光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250422002

基于硅上锗平台的中红外重建型光谱仪

崔浩祥，侯亚彤，钟其泽，郑少南*，胡　挺
（上海大学 微电子学院，上海 201800）

摘　要： 中红外波段（2.5～25 μm）包含了特征频率区（2.5～7.7 μm）和分子指纹区（7.7～16.7 μm），是光谱检测和分子传感的理想波段。尽管基于光波导的重建型微型光谱仪已经在近红外和可见光波段表现出色，但在中红外波段实现兼具大带宽、高分辨率和紧凑性的器件仍面临巨大挑战。文章提出并设计了一种基于硅上锗中红外材料平台上的重建型光谱仪。该光谱仪采用级联法布里-珀罗腔滤波器作为核心结构，其中波导布拉格光栅被用作F-P腔的反射镜。通过特定筛选算法，选出63个构成光谱仪阵列。仿真结果表明，该光谱仪在4 μm附近实现了600 nm的工作带宽和0.4 nm的双峰分辨率，其带宽分辨率比高达1 500，且无需额外调谐机制。

关键词： 中红外波段；硅上锗；波导布拉格光栅；法布里-珀罗腔；重建型光谱仪
中图分类号： TN29　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0666－07

Mid-infrared Reconstructive Spectrometer on a Germanium-on-Silicon Platform

CUI Haoxiang, HOU Yatong, ZHONG Qize, ZHENG Shaonan, HU Ting
(**School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN**)

Abstract: The mid-infrared band (2.5～25 μm) includes both the characteristic frequency region (2.5～7.7 μm) and the molecular fingerprint region (7.7～16.7 μm), making it ideal for spectral detection and molecular sensing applications. Reconstructive spectrometers based on guided wave optics have demonstrated excellent performance in the near-infrared and visible ranges. However, achieving reconstructive spectrometers with large bandwidth, high resolution, and compactness in the mid-infrared remains a significant challenge. In this study, we developed an on-chip reconstructive spectrometer based on cascaded Fabry-Perot (F-P) cavity filters fabricated on a germanium-on-silicon mid-infrared platform. A waveguide Bragg grating serves as the reflector for each F-P cavity. The spectrometer integrates 63 cascaded F-P filters, selected through a specific algorithm. Simulation indicate a resolution of 0.4 nm over a 600 nm bandwidth near 4 μm, yielding a bandwidth-to-resolution ratio of 1 500 without any additional tuning.

Key words: mid-infrared; germanium-on-silicon, waveguide Bragg grating; Fabry-Perot cavity; reconstructive spectrometer

0　引言

中红外波段（2.5～25 μm）包含了特征频率区（2.5～7.7 μm）和分子指纹区（7.7～16.7 μm），是光谱检测和分子传感的理想波段[1-2]。光学光谱仪已被广泛用于材料分析、生物化学传感和天文研究等

收稿日期：2025－04－22.
基金项目：国家自然科学基金项目（62205193，62204149，U23A20356）；国家重点研发计划项目（2024YFA1209100）；红外探测技术国家重点实验室项目（IRDT-23-08）；上海市自然科学基金项目（24ZR1425000）；射频异构集成国家重点实验室项目（KF2024004）.
* **通信作者：**郑少南

领域[3-4]，能够对中红外目标分子进行定性、定量分析。传统中红外光谱分析常采用傅里叶变换红外（FTIR）光谱仪等台式设备，体积较大且成本较高，限制了其使用范围。近年来，微型光谱仪因其低成本、高便携性等优势受到广泛关注，为需要实时分析与高密度集成的红外光谱分析提供了极大助力[5-7]。

基于马赫-曾德尔干涉仪（MZI）的傅里叶变换光谱仪（FTS）是中红外波段光谱仪微型化的有效方法，并且基于热调或空间外差MZI阵列的FTS已经被提出[8-9]。然而，为实现较高分辨率和较大带宽，FTS通常还需要实现更大的相位差（OPD），这导致芯片面积显著增加或调谐时间大幅延长[10-11]。基于微机电系统（MEMS）的FTS利用静电驱动等调制方法，有效提高了调制效率和光谱仪性能[12-13]。近年来，重建型光谱仪因其能够突破分辨率与带宽的限制，同时保持紧凑的结构，受到广泛关注并取得了快速发展。该类光谱仪通过预校准的传输矩阵和探测器测量的功率值，利用光谱重建算法实现入射光谱的精确重建[14]。已经实现了基于MEMS的片上重建型光谱仪，在3.7～4.05 μm波段内实现了约3 nm的分辨率和N_2O气体的吸收光谱重建[15]。基于等离子体超材料滤波器的重建型光谱仪已经实现在1.5～19 μm超宽范围内的材料分析[16-18]。

法布里-珀罗（F-P）滤波器利用两层反射膜之间介电谐振腔的光学干涉效应，通过调整谐振腔厚度来改变透射光谱。目前，基于空间光的F-P滤波器用于重建型光谱仪[19-20]已经有报道。然而，基于空间光的F-P腔是通过修改腔体厚度实现对光谱的调节，随着重建所需滤波器数量的增加，制造工艺难度也将大幅上升，不适合高密度集成和大规模生产。基于光波导的F-P腔，如级联光子晶体纳米束谐振腔已经在近红外波段实现了约270 nm的工作带宽和0.5 nm的分辨率[21]。然而，用于中红外波段的，基于光波导F-P腔滤波器的重建型光谱仪研究还较少。

绝缘体上硅（SOI）平台因其具有的高折射率对比度和互补金属氧化物半导体兼容性，已经被广泛应用于片上光谱系统[14]。然而，由于SOI平台的埋氧层（BOX）对中红外光（4 μm以上）的强烈吸收，基于SOI平台的光子器件很难直接应用在4 μm以上的中红外波段[22-23]。蓝宝石可以达到最大5 μm波长的透明窗口，通过使用蓝宝石上硅（SOS）材料，光谱仪的工作波长可以进一步扩展[24]。此外，通过选择性地去除SOI材料的包层和埋氧层，基于悬空Si波导的光谱仪可以在5.5 μm波长下实现13 cm^{-1}的分辨率和120 cm^{-1}的自由光谱范围（FSR）[8]。相比硅基材料，锗基材料具有同样的大折射率、更宽的透明窗口[25]，被认为是开发长波中红外波段的理想平台之一。利用富锗的硅锗（SiGe）材料，已经实现了波长在7.7 μm和8.5 μm的FTS[26-27]。利用成熟的外延生长技术，可以在硅衬底上制备高质量的锗薄膜。利用硅锗材料之间的折射率差，硅上锗（GOS）波导将光限制在顶层的锗波导中传输，是制造中红外波段片上光谱仪的可行方案[28]。

波导布拉格光栅（WBG）能够在紧凑的面积下实现高效的相位扰动，同时有着较高的设计自由度。通过将WBG用作F-P腔的反射镜，本文在GOS材料平台上设计了一种基于级联F-P腔滤波器的中红外重建型光谱仪。利用特定的筛选算法，得到了由63个滤波器组成的光谱仪，并对光谱仪重建性能进行了仿真。仿真结果表明，该光谱仪在4 μm附近实现了0.4 nm的双峰分辨率和600 nm的工作带宽，在没有任何额外调谐的情况下表现出1 500的带宽分辨率比（BRR）。

1　光谱仪原理及设计

重建型光谱仪的核心部件是一组具有不同透射光谱$T(\lambda)$的滤波器。当带有未知光谱$S(\lambda)$的入射光通过这些滤波器时，第n个滤波器输出端的功率D_n在数学上可以写为：

$$D_n=\int T_n(\lambda)S(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{1}$$

式中，$n=1,2,\cdots,N$，N为滤波器的数量。根据实际的实验条件，实验处理的将是变量的离散值。上述连续变量$T(\lambda)$和$S(\lambda)$将被表示为矩阵形式$\boldsymbol{T}_{N\times M}$和$\boldsymbol{S}_{M\times 1}$，$M$为光谱的采样点数。因此，$N$个滤波器的响应可以改写为：

$$\boldsymbol{D}_{N\times 1}=\boldsymbol{T}_{N\times M}\boldsymbol{S}_{M\times 1} \tag{2}$$

式中，传输矩阵$\boldsymbol{T}_{N\times M}$可以通过预校准过程精确测量。显然，当$M=N$时，$\boldsymbol{S}_{M\times 1}$可以直接通过线性代数求解得到[29]。然而，通过设计合适的传输矩阵$\boldsymbol{T}_{N\times M}$，滤波器的数量可以远小于光谱采样点数，即$N\ll M$。在这种情况下，求解方程式（2）是一个经典的欠定线性代数问题，可以使用线性回归算法来解决。建立了一种基于$l2$范数的最小二乘优化算法，

在$D=TS$的条件下最小化$D-TS$的$l2$范数[30]：

$$\begin{aligned}&\text{minimize}\left\| D-TS \right\|_2,\\&\text{subject to } 0\leqslant S\leqslant 1,\ D=TS\end{aligned}\tag{3}$$

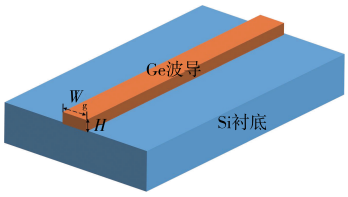
为获得更好的光谱重建效果，在算法中引入平滑函数来平滑重建结果，避免出现随机尖峰。通过引入权重系数为r_2的$B\times S$的$l2$范数作为平滑函数，方程式(3)可以改写为：

$$\begin{aligned}&\text{minimize}\left\| D-TS \right\|_2+r_2\left\| B\times S \right\|_2,\\&\text{subject to } 0\leqslant S\leqslant 1,\ D=TS\end{aligned}\tag{4}$$

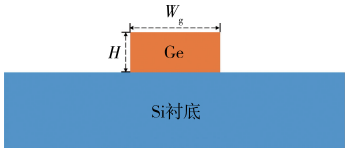
式中，$B_{(M-1)\times M}$是双对角矩阵，可以表示为[31]：

$$B=\begin{pmatrix}-1&1&0&\cdots&0&0&0\\0&-1&1&\cdots&0&0&0\\\vdots&\vdots&\vdots&\ddots&\vdots&\vdots&\vdots\\0&0&0&\cdots&-1&1&0\\0&0&0&\cdots&0&-1&1\end{pmatrix}\tag{5}$$

具有不同光谱响应的滤波器阵列对于重建型光谱仪的性能至关重要。所设计的滤波器基于GOS条形波导，以满足中红外波段(3.7～4.3 μm)的工作需要。GOS波导的3D示意图和截面图如图1所示。



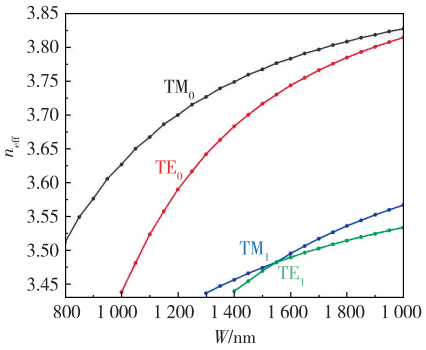
(a) 3D示意图



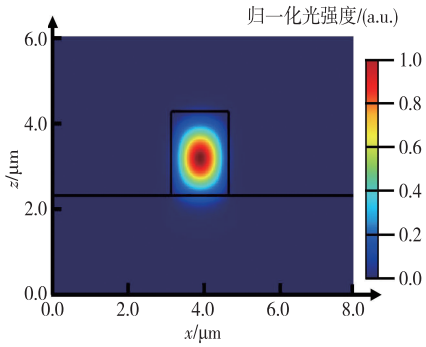
(b) 截面图

图1 GOS波导的结构示意图

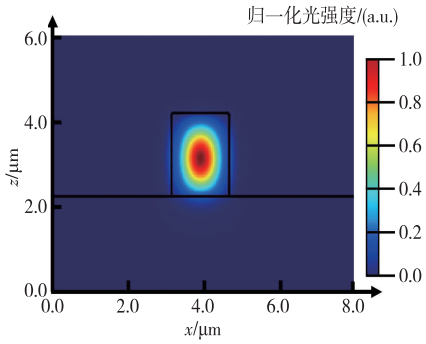
使用有限差分本征模(FDE)法计算了光波导截面的本征模式及模式有效折射率。图2(a)展示了不同波导宽度下波导的有效折射率，设定波长为4 μm，宽度变化间隔为50 nm。随着波导宽度增大，模式的有效折射率随之增大，同时波导中可容纳的模式数量不断增多。高阶模TM_1和TE_1分别在波导宽度1.3 μm和1.4 μm时开始出现。考虑到制造过程中较大的波导尺寸有着更高的工艺误差容忍度，能够降低因刻蚀不均导致的模式畸变，最终选取1.5 μm作为实验的波导宽度。图2(b)和(c)展示了在1.5 μm波导宽度下TM_0和TE_0模式的模场分布图。实验选用TM_0模式作为滤波器和光谱仪的工作模式。



(a) 波导模式有效折射率随波导宽度变化



(b) TM_0模式的模场分布



(c) TE_0模式的模场分布

图2 确定波导宽度及工作模式

为获得具有不同透射谱的级联F-P腔滤波器，首先对单个F-P腔进行仿真。如图3所示，研究了基于WBG的F-P腔的多种结构参数，包括周期Λ、光栅周期数N_g和谐振腔腔长L_p，以丰富透射谱线的多样性。周期Λ在490～560 nm范围内变化，占空比固定为0.5。为保持滤波器整体的高透射率，光栅周期数N_g被设置为在10～30的范围内变化。腔长L_p在100～200倍Λ的范围内变化。之后，利用传输矩阵法，以随机组合级联的方式计算得到了级联F-P腔的透射谱，每个滤波器由四个不同的F-P腔级联组成。

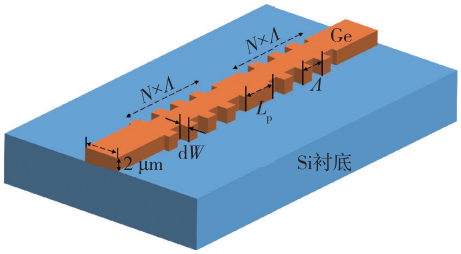
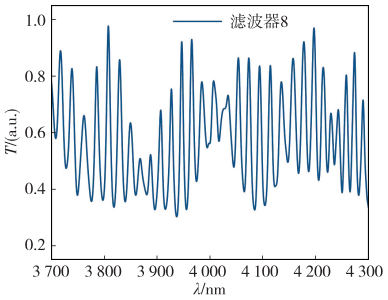


图 3　具有不同结构参数的 F-P 腔示意图

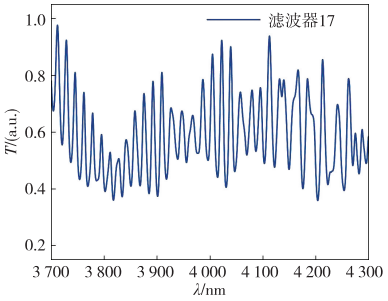
为实现光谱仪的高分辨率，单个滤波器的透射谱应该是锐利和随机的。同时，每个滤波器的透射谱需要实现与其他滤波器的低相关性，以便用少量滤波器重建未知光谱[32]。实验采用特定的筛选算法对计算所得的滤波器进行选择。Pearson 相关系数是衡量两个变量线性相关性的常用指标[33-34]。对于两个变量 X 和 Y，Pearson 相关系数 $\rho_{X,Y}$ 的计算公式为：

$$\rho_{X,Y}=\frac{\mathrm{cov}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y}=\frac{E\left[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)\right]}{\sigma_X\sigma_Y} \tag{6}$$

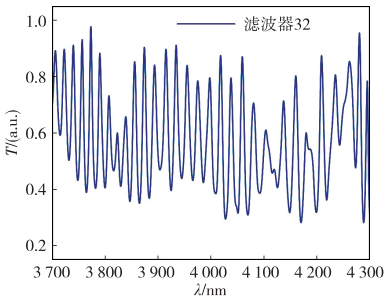
式中，$\mathrm{cov}(X,Y)$ 是 X 和 Y 的协方差，σ_X 和 σ_Y 分别表示 X 和 Y 的标准差。在筛选过程中，计算了任意两个滤波器透射谱之间的相关系数，以确保输出的滤波器组中，任意一对滤波器透射谱的相关系数均低于设定阈值 R，同时将平均相关系数降至最低。当阈值 R 设置为 0.31 时，筛选算法将最终输出一个包含 63 个滤波器的滤波器组，部分滤波器透射谱如图 4 所示。该滤波器组透射谱相关系数的最大值为 0.309 6，平均值为 0.055 9。



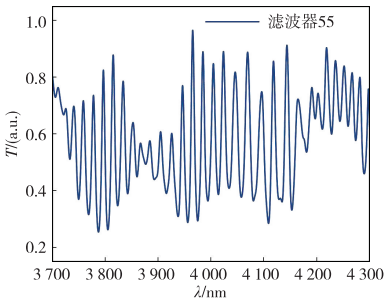
（a）滤波器 8 的透射光谱



（b）滤波器 17 的透射光谱



（c）滤波器 32 的透射光谱



（d）滤波器 55 的透射光谱

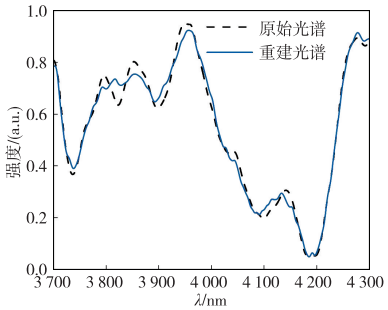
图 4　筛选得到的部分滤波器的透射光谱

2　结果与讨论

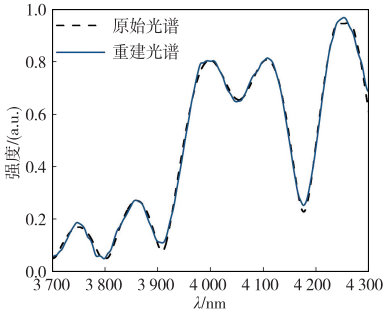
为测试光谱仪的重建性能，使用了不同类型的光谱（宽谱光，窄带单峰和窄带双峰）作为入射光谱。用于光谱重建的功率矩阵 $\boldsymbol{D}_{N\times1}$ 是根据公式（2），利用入射光谱和传输矩阵直接计算得到的。为评估光谱重建的准确性，重建误差定义为：

$$\varepsilon=\frac{\|S-S_0\|_2}{\|S_0\|_2}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M}(S-S_0)^2}{\sum_{i=1}^{M}S_0^{\,2}}} \tag{7}$$

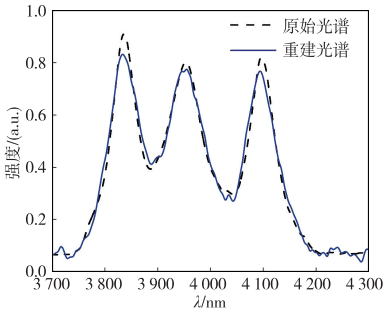
如图 5 展示了光谱仪对不同宽谱入射光的重建效果，重建误差分别为 0.047 2，0.025 4，0.066 7，0.053 3。可以看出，所设计的光谱仪对不同类型的宽谱光均获得较好的重建效果，重建误差均低于 0.1。



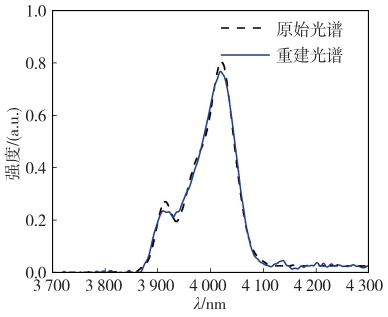
（a）光谱仪对宽谱光 1 的重建效果



（b）光谱仪对宽谱光2的重建效果



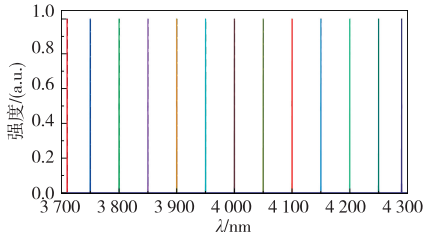
（c）光谱仪对宽谱光3的重建效果



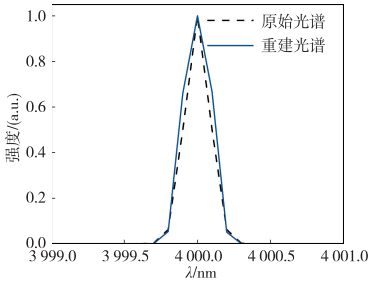
（d）光谱仪对宽谱光4的重建效果

图5 光谱仪对不同宽谱光的重建效果

为表征所设计的光谱仪的分辨率，用生成的指定半高全宽（FWHM）的高斯光谱进行仿真验证。将中心波长位于3.7～4.3 μm之间，间隔50 nm，FWHM为0.2 nm的窄带光谱作为入射光谱。图6（a）展示了窄带光谱的重建结果图，图6（b）为中心波长在4 μm处的放大图。如图所示，重构光谱与原始光谱始终较为吻合，这表明了所设计的光谱仪在整个目标光谱范围对窄带光谱都能较好地重构，重建的半峰宽均在0.26 nm以下。



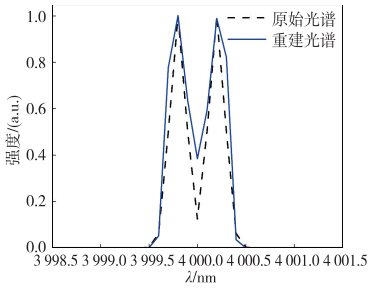
（a）光谱仪对不同中心波长处窄带光谱的重建



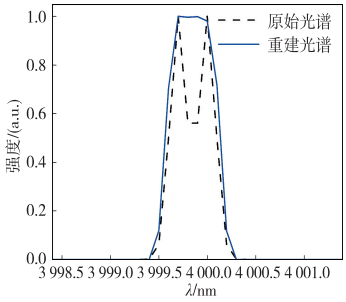
（b）中心波长在4 000 nm处的单峰重建

图6 光谱仪对窄带单峰的重建效果

此外，还基于瑞利准则，使用双峰光谱来表征光谱仪的分辨率。图7展示了在4 μm附近间距分别为0.4 nm和0.3 nm的双峰重建效果，单个峰的FWHM被设定为0.2 nm。验证了所设计的光谱仪分辨率约为0.4 nm。



（a）光谱仪对间距为0.4 nm双峰的重建效果



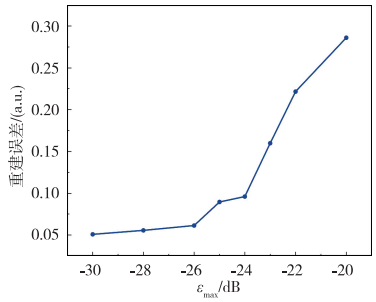
（b）光谱仪对间距为0.3 nm双峰的重建效果

图7 光谱仪对不同间距双峰的重建效果

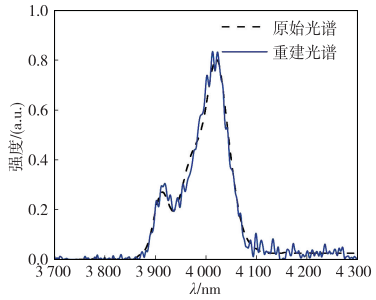
为分析实验过程中探测器噪声对光谱仪重建效果的影响，人为在功率矩阵$\boldsymbol{D}_{N\times1}$引入了额外的随机噪声，以表征光谱仪的噪声容忍度。带有随机噪声的输出功率可以表示为[35]：

$$D_n' = D_n \times \left(1 + \varepsilon_{\text{power}}\right) \tag{8}$$

式中，D_n'是带有随机噪声时第n个通道的输出功率，$\varepsilon_{\text{power}}$是随机的探测器噪声。$|\varepsilon_{\text{power}}|$的最大值$\varepsilon_{\max}$可以表示随机噪声的强度。如图8（a）所示，当噪声强度增加时，误差会相应增加。只要噪声强度低于−24 dB，重构误差就保持在0.1以下，这可以认为是光谱仪的最大噪声容忍度。图8（b）展示了当误差强度为−24 dB时的光谱重建。



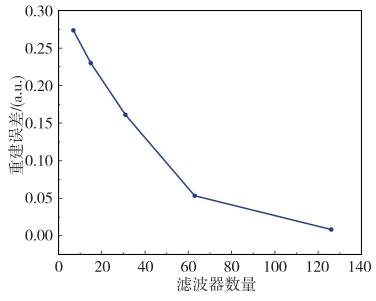
（a）重建误差与噪声强度的关系



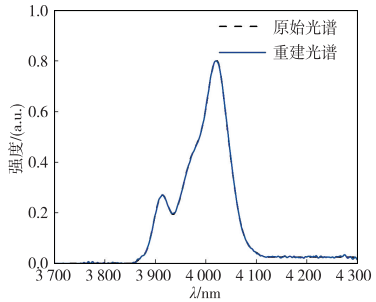
（b）当误差强度为－24 dB时的宽谱光重建

图8　光谱仪噪声容忍度分析

理论上讲，所设计的光谱仪的性能可以通过增加滤波器的数量来提高。图9(a)展示了不同滤波器数量对同一宽谱光的重建误差。其中，不同的滤波器数量是利用同一种筛选算法，设置不同的阈值得到的。图9(b)展示了当滤波器数量为126时对宽谱光的重建效果。然而，过多的滤波器通道数会导致校准和测量时间的增加，同时可能影响信噪比。



（a）重建误差随滤波器数量的变化



（b）当滤波器数量为126时对宽谱光的重建效果

图9　滤波器数量对光谱仪重建效果的影响

此外，利用Ge材料有着较大的热光系数和导热系数，通过对光谱仪滤波器施加热光移相器，可以实现更少的物理通道下更多的采样通道数，有助于提升光谱仪的性能并减少占地面积[33-36]。除了硬件的技术进步外，先进的光谱重建算法如压缩感知和深度学习算法的发展也助于提高重建型光谱仪的性能[37-38]。

3　结论

在GOS材料平台上设计了一种基于级联F-P腔滤波器的中红外重建型光谱仪，其中WBG被用作F-P腔的反射镜。该光谱仪由63个经特定筛选算法选出的级联F-P腔构成。仿真结果表明，该光谱仪在4 μm附近实现了0.4 nm的双峰分辨率和600 nm的工作带宽，在没有任何额外调谐的情况下表现出1 500的BRR。

参考文献：

[1] Jung G, Hong S, Jeong Y, et al. Highly selective and low-power carbon monoxide gas sensor based on the chain reaction of oxygen and carbon monoxide to WO_3[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(15): 17950-17958.

[2] Liu H, Wu B, Chen C, et al. D-shaped tellurite photonic crystal fiber hydrogen and methane sensor based on four-wave mixing with SPR effect[J]. Photonic Sensors, 2022, 13(1): 230121.

[3] Bacon C P, Mattley Y, DeFrece R. Miniature spectroscopic instrumentation: applications to biology and chemistry [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(1): 1-16.

[4] Ozbek N, Akman S. Determination of fluorine in Turkish wines by molecular absorbance of CaF using a high resolution continuum source atomic absorption spectrometer[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 61(1): 112-116.

[5] Crocombe R A. Portable spectroscopy [J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72(12): 1701-1751.

[6] McGonigle A, Wilkes T, Pering T, et al. Smartphone spectrometers[J]. Sensors, 2018, 18(1): 223.

[7] Edwards P, Zhang C, Zhang B, et al. Smartphone based optical spectrometer for diffusive reflectance spectroscopic measurement of hemoglobin[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 12224.

[8] Duong Dinh T T, Le Roux X, Koompai N, et al. Mid-infrared Fourier-transform spectrometer based on metamaterial lateral cladding suspended silicon waveguides [J]. Optics Letters, 2022, 47(4): 810-813.

[9] Wei C, Du H, Yan X, et al. Mid-infrared SOI waveguide thermo-optic Fourier-transform spectrometer[J]. Proc. SPIE, 2023, 12426: 124260E.

[10] Shao Q, Ma X, Li M, et al. Thermo-tuning Fourier transform spectrometer based on SU-8 waveguide [J]. Polymers, 2025, 17(3): 261.

[11] Chen H, Zhang H, Zhou J, et al. High-performance and wavelength-transplantable on-chip Fourier transform spectrometer using MEMS in-plane reconfiguration [J]. Photonics Research, 2024, 12(8): 1730.

[12] Ghoname A O, Sabry Y M, Anwar M, et al. Ultra wide band MIR MEMS FTIR spectrometer [J]. Proc. SPIE, 2019, 10931: 109310Z.

[13] Salem A M, Sabry Y M, Fathy A, et al. Single MEMS chip enabling dual spectral-range infrared micro-spectrometer with optimal detectors [J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(5): 2001013.

[14] Yang Z, Albrow-Owen T, Cai W, et al. Miniaturization of optical spectrometers [J]. Science, 2021, 371 (6528): eabe0722.

[15] Qiao Q, Liu X, Ren Z, et al. MEMS-enabled on-chip computational mid-infrared spectrometer using silicon photonics[J]. ACS Photonics, 2022, 9(7): 2367-2377.

[16] Craig B, Shrestha V R, Meng J, et al. Experimental demonstration of infrared spectral reconstruction using plasmonic metasurfaces[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4481-4484.

[17] Jang W Y, Ku Z, Jeon J, et al. Experimental demonstration of adaptive infrared multispectral imaging using plasmonic filter array[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 34876.

[18] Lee H S, Hwang G W, Seong T Y, et al. Design of mid-infrared filter array based on plasmonic metal nanodiscs array and its application to on-chip spectrometer [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 12218.

[19] Huang E, Ma Q, Liu Z. Etalon array reconstructive spectrometry[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40693.

[20] Wen J, Hao L, Gao C, et al. Deep learning-based miniaturized all-dielectric ultracompact film spectrometer[J]. ACS Photonics, 2023, 10(1): 225-233.

[21] Yao C, Xu K, Lin T, et al. Benchmarking reconstructive spectrometer with multiresonant cavities[J]. ACS Photonics, 2024, 11(9): 3730-3740.

[22] 郭荣翔, 高浩然, 程振洲, 等. 中红外锗基集成光电子研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1901002.
Guo Rongxiang, Gao Haoran, Cheng Zhenzhou, et al. Advances on mid-infrared germanium integrated photonics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1901002.

[23] Nedeljkovic M, Velasco A V, Khokhar A Z, et al. Mid-infrared silicon-on-insulator Fourier-transform spectrometer chip[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 28(4): 528-531.

[24] Heidari E, Xu X, Chung C J, et al. On-chip Fourier transform spectrometer on silicon-on-sapphire [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2883-2886.

[25] Zhang L, Agarwal A M, Kimerling L C, et al. Nonlinear Group Ⅳ photonics based on silicon and germanium: from near-infrared to mid-infrared[J]. Nanophotonics, 2014, 3(4/5): 247-268.

[26] Liu Q, Ramirez J M, Vakarin V, et al. Integrated broadband dual-polarization Ge-rich SiGe mid-infrared Fourier-transform spectrometer[J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 5021-5024.

[27] Montesinos-Ballester M, Liu Q, Vakarin V, et al. On-chip Fourier-transform spectrometer based on spatial heterodyning tuned by thermo-optic effect[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 14633.

[28] Li W, Anantha P, Bao S, et al. Germanium-on-silicon nitride waveguides for mid-infrared integrated photonics[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(24): 241101.

[29] Xia Z, Eftekhar A A, Soltani M, et al. High resolution on-chip spectroscopy based on miniaturized microdonut resonators [J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12356-12364.

[30] Boyd S, Vandenberghe L. Convex Optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

[31] Chen X, Gan X, Zhu Y, et al. On-chip micro-ring resonator array spectrum detection system based on convex optimization algorithm[J]. Nanophotonics, 2023, 12(4): 715-724.

[32] Li A, Fainman Y. On-chip spectrometers using stratified waveguide filters[J]. Nature Communications, 2021, 12: 2704.

[33] Chen C, Li X, Yang G, et al. Computational hyperspectral devices based on quasi-random metasurface supercells [J]. Nanoscale, 2023, 15(19): 8854-8862.

[34] Kozak D A, Tyndall N F, Pruessner M W, et al. Germanium-on-silicon waveguides for long-wave integrated photonics: ring resonance and thermo-optics [J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15443-15451.

[35] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer [J]. Nature, 2015, 523(7558): 67-70.

[36] Chang X, Zhang H, Ma Z, et al. Mid-infrared Ge-based thermo-optic phase shifters with an improved figure of merit [J]. Optical Materials Express, 2022, 12(3): 1055.

[37] Hu C, Zhao X, Qiu Y, et al. A computational microspectrometer based on binary-image-generated freeform metasurfaces for spectral sensing [J]. IEEE Photonics Journal, 2024, 16(1): 4600105.

[38] Zhang J, Zhu X, Bao J. Solver-informed neural networks for spectrum reconstruction of colloidal quantum dot spectrometers [J]. Optics Express, 2020, 28(22): 33656-33672.

作者简介：

崔浩祥(1999—),男,硕士研究生,主要从事片上重建型光谱仪研究;

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。