性。虽然硅基亚波长光栅波导的优势十分明显,但仍有不足。亚波长光栅波导在制备工艺、结构、材料、尺寸等方面仍需优化。在制备工艺方面,现有工作大部分依赖电子束曝光,未来需要进一步结合CMOS工艺平台参数,设计合理的器件建构,例如使用边带调制,从而实现系统级集成微波光子应用。在材料方面,绝缘硅并非唯一选择,未来可以考虑氮化硅、铌酸锂等材料。

硅基亚波长光栅波导构成的滤波器和光学延迟线还在不断发展中,相信在不久的将来,硅基亚波长光栅波导在微波光子学中的应用会更加广泛,由其构成的微波光子器件的性能也会变得越来越好。

参考文献

- [1] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [2] SEEDS A J, WILLIAMS K J. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [3] IEZEKIEL S, BURLA M, KLAMKIN J, et al. RF engineering meets optoelectronics: Progress in integrated microwave photonics[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2015, 16(8): 28-45.
- [4] MARPAUNG D, YAO J, CAPMANY J. Integrated microwave photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2): 80-90.
- [5] SHAN W, LU L, WANG X, et al. Broadband continuously tunable microwave photonic delay line based on cascaded silicon microrings[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3375-3385.
- [6] CHEW S X, HUANG D, LI L, et al. Integrated microwave photonic phase shifter with full tunable phase shifting range ($>360^\circ$) and RF power equalization[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14798-14808.
- [7] MCKAY L, MERKLEIN M, LIU Y, et al. Integrated microwave photonic true-time delay with interferometric delay enhancement based on Brillouin scattering and microring resonators[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36020-36032.
- [8] FAN Z Q, ZHANG W F, QIU Q, et al. Hybrid frequency-tunable parity-time symmetric optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2127-2133.
- [9] ZHU N, LIU S, LIU H, et al. A novel microwave photonic filter for frequency-tripled signals[C]//2020 Asia Communications and Photonics Conference(ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications(IPOC). Beijing: IEEE, 2020: DOI: 10.1364/ACPC.2020.M4A.348.
- [10] ZHANG W F, YAO J P. Photonic integrated field-programmable disk array signal processor[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 406.
- [11] WANG J, GLESK I, CHEN L R. Subwavelength grating filtering devices[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15335-15345.
- [12] CHEN X, TSANG H K. Polarization-independent grating couplers for silicon-on-insulator nanophotonic waveguides[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 796-798.
- [13] BOCK P, CHEBEN P, SCHMID J, et al. Subwavelength grating periodic structures in silicon-on-insulator: A new type of microphotonic waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20251-20262.
- [14] XU X C, SUBBARAMAN H, COVEY J, et al. Complementary metal-oxide-semiconductor compatible high efficiency subwavelength grating couplers for silicon integrated photonics[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 031109.
- [15] QI F, MA Q, WANG Y, et al. Large-aperture subwavelength grating couplers[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 2960-2966.
- [16] DONZELLA V, SHERWALI A, FLUECKIGER J, et al. Sub-wavelength grating components for integrated optics applications on SOI chips[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 21037-21050.
- [17] ORTEGA-MONUX A, CTYROKY J, CHEBEN P, et al. Disorder effects in subwavelength grating metamaterial waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12222-12236.

- [18] DONZELLA V, SHERWALI A, FLUECKIGER J, et al. Design and fabrication of SOI micro-ring resonators based on sub-wavelength grating waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4791-4803.
- [19] FLUECKIGER J, SCHMIDT S, DONZELLA V, et al. Sub-wavelength grating for enhanced ring resonator biosensor[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15672-15686.
- [20] WANG Z, XU X, FAN D, et al. Geometrical tuning art for entirely subwavelength grating waveguide based integrated photonics circuits[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24106.
- [21] MALPUECH G, KAVOKIN A, PANZARINI G, et al. Theory of photon Bloch oscillations in photonic crystals[J]. *Physical Review B*, 2001, 63(3): 035108.
- [22] RUAN Z S, SHEN L, ZHENG S, et al. Subwavelength grating slot(SWGS) waveguide on silicon platform[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18250-18264.
- [23] WANG Y, SHI W, WANG X, et al. Design of broadband subwavelength grating couplers with low back reflection[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(20): 4647-4650.
- [24] YUN H, WANG Y, ZHANG F, et al. Broadband 2×2 adiabatic 3dB coupler using silicon-on-insulator sub-wavelength grating waveguides[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 3041-3044.
- [25] LIU L, DENG Q, ZHOU Z. Subwavelength-grating-assisted broadband polarization-independent directional coupler[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1648-1651.
- [26] XU Y, XIAO J. Ultracompact and high efficient silicon-based polarization splitter-rotator using a partially-etched subwavelength grating coupler[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 27949.
- [27] XIONG Y, XU D X, SCHMID J H, et al. High extinction ratio and broadband silicon TE-pass polarizer using sub-wavelength grating index engineering[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(5): 1-7.
- [28] WANG J, GLESK I, CHEN L R. Subwavelength grating Bragg grating filters in silicon-on-insulator[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(9): 712-714.
- [29] LIU W N, CHEN R, SHI W Y, et al. Narrow-frequency sharp-angular filters using all-dielectric cascaded meta-gratings[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3443-3450.
- [30] WANG J, ASHRAFI R, ADAMS R, et al. Subwavelength grating enabled on-chip ultra-compact optical true time delay line[J]. *Scientific Reports* 2016, 6: 30235.
- [31] CHUNG C J, XU X C, WANG G C, et al. On-chip optical true time delay lines featuring one-dimensional fish-bone photonic crystal waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 071104.
- [32] ALMEIDA V R, PANEPUCCI R R, LIPSON M. Nanotaper for compact mode conversion[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(15): 1302-1304.
- [33] CHEBEN P, SCHMID J, WANG S R, et al. Broadband polarization independent nanophotonic coupler for silicon waveguides with ultra-high efficiency[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22553-22563.
- [34] KUO P C, TONG Y, CHOW C W, et al. 4.36 Tbit/s silicon chip-to-chip transmission via few-mode fiber(FMF) using 2D sub-wavelength grating couplers[C]//2021 Optical Fiber Communication Conference(OFC). San Francisco: IEEE, 2021: DOI:10.1364/OFC.2021.M3D.6.
- [35] CHENG L, MAO S, WANG Y, et al. Fiber-chip bi-wavelength multiplexing with subwavelength single-etch grating coupler and diplexer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 1-6.
- [36] PAN Z Y, XU X C, CHUNG C J, et al. High-speed modulator based on electro-optic polymer infiltrated subwavelength grating waveguide ring resonator[C]//Proceedings Volume 10538, Optical Interconnects XVIII. San Francisco: SPIE OPTO, 2018: 179.
- [37] RAJPUT S, KAUSHIK V, BABU P, et al. Optical modulation via coupling of distributed semiconductor heterojunctions in a Si-ITO-based subwavelength grating[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(5): 054029.
- [38] RYTOV S M. Electromagnetic properties of a finely stratified medium[J]. *Sovphysjept Engltransl*, 1956, 2(3): 466-475.
- [39] CHEBEN P, HALIR R, SCHMID J H, et al. Subwavelength integrated photonics[J]. *Nature*, 2018, 560(7720): 565-572.
- [40] LALANNE P, ASTILEAN S, CHAVEL P, et al. Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff[J]. *Journal of The Optical Society of America A-optics Image Science and Vision*, 1999, 16(5): 1143-1156.
- [41] LALANNE P, CHAVEL P. Metalenses at visible wavelengths: Past, present, perspectives[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(3): 1600295.
- [42] HALIR R, ORTEGA-MONUX A, SCHMID J H, et al. Recent advances in silicon waveguide devices using subwavelength gratings[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 279-291.
- [43] HALIR R, BOCK P J, CHEBEN P, et al. Waveguide sub-

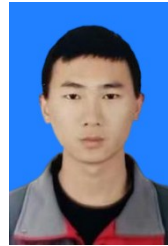
- wavelength structures: A review of principles and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(1): 25-49.
- [44] KANG J, CHENG Z, ZHOU W, et al. Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane germanium waveguides[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2094-2097.
- [45] PENADES J S, ORTEGA-MONUX A, NEDELJKOVIC M, et al. Suspended silicon mid-infrared waveguide devices with subwavelength grating metamaterial cladding[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22908-22916.
- [46] CHEN L R. Subwavelength grating waveguide devices in silicon-on-insulators for integrated microwave photonics (Invited Paper)[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(1): 10004-10008.
- [47] GAO G, LUO M, LI X, et al. Transmission of 2.86 Tb/s data stream in silicon subwavelength grating waveguides [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2918-2927.
- [48] PEREIRA-MARTÍN D, LUQUE-GONZÁLEZ J, WANG-ÜEMERT-PÉREZ J G, et al. Complex spectral filters in silicon waveguides based on cladding-modulated Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 15867-15881.
- [49] LUAN E, YUN H, MA M, et al. Label-free biosensing with a multi-box sub-wavelength phase-shifted Bragg grating waveguide[J]. *Biomed Optics Express*, 2019, 10(9): 4825-4838.
- [50] HEINSALU S, ISOGAI Y, KAWANO A, et al. Proposal and analysis of ultra-high amplitude-sensitive refractive index sensor by thick silicon multi-slot sub-wavelength Bragg grating waveguide[J]. *Optics Communications*, 2022, 505: 127533.
- [51] WANG J J, GLESK I, CHEN L R. Subwavelength grating devices in silicon photonics[J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(11): 879-888.
- [52] WANG Z, XU X C, FAN D, et al. High quality factor subwavelength grating waveguide micro-ring resonator based on trapezoidal silicon Pillars[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3375-3378.
- [53] PAN Z Y, XU X C, CHUNG C J, et al. High-speed modulator based on electro-optic polymer infiltrated subwavelength grating waveguide ring resonator[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(6): 1700300.1-1700300.6.
- [54] CHEN L R, WANG J, NAGHDI B, et al. Subwavelength grating waveguide devices for telecommunications applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(3): 1-11.
- [55] SUN H, WANG Y, CHEN L R. Integrated discretely tunable optical delay line based on step-chirped subwavelength grating waveguide Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(19): 5551-5560.
- [56] WANG Y, SUN H, KHALIL M, et al. On-chip optical true time delay lines based on subwavelength grating waveguides[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1405-1408.

作者简介



王俊嘉 男, 1987年出生, 江苏南京人. 东南大学研究员, 博士生导师. 主要研究方向为光子集成.

E-mail: junjia_wang@seu.edu.cn



房崇宝 男, 1996年出生, 江苏扬州人. 东南大学电子科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为电光调制器等.