

高反射率、低温度敏感性的片上光反射镜

廖莎莎^{1,2*}, 张甜甜¹, 包航¹, 刘继伟¹, 廖希¹¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;²东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 211189

摘要 反射镜作为光子集成电路的基本元件,被应用于量子通信、智能电网、航空航天等多种领域。高反射率、低温度敏感性的片上光反射镜可以大大简化光子集成电路系统,提高光子集成电路的可靠性和稳定性。因此,提出了一种基于绝缘体上硅的高反射率、低温度敏感性片上光反射镜方案。该方案采用 Sagnac 环结构,可在 3.41 nm 波长范围内实现超高反射率(反射率大于 90%),在 32.85 nm 波长范围内实现高反射率(反射率大于 80%)。通过片上微型热电极对该反射镜进行加热,结果表明,当微型热电极的功率从 0 mW 逐渐升高至 6 mW 时,在 1566.5~1568.58 nm 波长范围内反射镜的波长漂移量小于 0.045 nm,反射率变化小于 0.19 dB。该反射镜具有尺寸小、质量轻、制造简单、反射率高、损耗小、温度不敏感等优势,可广泛应用于激光器、微波光子滤波器、光传输网等通信和信号处理领域。

关键词 集成光学; 光反射镜; Sagnac 环; 硅光子学; 光子集成电路

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0423001

On-Chip Optical Reflectors with High Reflectance and Low Temperature Sensitivity

Liao Shasha^{1,2*}, Zhang Tiantian¹, Bao Hang¹, Liu Jiwei¹, Liao Xi¹

¹ School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

² State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China

Abstract As the basic component of photonic integrated circuits, optical reflectors are widely used in plenty of fields, such as quantum communications, smart grids, aerospace and so on. On-chip optical reflectors with high reflectance and low temperature sensitivity shall greatly simplify the photonic integrated circuit systems and improve the reliability and stability of the photonic integrated circuits. Therefore, we propose an on-chip optical reflector based on silicon on insulator with high reflectance and low temperature sensitivity. Our scheme is based on a Sagnac loop and can obtain ultra-high reflectance with a wavelength range of 3.41 nm (reflectance more than 90%) and high reflectance with a wavelength range of 32.85 nm (reflectance more than 80%). The reflectors are heated by the on-chip micro-electrodes, and the results show that when the power of the micro hot electrode is gradually increased from 0 mW to 6 mW, the wavelength shift of the reflector in the wavelength region of 1566.5–1568.58 nm is less than 0.045 nm. The reflectance change is less than 0.19 dB. The reflector has the advantages of small size, light weight, simple fabrication, high reflectance, low loss, and temperature insensitivity. It can be widely used in communication and signal processing fields such as lasers, microwave photonic filters, and optical transmission networks.

Key words integrated optics; optical reflectors; Sagnac loop; silicon photonics; photonic integrated circuits

OCIS codes 230.3120; 230.4040; 230.1150

收稿日期: 2020-08-21; 修回日期: 2020-09-10; 录用日期: 2020-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61801063, 61801062)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201800605)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0597)、东南大学毫米波重点实验室开放课题(K202005)

* E-mail: liaoss@cqupt.edu.cn

1 引言

随着信息科学的迅猛发展,信息全球化逐渐改善了人们的生活,但在沟通、消费、互联等越来越便利的同时也增加了很多潜在的隐患,如信息泄露、网络诈骗、信息篡改。量子密钥分发(QKD)^[1]技术可以增强通信过程的可靠性和保密性,QKD是利用量子力学不可窃听、不可复制的特性,使通信双方产生并分享一个随机、安全的密钥对消息进行加密和解密,以此保障信息传输的绝对安全和超高效率^[2]。目前,QKD技术得到了广泛的应用,如智能电网^[3]、密码通信^[4]、航天太空^[5]领域。反射镜作为空间QKD光学系统中的重要光学元件,在光学系统中的光路折转、光学相关装置的设计制备、光学能量的高效传递等方面也得到了广泛的研究^[6]。随着相关理论的不完善与相关技术的不断革新,近年来,反射镜的结构也得到了不断优化和创新。

常见的反射镜方案主要有基于微机电系统(MEMS)、液晶、薄膜、光栅等不同结构的方案。MEMS反射镜是一种成熟的反射镜方案,能实现多维度调节,可应用在不同的研究领域。Bai等^[7]将带有侧壁电极的二维(2D)MEMS反射镜用于共焦显微成像;Seo等^[8]通过李萨茹扫描MEMS反射镜模块进行了高分辨率三维(3D)表面可变结构照明成像演示。为了实现更灵活、更多维的调控方式,Bruno等^[9]将液态聚合物(Sylgard184)旋涂到模具芯片中,通过改变模具芯片的温度获得所需的镜面轮廓及镜面深度,并提出了一种具有热激励自由形式的MEMS反射镜方案。但这类反射镜结构比较复杂,大多通过机械进行调节且调节速率十分有限。基于液晶结构的反射镜方案具有高反射率和大反射率调节范围的优势,也得到了广泛的研究, Lee等^[10]利用液晶的光子晶体结构特性,采用堆叠的双光致发光胆甾型液晶层实现了智能反射镜,可以反射外部入射光,并通过来自背光的紫外线发光。但制作成本高、体积大,不能运用在高功率激光场景。随着材料科学的不断进步,对薄膜类反射镜的探索也成为了研究热点,相关方案大多基于布拉格反射原理。Tripathi等^[11]利用低成本化学气相沉积技术沉积的超薄四分之一波长硅膜,成功制造出适用于可见光至近红外波长范围内的分布式布拉格反射镜(DBR)。万颖等^[12]采用原子层沉积法制备出均匀性较好的TiN薄膜(与TiO₂之间具有良好的粘附性),并基于该材料实现了具有高反射率的TiO₂/

Ai₂O₃ DBR。上述方案虽然在反射率可调范围、稳定性等方面有明显优势,但无法实现大规模集成。因此,Wu等^[13]通过串联 π 相移反对称布拉格光栅和均匀布拉格光栅,实现了片上光学窄带反射镜;Shi等^[14]基于亚波长全介电光栅设计了一个超薄、低损耗、高反射、高集成度的超宽带反射镜,几乎覆盖了整个可见光范围。但波导光栅工艺容差小,对工艺稳定性的要求较高。

综上所述,常见的四种反射镜方案虽然在反射率、带宽、灵活性方面具有一些优势,但也存在结构复杂、成本较高、无法大规模集成、工艺容差小等缺陷。为了解决这些问题,本文提出了一种新型的高反射率、低温度敏感性片上反射镜方案。采用绝缘体上硅(SOI)芯片,将对称 2×2 多模干涉仪(MMI)和Sagnac环结合起来。在无温度变化情况下,该反射镜可在极大波长范围内实现高反射率(3.41 nm波长范围内反射率大于90%,32.85 nm波长范围内反射率大于80%)。利用微型加热器对该反射镜加热后,其在1566.5~1568.58 nm波长范围内的波长漂移量小于0.045 nm,反射率变化始终在0.19 dB以内,验证了该反射镜的低温度敏感性。同时,该反射镜具有尺寸小、质量轻、制造简单、反射率高、损耗小等优势,可广泛应用于激光器、微波光子滤波器、光传输网等通信和信号处理领域。

2 片上反射镜的原理及仿真

2×2 MMI是一种常见的硅基集成器件,在光信号处理和光通信系统中有着广泛的应用。其具有尺寸小、质量轻、工作带宽大、制作工艺简单等优点,常作为光复用/解复用器、光开关、马赫泽德干涉仪等组成部件,以实现不同的光信号处理功能^[15]。Sagnac环也是一种常见的光学结构,基于Sagnac效应^[16]的可旋转Sagnac环型干涉仪主要由一个分光棱镜和两个完全对称的平面反射镜组成,Michelson-Gale-Pearson实验便是利用Sagnac效应测量地球自转。光纤Sagnac干涉环的结构如图1

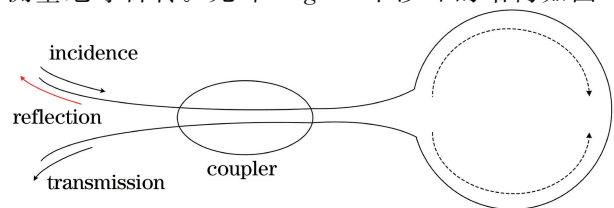


图1 光纤Sagnac环的结构

Fig. 1 Schematic diagram of the fiber Sagnac loop

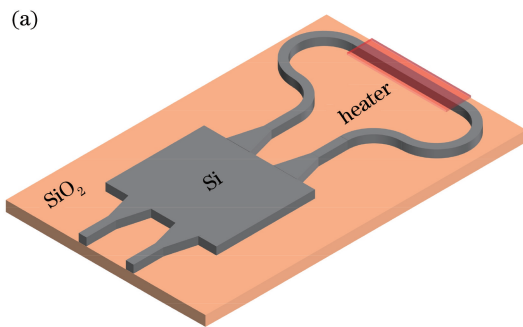
所示,耦合器左侧端口的两根光纤分别作为光输入端和输出端,右侧端口用一根光纤连接成环,使入射光经耦合器后分成的两束光在同一个环路内沿相反方向循环一周后,最终在耦合器处交汇并产生干涉^[17]。

光的分束强度不完全相同,导致输出端可能会存在一定强度的光输出,即透射光。一般情况下,可将总输出光强度与输入光强度的比定义为 Sagnac 环的反射率 R 。忽略光信号在 Sagnac 环中的传输损耗,可将 R 表示为^[18]

$$R = 1 - \frac{|E_2|^2}{|E_1|^2} = 2\eta(1 - \eta)\{1 + \cos[(1 - 2\eta)\varphi]\}, \quad (1)$$

式中, η 为耦合器输出端的功率比, φ 为反向传输的两束光在环中传输时的相位差, E_1 为入射光强, E_2 为输出光强。由(1)式可知,当且仅当耦合器输出端的功率比 $\eta=1/2$ 时, R 达到最大值,为 1,即透射光完全消失,所有输入的光会被反射回入射端口。且该反射镜的反射率与 Sagnac 环长没有关系,可实现较大的工作带宽。除此之外,MMI 的温度敏感性较低,当温度变化时,MMI 输出端的功率比几乎不变,使该反射镜具有低温度敏感性。因此,采用 Sagnac 环结构实现片上反射镜是一种可行方案。

实验中的高反射率、低温度敏感性片上反射镜方案与光纤 Sagnac 环具有相似的原理,其结构如图



2 所示。该反射镜中 SOI 芯片的上硅层厚度为 220 nm,掩埋层为 2 μm ,刻蚀的条形波导长为 220 nm。其中, 2×2 MMI 采用对称的 MMI 结构,即从端口 1 输入的光信号会被均匀分为两路,分别从端口 3 和端口 4 输出,此时耦合器输出端的功率比为 1:1,满足(1)式的反射条件。因此,可初步断定该结构能实现高反射率的反射镜。反射镜中相关结构参数的设置如图 2(b)所示,其中,波导宽度 $w_0 = 500 \text{ nm}$,锥形波导最宽处的宽度 $w_1 = 1.9 \mu\text{m}$,锥形波导的长度 $l_1 = 30 \mu\text{m}$,矩形波导的长度 $l = 10 \mu\text{m}$,多模波导的宽度 $w_m = 4 \mu\text{m}$,多模波导的长度 $l_m = 56.5 \mu\text{m}$,相邻两输入/输出端口间的间隔 $g_1 = 0.168 \mu\text{m}$,弯曲波导半径分别为 $r_1 = 11 \mu\text{m}$, $r_2 = 12 \mu\text{m}$, 2×2 MMI 的结构参数能保证输入信号被均分为两路。常见的 Sagnac 环结构波导反射镜方案一般采用 U 形波导结构^[19],虽然也可以实现高反射率,但 U 形区域的波导宽度、长度和波导间隔的大小会直接影响反射率的大小。实验采用的 2×2 MMI 结构具有工艺容差大的优势,能保证在大规模批量制作时器件反射率的稳定性;且该反射镜方案通过改变 MMI 输出端口的位置可以有效改变反射镜的反射率,有利于扩展具有不同反射率的反射镜;此外,实验使用的 MMI 为低温度敏感性器件,当温度变化时,MMI 输出端的功率比几乎不变,使该反射镜具有低温度敏感性。

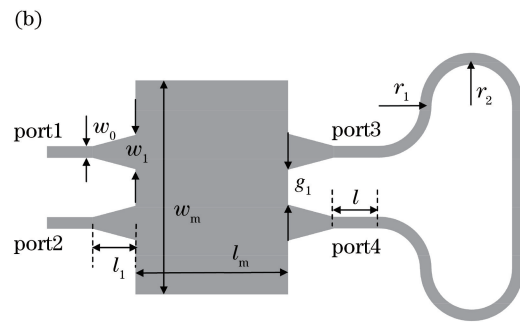


图 2 片上反射镜的结构。(a) 3D 示意图;(b) 俯视图及相关结构参数

Fig. 2 Schematic diagram of the on-chip reflector. (a) 3D view; (b) top view and related structure parameter

实际器件制作之前,首先采用 Lumerical 仿真软件模拟了光信号由端口 1 输入情况下,反射镜结构中 2×2 MMI 的光场分布情况和不同端口的光信号功率情况。通过时域有限差分法(FDTD)模拟的 2×2 MMI 光场的分布情况如图 3(a)所示,可以看出,从端口 1 输入的光被均匀分配到两个输出端口。 2×2 MMI 不同端口处的光信号功率如图 3(b)所示,其中,实线和长虚线分别为 2×2 MMI 端口 3 和

端口 4 的输出功率谱,短虚线为 2×2 MMI 端口 1 的反射功率谱,即反射镜的输出谱,相关谱线已进行归一化处理。观察发现, 2×2 MMI 端口 3 和端口 4 的输出功率谱在 1525~1575 nm 波长范围内分别为 0.51 和 0.49,功率波动范围不超过 0.02 和 0.03。反射镜的反射率在 1525~1575 nm 波长范围内均大于 0.93,反射率波动范围小于 0.05,这表明本方案中的反射镜结构在大波长范围内均能实现

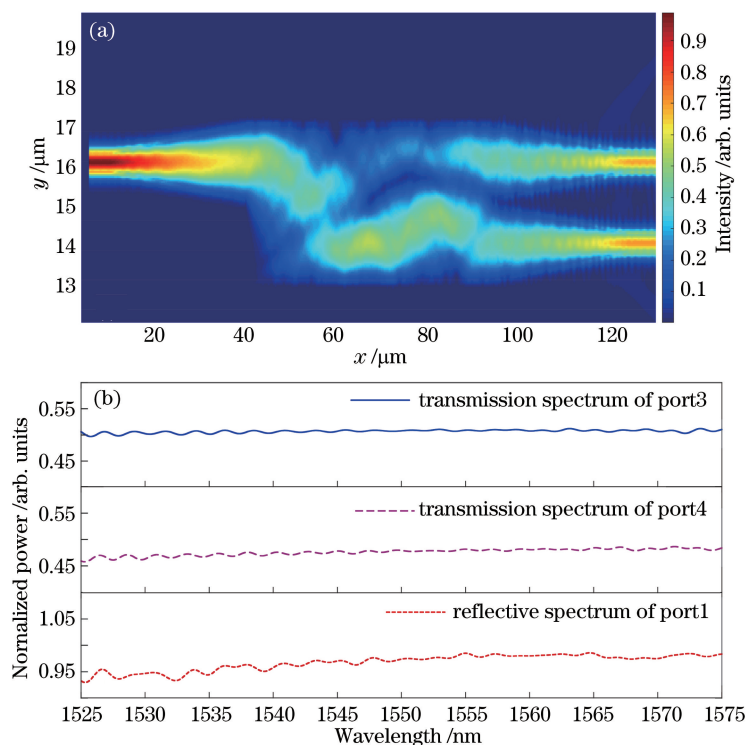


图 3 片上反射镜的仿真结果。(a)通过 FDTD 模拟的 MMI 光场图;(b)不同端口的光信号功率
Fig. 3 Simulated result of the on-chip reflector. (a) MMI light field diagram simulated by FDTD;
(b) optical signal power under different ports

较高的反射率,且具有较强的稳定性。

3 片上反射镜的制备

本方案中的反射镜采用商用 SOI 芯片,总体结

构尺寸约为 $2084.34\ \mu\text{m} \times 179.02\ \mu\text{m}$,核心区域结构(不包含光栅耦合器部分)的尺寸约为 $221.26\ \mu\text{m} \times 82.58\ \mu\text{m}$,采用金相显微镜观察反射镜的形貌,结果如图 4 所示。

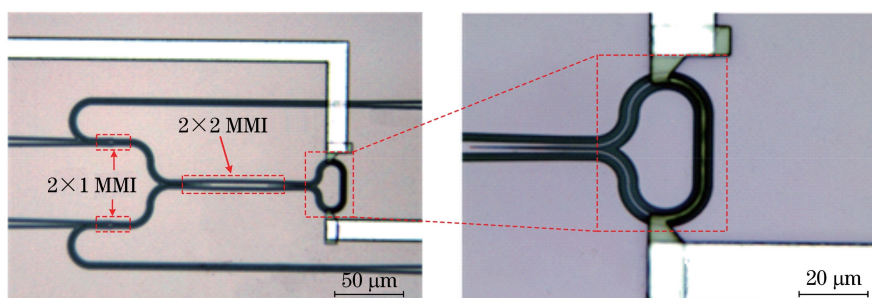


图 4 高反射率、低温度敏感性片上反射镜的金相显微镜图
Fig. 4 Metallographic micrograph of the high reflectance, low temperature sensitivity on-chip reflector

光纤与芯片之间的耦合采用光栅耦合器垂直耦合的方式,为了保证后续实验中芯片与光纤耦合达到最佳效果,在 2×2 MMI 的端口 1 和端口 2 处额外制作了两个 2×1 MMI。该反射镜芯片的制造步骤如下。

1) 制造光栅耦合器。设计的器件尺寸为 nm 量级,常规的光刻工艺难以保证器件尺寸的精度,因此采用电子束光刻技术进行制备。首先,在 SOI 基片上涂覆一层光刻胶,再通过电子束曝光和显影、定

影得到光栅的电子束光刻胶图形;然后,采用电感耦合等离子体(ICP)深硅刻蚀机台干法刻蚀硅材料,该芯片光栅的刻蚀深度为 $70\ \text{nm}$;最后,去除残余的光刻胶后,即可得到光栅器件。

2) 制造波导结构。该步骤与光栅的制作过程类似,首先利用电子束光刻系统完成光刻胶的图形化加工,然后采用 ICP 深硅刻蚀机台干法刻蚀硅材料,最后去胶清洗,只是波导刻蚀深度与光栅不同,为 $220\ \text{nm}$ 。此时反射镜的基本波导结构已经制作

完毕。为了验证该反射镜的低温度敏感性,需要在反射镜的 Sagnac 环区域制作热电极。

3) 利用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)在波导和光栅耦合器上沉积氧化硅包层,其厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。再次重复涂覆光刻胶、电子束曝光、显影、定影和去胶的流程,将热电极版图转移到光刻胶上,并利用电子束蒸发法沉积 Ti/Au 等金属,制作微型加热器和金属电极。

4 片上反射镜性能测试及结果分析

为了验证该反射镜的高反射率、低温度敏感性等特性,对该反射镜进行了相关的性能测试。首先,宽谱光源发出的光信号通过光栅耦合器被耦合到芯片中,其波长范围为 $1530\sim 1570\ \text{nm}$ 。由于光纤-芯片耦合平台中光纤和光栅耦合器之间的对准是通过测量输出端光纤功率实现的,而实验测试的是反射器件,输出光信号沿输入端光纤原路输出。为了保证最佳的耦合效率和测试的便捷性,在 2×2 MMI 的端口 1 和端口 2 处额外制作了两个 2×1 MMI,并将其中一路延伸至器件后端,方便与耦合平台的输出端光纤对准。调节耦合光纤位置使输出端光纤输出功率最大时,芯片中的光栅耦合器就与光纤完成对准。在反射镜实际应用时,无需制作这两个 2×1 MMI。为了防止反射镜输出的光信号损坏宽谱光源等仪器,在宽谱光源和耦合平台间加入了光

纤环形器(Circulator)导出输出光信号。最后将光信号输入高分辨率的光谱分析仪中进行测量,该光谱分析仪的分辨率为 $0.02\ \text{nm}$ 。芯片中还额外制作了一段直波导作为对照组,将光谱分析仪测得的谱线预先补偿 2×1 MMI 和环形器引入的损耗(2×1 MMI 分光作用会带来 $3\ \text{dB}$ 的损耗,环形器经测量有 $0.8\ \text{dB}$ 的损耗,其他损耗可忽略不计)后,再与直波导的输出谱进行对比,计算反射镜的反射率。在测试反射镜温度敏感性的实验中,利用直流探针将直流电压源产生的电压加载到反射镜的微型电极上,从而改变反射镜温度。

图 5 为无温度变化时反射镜的反射谱线,其中,图 5(a)中的实线为实验测得的反射曲线。可以发现,与仿真结果不同,实验测得的反射谱出现了明显的谐振,原因是实验中耦合光纤和光栅耦合器之间形成了微小的法布里-珀罗谐振(F-P)腔。将测得的反射曲线各个谐振峰连接起来,可以得到反射镜真实的反射曲线,如图 5(a)中的虚线。为了便于观察,将该包络线重新绘制在图 5(b)中,可以发现,该反射镜在 $\lambda_1=1539.40\ \text{nm}$ 、 $\lambda_2=1551.20\ \text{nm}$ 、 $\lambda_3=1561.00\ \text{nm}$ 和 $\lambda_4=1567.00\ \text{nm}$ 处均实现了高反射率。在 λ_4 处反射镜的反射曲线达到最大值,为 $0\ \text{dB}$,即此时反射镜的反射率达到了 100% ;而在 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 处,反射镜的反射曲线归一化功率分别为 $-0.24\ \text{dB}$ 、 $-0.03\ \text{dB}$ 和 $-0.06\ \text{dB}$,换算后可以

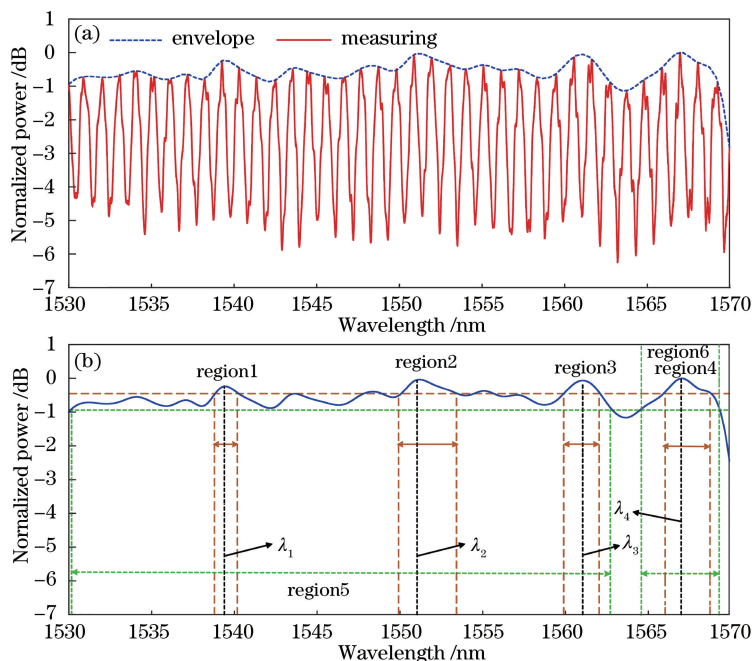


图 5 无温度变化时反射镜的反射曲线。(a)实验测得的反射曲线及其包络曲线;(b)反射镜的反射谱包络曲线

Fig. 5 Reflective curve of the reflector when there is no temperature change. (a) Experimentally measured reflective curve and its envelope curve; (b) reflective spectrum envelope curve of the reflector

发现,反射率均大于 94%。以反射率大于 90%为衡量反射镜性能的标准,在图 5(b)中用长虚线标出,可以发现,反射镜的反射曲线中有 4 段波长范围满足该反射率要求:区域 1(1538.84~1540.27 nm),带宽为 1.43 nm;区域 2(1550.07~1553.48 nm),带宽为 3.41 nm;区域 3(1559.89~1562.10 nm),带宽为 2.21 nm;区域 4(1565.92~1568.81 nm),带宽为 2.89 nm。如果以反射率大于 80%为衡量标准,在图 5(b)中用短虚线标出,可以发现,反射曲线的大部分区域均满足该反射要求:区域 5(1530.05~1562.90 nm),带宽为 32.85 nm;区域 6(1564.43~1569.35 nm),带宽为 4.92 nm。与仿真结果相比,可以发现,实验测得的反射率波动较大,原因是实际制作过程中工艺误差导致 2×2 MMI 在某些波长段内两输出端功率比不是严格的 1:1。此外,实际器件中 Sagnac 环对光信号的损耗也会导致反射率下降。

为测试该反射镜的温度敏感性,通过微型热电极对 Sagnac 环进行加热,测量了不同温度情况下反射镜反射谱的变化量。为方便观察,截取波长区间为 1566.5~1568.58 nm 的反射谱进行分析,结果

如图 6(a)所示。热调时芯片的温度不均匀性,导致分析测量结果时不能以芯片非波导区域位置的温度代替热调区域的温度,因此,实验中未采用外加热敏电阻等方式测量芯片温度,而是采用热电极功率作为衡量器件温度的指标。可以发现,随着温度的升高,反射镜的反射谱呈略微红移。为了更直观地分析反射谱漂移量与热电极功率之间的关系,绘制了波长漂移量-热电极功率曲线,如图 6(b)所示。其中,圆点为实验测量值,实线为拟合曲线。可以发现,在热电极功率变化范围(6 mW)内,反射镜波长漂移量均小于 0.045 nm,这表明反射镜对温度不敏感。此外,为了更清晰地观察该反射镜反射率随温度的变化,还绘制了加热功率为 0 mW(实线)和 6 mW(虚线)时反射镜反射谱的包络曲线,如图 6(c)所示。可以看出,反射镜反射率随温度的变化非常微小,在 1566.5~1568.58 nm 波长范围内,反射率变化量均小于 0.19 dB。这进一步证明了该反射镜具有低温度敏感性。同时,对于某些需要微调反射率或最大反射率波长的应用场景,该反射镜也能满足需求。

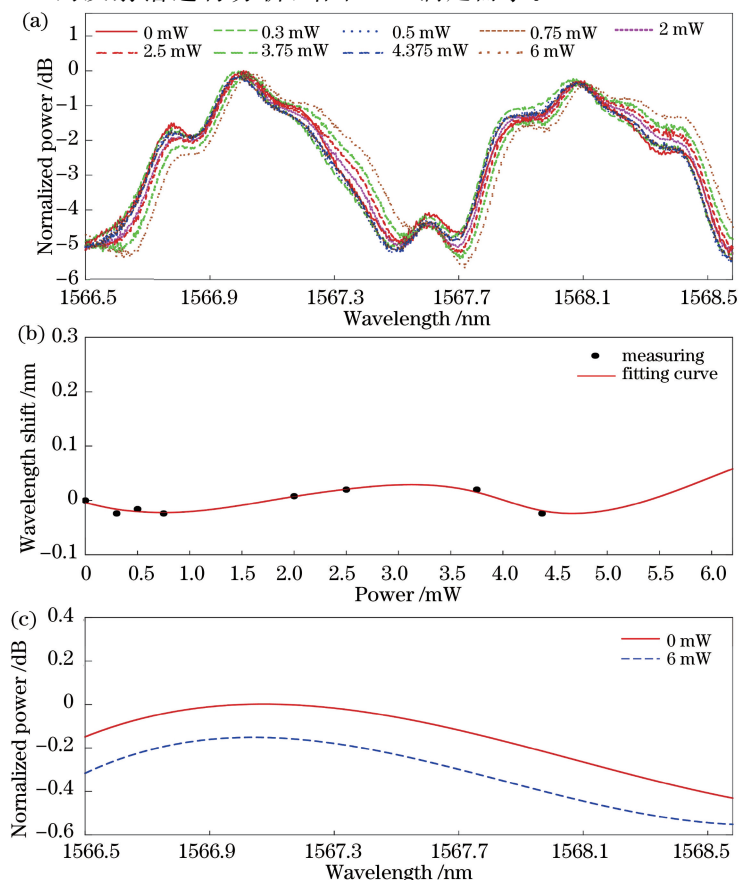


图 6 温度变化时反射镜的反射谱线。(a)反射曲线;(b)反射曲线的波长漂移量;(c)反射谱包络曲线的功率变化
Fig. 6 Reflective spectrum of the reflector when the temperature changes. (a) Reflective curve; (b) wavelength drift of reflection curve; (c) power change of reflective spectrum envelope curve

5 结 论

提出了一种高反射率、低温度敏感性片上反射镜方案,将硅基对称 2×2 MMI 和 Sagnac 环相结合。实验结果表明,在无温度变化的情况下,该反射镜在 4 个不同波长区域的反射率大于 90%,最大带宽为 3.41 nm;在 2 个波长区域的反射率大于 80%,最大带宽为 32.85 nm。为验证该反射镜的低温度敏感性,在芯片中加入微型热电极,当微型热电极功率从 0 mW 逐渐升高至 6 mW 时,在 1566.5 ~ 1568.58 nm 波长范围内反射镜的波长漂移量均小于 0.045 nm,反射率变化始终在 0.19 dB 以内。该反射镜具有尺寸小、质量轻、制造简单、反射率高、损耗小、温度不敏感等优势,可广泛应用于激光器、微波光子滤波器、光传输网等通信和信号处理领域。

参 考 文 献

- [1] He Y F, Song C, Li D Q, et al. Asymmetric-channel quantum key distribution based on heralded single-photon sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (3): 0327001.
何业锋, 宋畅, 李东琪, 等. 基于指示单光子源的非对称信道量子密钥分配 [J]. *光学学报*, 2018, 38 (3): 0327001.
- [2] Zhang G, Cao L, Haw J Y, et al. Integrated chip for continuous-variable quantum key distribution using silicon photonic fabrication [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2018: FTu3G.2.
- [3] Zhang R R, Chen X. Prospects of fiber quantum key distribution technology for power systems [C] // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), June 10-13, 2013, Stockholm, Sweden. New York: IEEE Press, 2013: 1-4.
- [4] Tajima A, Kondoh T, Ochi T, et al. Quantum key distribution network and its applications [C] // 2018 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), July 9-11, 2018, Waikoloa Village, HI, USA. New York: IEEE Press, 2018: 69-70.
- [5] Graham T, Zeitler C, Chapman J, et al. Superdense teleportation and quantum key distribution for space applications [C] // 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [6] Yu D M, Duan W B, Li D Q, et al. Design and fabrication of polarization- and phase-modulated mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (15): 1531001.
余德明, 段微波, 李大琪, 等. 偏振和位相调控反射镜的设计与制备 [J]. *光学学报*, 2020, 40 (15): 1531001.
- [7] Bai Y, Pallapa M, Chen A, et al. A 2D MEMS mirror with sidewall electrodes applied for confocal MACROscope imaging [J]. *Journal of Microscopy*, 2012, 245(2): 210-220.
- [8] Seo Y H, Yang S P, Kim H, et al. High resolution 3D surface imaging using variable structured illumination via lissajous scanning MEMS mirror module [C] // 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 27-31, 2019, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 278-281.
- [9] Bruno B P, Treffer A, Grunwald R, et al. Thermally actuated free-form MEMS mirrors [C] // 2019 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN), July 28-August 1, 2019, Daejeon, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 82-83.
- [10] Lee D K, Choi J M, Jhun C G, et al. Smart reflector using photoluminescence cholesteric liquid crystal for electrowetting displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1013-1018.
- [11] Tripathi D K, Silva K K M B D, Bumgarner J W, et al. Silicon-air-silicon distributed Bragg reflectors for visible and near infrared optical MEMS [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24 (5): 1245-1247.
- [12] Wan Y, Wu H, Liu C. Preparation of high reflectivity distributed Bragg mirrors based on atomic layer deposition [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(4): 528-533.
万颖, 吴昊, 刘昌. 原子层沉积法制备高反射率的分布式布拉格反射镜 [J]. *半导体光电*, 2019, 40(4): 528-533.
- [13] Wu Y T, Shi Y C, Zhao Y. On-chip optical narrowband reflector based on anti-symmetric Bragg grating [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 1118: 111820M.
- [14] Shi X Z, Lu Y F, Chen C S, et al. Ultra-broadband reflector based on subwavelength all-dielectric grating [C] // 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [15] Zheng Y, Shum P P, Luo Y Y, et al. High-resolution, large-dynamic-range multimode

- interferometer sensor based on a suspended-core microstructured optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 1017-1020.
- [16] Wang X K, Gao Y P. Universal time calculation method based on large-scale fiber optic gyroscopes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0920001.
王惜康, 高玉平. 一种基于大型光纤陀螺仪的世界时解算方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0920001.
- [17] Cai X, Chen X Y, Fu H Y. A temperature sensing scheme realized with Sagnac interferometer based microwave photonic filter [C] // 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [18] Liu G Y, Ou S M, Chen K L, et al. Mode-locked oscillator-amplifier femtosecond pulse laser with bias phase shift nonlinear loop mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501011.
刘关玉, 欧尚明, 陈昆仑, 等. 基于偏置相移非线性环路反射镜的锁模振荡放大飞秒脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501011.
- [19] Sun X M, Zhou L J, Xie J Y, et al. Tunable silicon comb filters based on Fabry-Perot resonators formed by Sagnac loop mirrors [C] // 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), March 17-21, 2013, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1-3.