



DOI: 10.12086/oe.2021.200183

基于散斑检测的微型计算光谱仪研究进展

郑麒麟, 文 龙, 陈 沁*

暨南大学纳米光子学研究院, 广东 广州 510632

摘要: 光谱分析技术具有快速、准确和绿色检测的特点, 在科学研究、信息、生物医药、食药检测、农业、环境和安防等领域有广泛而且重要的应用。然而现有光谱技术与检测设备通常较为庞大复杂, 难以适合现场快检、轻载荷平台等便携式应用场景。近年来, 微型光谱检测技术和设备受到广泛关注并得到迅速发展, 具有尺寸、重量、功耗等方面的显著优势, 尤其是基于散斑检测的计算光谱分析技术, 可以通过记录分析散射元件对被测光形成的散斑图获得高精度的光谱信息。本文将介绍相关技术原理和技术发展现状, 分析现有技术性能和优缺点, 讨论并总结未来发展方向和应用前景。

关键词: 光谱; 散斑; 微型光谱仪; 压缩感知

中图分类号: O433

文献标志码: A

郑麒麟, 文龙, 陈沁. 基于散斑检测的微型计算光谱仪研究进展[J]. 光电工程, 2021, 48(3): 200183

Zheng Q L, Wen L, Chen Q. Research progress of computational microspectrometer based on speckle inspection[J].

Opto-Electron Eng, 2021, 48(3): 200183

Research progress of computational microspectrometer based on speckle inspection

Zheng Qilin, Wen Long, Chen Qin*

Institute of Nanophotonics, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract: Fast, accurate and nondestructive spectral analysis technique is important and widely used in the fields of scientific research, information, biomedical, pharmaceutical detection, agriculture, environment, and security. However, the existing spectroscopic analysis equipments are usually bulky and complex, which are difficult to adapt to portable application scenarios such as on-site rapid detection, light-load platform, etc. In recent years, miniature spectroscopic detection technology and equipment have received extensive attention, and have been rapidly developed, with significant advantages in size, weight, and power consumption. In particular, the computational spectral analysis technology based on the speckle detection can obtain high-precision spectral information by recording and analyzing the speckle pattern formed by the scattering element on the measured light. This paper will first introduce the related technical principles and technological developments, then analyze the existing techniques including the advantages and disadvantages, and finally discuss and summarize the future development direction and application prospects.

Keywords: spectrum; speckle; microspectrometer; compressive sensing

收稿日期: 2020-05-23; 收到修改稿日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2203402); 国家自然科学基金资助项目(11774383, 11774099, 11874029); 广东省国际合作科技项目(2018A050506039); 广东省杰出青年基金资助项目(2020B1515020037); 广东省珠江人才计划项目(2019QN01X120)

作者简介: 郑麒麟(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事便携式光电传感检测方面的研究。E-mail: qilinzheng@stu2018.jnu.edu.cn

通信作者: 陈沁(1979-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学传感检测技术的研究。E-mail: chenqin2018@jnu.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

1 引言

光是一种电磁波,具有丰富的频率信息。不同物质根据其化学成分和相对含量的不同,呈现出不同的光谱特征。光谱分析技术通过发射、吸收和散射光谱等方法实现准确迅速的非接触式传感检测,因此在生物化学传感和材料分析等方面具有显著优势,广泛应用于科学研究、生物医药、食药检测、农业、环境和安防等领域^[1]。光谱分析的设备,按工作波段,有紫外-可见光谱仪、红外光谱仪、太赫兹光谱仪等^[2-4];按工作原理,有色散型光谱仪和傅里叶变换型光谱仪等^[5-6]。这些光谱仪都包括光束控制单元、频谱分光单元或干涉单元、光电探测单元等,因此常规的光谱分析设备体积大、质量重、成本高、操作复杂,基本上集中在实验室环境使用,难以满足现场快检、轻载荷平台和可穿戴等便携式应用场景的技术需求^[7-9]。

微纳加工技术的快速发展和新型微纳光电器件的不断涌现,促使光谱分析设备在小型化的道路上稳步向前,从小型化到微型化到芯片化,体现出体积、重量、集成性、成本等优势,尤其与云端技术和大数据技术的结合,有望改变现有光谱分析技术受限于使用环境的瓶颈问题。近年来,学术界已经展示了光谱分辨率小于 1 nm 的毫米级尺寸的微型光谱仪,技术途径包括量子点滤波器阵列^[10]、超材料滤波器阵列^[11-12]、阵列波导光栅^[13]、无序散射结构^[14]、单根组分渐变的纳米线^[15]等。产业界如滨松、IMEC 等推出了反射光栅微型光谱仪、多层膜滤波器阵列光谱成像芯片等多种商品^[16-17]。因此,及时梳理技术发展现状和走势,讨论技术优缺点和未来发展方向,对于此新兴领域具有积极作用^[18]。目前已有不少优秀的综述文献^[19-21],侧重点各有不同。本文将聚焦基于散斑检测的色散型微型光谱分析技术^[22-27],相关设备同时拥有小尺寸和高分辨率的优势,而且由于散射体的制备相比于各种严格设计的微纳结构或者组分不同的材料而言更为简单和低成本,因此是一类极具应用潜力的微型光谱分析技术。本文首先介绍各类色散型微型光谱分析技术,重点说明基于散斑检测的微型计算光谱技术原理,然后梳理此技术的发展历程和现状,分析讨论相关技术特点,最后总结现有问题和未来的发展重点。

2 色散型微型光谱分析技术分类与工作原理

常见的色散型微型光谱分析技术就是利用微型色

散元件将不同波长的光进行空间上的分离,然后由探测器分别读出不同波长的光强度,最后组合成完整的光谱^[28]。从技术原理上看,主要包括刻蚀衍射光栅^[29]、阵列波导光栅^[13]、滤波器阵列^[30]、扫描光栅^[31]等,其中前三类属于快照式的光谱分析,需要探测器阵列,最后一类属于扫描式的,依次在单个探测器上读出不同波长的信号。无论哪种技术,其核心在于如何在有限空间内进行有效的分光,其色散的空域和频域效率也决定了系统的光谱分辨率。一般而言,一个测量波长范围为 $\Delta\lambda$, 测量通道数为 N (如探测器单元数)的光谱仪,其最高光谱分辨率为 $\Delta\lambda/N$,但借助于压缩感知算法,分辨率可以进一步提高^[32]。对于前述各类光栅型光谱仪而言,如果系统光路的光程大小不足以将不同波长的光衍射到相应的探测器单元,那么分辨率就相应地下降,因此高分辨率的光谱仪往往需要大阵列探测器和大尺寸密集光栅等。而对于基于滤波器阵列的光谱仪而言,就需要大阵列和窄带的透射滤波器。这些技术要求不仅对各器件设计和加工技术本身提出了挑战,还显著增加了系统尺寸和成本,因此微型光谱仪一直面临着性能和便携性之间的矛盾问题。IMEC 最近推出的芯片型光谱仪,基于像元级集成的多层膜滤波器技术,虽然实现了极致的小型化,光谱分辨率也满足一般需求,但不同透射波长的滤波器单元需要不同的图形化和薄膜沉积工艺步骤依次制备,大幅增加了加工难度和成本,也限制了单元尺寸的进一步缩小,从而限制了阵列规模^[16]。

总体来看,上述技术方案中都存在频域和时空域一对一的映射关系,通过把不同空间位置或时间序列上记录光功率组合起来得到光谱。实际上这种一一映射关系在光谱检测中并不是必须的,原则上只需要获得一系列与波长相关且一一对应的可探测物理量,就能实现光谱信息的提取。如类似光栅对不同波长光衍射的过程,可以构建一个散射元件将不同波长的光按照不同的比例传输到不同的探测器单元;也可以类似滤波器阵列的滤波过程,构建一系列滤波器按照不同的比例将不同波长的光透射到不同的探测器单元,这里的波长相关可探测物理量都是探测器阵列的一组光电强度信号。计算成像和压缩感知等技术的迅速发展为解析这一映射关系提供了有效的工具^[19, 33-35]。如图 1 所示,以散射元件体系为例,入射光中的不同频率分量被散射后沿着不同路径传输,并在探测器阵列上形成了与波长相关的散斑分布,因此一个波长对应于探测器阵列上一组特定的信号强度。利用一系列单色

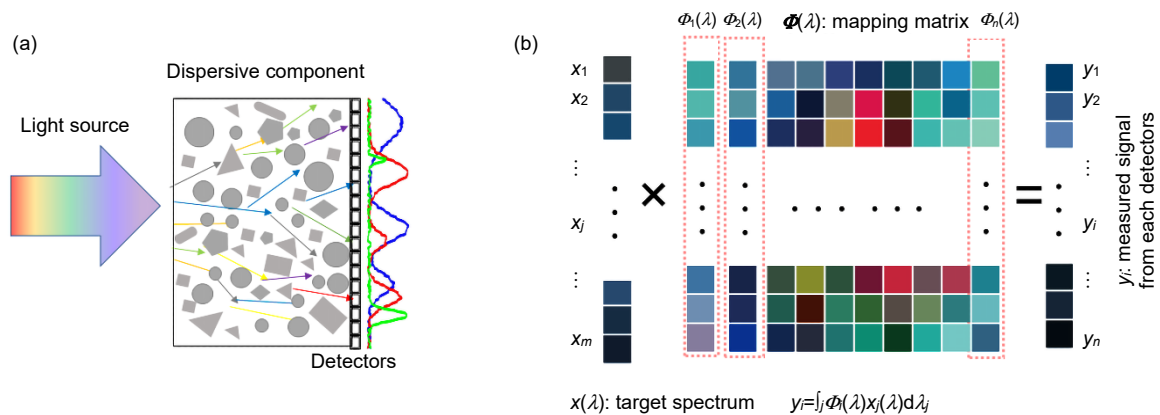


图 1 散斑检测的微型计算光谱仪原理图。(a) 入射光经过散射元件后在探测器阵列上形成散斑分布的示意图；(b) 基于映射矩阵的待测光谱重构原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-computing spectrometer for speckle detection. (a) Schematic of speckle pattern distribution on the detector array after the incident light passing through the dispersive component; (b) Schematic diagram of spectral reconstruction measured based on mapping matrix

光 $\lambda(i)$ 预先对色散元件进行定标, 获得其分别在 j 个探测器上的强度信号 $\Phi(i, j)$, 建立波长与探测器响应之间的映射关系, 一旦定标后此微型光谱仪的映射矩阵 Φ 就固定了。在进行光谱检测时, 入射光 X 通过色散元件后同样在探测器阵列上产生一系列响应信号 $Y(j)$, 因为 X 和 Y 之间同样存在由映射矩阵 Φ 决定的关系, 因此可以通过矩阵求逆获得未知光谱 X :

$$X = \Phi(i, j)^{-1} Y \quad (1)$$

一般情况下, 计算重构出的被测光谱 $X(m)$ 的光谱分辨率不超过定标的光谱分辨率 $\delta\lambda$ 。实际中有很多算法可以有效地解决这个数学问题, 尤其是压缩感知技术, 它具有从少量稀疏信息中恢复完整信息的特点, 因此有望通过少量的探测器单元重构出完整的高精度光谱。对于滤波器阵列体系, 类似可以通过少量的定标过的滤波器单元重构出完整光谱^[13,18,23,30,36-41]。

在基于散斑检测的光谱测试实验中, 通常利用单色仪或可调谐激光器作为定标光源, 用 CCD 或 CMOS 相机记录散斑的空间分布, 并建立频域—空域的映射矩阵^[42]。这种技术的光谱分辨率主要由所用散射元件在不同波长光照下产生的散斑的相关度决定。一定波长差的情况下, 对应散斑的对比度越大, 测试系统的光谱分辨能力越好。定义波长差为 $\delta\lambda$ 的两束单色光形成的散斑对应的谱相关函数如下^[43]:

$$C(\Delta\lambda, x) = \frac{\langle I(\lambda, x) I(\lambda + \Delta\lambda, x) \rangle}{\langle I(\lambda, x) \rangle \langle I(\lambda + \Delta\lambda, x) \rangle} - 1 \quad (2)$$

其中: $I(\lambda, x)$ 是波长为 λ 的入射光的散斑在 x 位置的光强, $\langle \dots \rangle$ 代表对波长的平均化。定义 $C(\Delta\lambda, x)$ 函数

的半高宽为 $\delta\lambda$, 这样就可以近似认为波长改变 $\delta\lambda$ 后散斑基本不相关, 即 $C(\Delta\lambda = \delta\lambda) \approx 0$, 即对应系统的光谱分辨率。

对比前述光栅型和滤波器阵列型微型光谱仪, 这种基于散斑检测的计算光谱技术具有如下优点: 1) 更小体积、更高精度、更大工作波长范围。光散射过程具有比衍射过程有更大的有效光程, 因此在小尺寸内可以获得更大的相位延迟, 即可实现更高的分辨率, 同时这个光程增强效应不同于谐振腔而是一个宽带效应。2) 光谱测试范围可以不连续。相比于光栅的空间连续分光, 这种散斑检测机制中定标波段决定了后续测试可以准确重构的光谱范围, 因此可以灵活选择工作波段, 更有效利用探测器资源。同样, 对于一个完整光谱范围定标的同一个色散元件, 通过选配不同的探测器, 可以灵活地工作在可见和红外等不同应用场景。3) 低成本。这里的色散元件可以是一块磨砂毛玻璃、化学合成或退火形成的微纳颗粒等, 利用计算资源替代了昂贵的硬件需求, 因此非常适合低成本便携式光谱仪的需求。需要注意的是, 这种散斑检测的光谱分析技术不同于编码孔径光谱仪^[44], 后者依然是光栅型光谱仪的技术原理, 只是利用占空比更高的编码孔径来代替狭缝, 从而增大入射光通量。

根据产生散斑的光学架构差异, 可以把基于散斑检测的光谱分析技术分为波导型和空间型两大类。波导型包括多模光纤^[45]、多模波导^[46]和光子晶体^[47]等结构, 其中多模光纤/波导支持多个传输模式, 每个模式具有不同的相速度, 传输过程中不同模式积累了不同

的相位,并在输出端通过干涉形成一定光强度分布,不同波长对应的模式分布不同,相位延迟不同,造成光强度分布就不同,从而形成了波长相关的散斑^[45,48]。不依赖波导结构中的模式干涉,平面内的散射体同样可以形成与波长相关的面内光场分布^[46-47]。空间型包括纳米颗粒^[2]、微米孔^[49]和磨砂玻璃^[14]等无序微纳结构,这些结构对不同波长入射光的散射也会形成散斑分布。

3 基于散斑检测的微型计算光谱仪的发展现状

散斑现象曾经被用于光源线宽^[50-51]、应力^[52-53]、表面粗糙度^[54]等物理量的测量。实际上散斑包括更丰富的频谱信息,无论是平面内传输的光还是自由空间传输的光都能够形成与波长相关的稳定光场分布,即散斑提供了一种频域-空域的映射关系。基于这种映射关系,近年来被应用到集成式的光谱分析技术中^[19,27]。下面我们按波导型和空间型两种架构分别介绍基于散斑检测的微型光谱分析技术的发展现状。

3.1 波导型微型光谱仪

波导中的散斑源于波导中的模式干涉。片上的光波导和光纤都属于波导结构,横向尺寸越大的波导支持越多的横模,其相互间的干涉就产生了横截面内特定的模场分布^[34-55]。此外,平面无序纳米结构对面内传输的光也产生散射,不同波长的光经过不同的散射路径在面内形成特定的强度分布,并在面内形成稳定的光场分布^[47]。这些散斑分布可以用片上集成的探测器阵列或者片外的相机记录下来,用于光谱的重构。

3.1.1 基于多模光纤的微型光谱仪

本节介绍的微型光纤光谱仪不同于海洋光学等公司的光纤光谱仪产品,这些商品中的光纤仅作为导光介质;而在本节介绍的基于散斑检测的微型光纤光谱仪中光纤不仅是用于传输光,还通过光纤内模式干涉产生散斑,作为替代光栅的色散元件。Cao 等人用 5 m 长的多模光纤在 1.5 μm 波长附近展示了 5 nm 波长范围内 0.03 nm 的光谱分辨率,信噪比高达 1000^[45]。他们采用的芯径 105 μm 、数值孔径 0.22 的多模光纤,这种光纤在 1.5 μm 波长附近可以支持高达 1000 个传输模式。不同的模式具有不同的相速度,因此输出端的散斑可以看作是这些具有不同延迟相位的模式分布的叠加。固定传输距离即光纤长度的情况下,不同波长的光必然导致不同的模式间相位差,从而改变输出端

的散斑分布。如图 2(a)所示,波长差小于 0.1 nm 的两束单色光产生了不同的散斑,而且光纤越长散斑的相关度越低,光谱分辨率就越高,其中 5 m 长的多模光纤对应的散斑自相关函数半高宽为 0.021 nm,因此分辨出间距 0.03 nm 的两条谱线。他们随后采用 20 m 和 100 m 长度的多模光纤分别成功分辨了波长间距 8 pm^[22]和 1 pm^[56]的激光谱线,这个性能指标已经接近甚至超过了当前的光栅光谱仪^[57]。为了提高系统的集成度,Cao 等人通过将前述多模光纤色散元件与光频梳光源集成,实现了全光纤系统(探测器外置),并利用 100 m 长的多模光纤在 1.5 μm 波段展示了 7 nm 工作波长范围内 1 pm 的光谱分辨率^[58]。除了光谱分辨率,工作波长范围也是光谱仪的一个重要指标,前述系统的工作波长范围都非常小(<10 nm),应用局限性较大。Cao 等人用 4 cm 的多模光纤在 400 nm~750 nm 波长范围内实现了 1 nm 的光谱分辨率^[56]。虽然工作波长范围增大,但光谱分辨率变差。可以看到,这种基于散斑检测的微型光谱仪体系存在光谱分辨率和工作波长带宽这两个指标间的矛盾问题。从物理上看,光谱分辨率主要由散射光路的纵向光程决定,而工作波长带宽主要由散射光路的横向尺寸决定(即模式容量)。增加光纤长度可以提高光谱分辨率,但同时增加了系统的尺寸和稳定性。利用更大截面尺寸的多模光纤原则上可以获得更多模式,即更多的空间通道数,但不同模式的散斑对比度会随着模式数的增加而下降,而且大的芯径会造成光功率密度的下降,导致光谱分辨率会受限於信噪比^[51]。

为了同时获得高光谱分辨率和大工作波长范围,Cao 等人进一步利用波分复用技术将一个宽带入射光以不同波段分到多根 2 m 长的多模光纤,如图 2(b)所示,相机同时记录了不同波段对应的所有多模光纤的散斑,这样就保证在每个散斑图样包括的频谱通道数不变(即对比度不变)的情况下增加频谱总通道数,从而同时获得高光谱分辨率和更大的工作波长范围,最终实现了 1520 nm~1620 nm 波长范围内高达 0.03 nm 的光谱分辨率^[48]。不同于 Cao 等人的波分(分波段)加空分(多个色散元件)的技术方案,Li 等人提出空分(多芯光纤)加时分(时序耦合)的技术方案^[59]。如图 2(c)所示,在输入端利用光开关阵列将入射光依次耦合到多芯光纤(7 芯,芯径 8.4 μm ,芯间距 42 μm)的不同纤芯中,并与多模光纤(芯径 105 μm ,长度 5 m,NA=0.22)耦合,由于不同输入光纤的位置引起不同的散斑,因此在保证原有散斑对比度的情况下增加了空间通道

数,从而同时获得高光谱分辨率和更大的工作波长范围,最终实现了 1530 nm~1560 nm 波长范围内 0.02 nm 的光谱分辨率。这个结果也进一步说明这种基于散斑测试的微型光谱仪在利用单模光纤作为前端输入的情况下具有优异的鲁棒性。需要注意的是,虽然不同纤芯输入提供了更多的独立散斑分布,但因为不同波段对应的散斑在同一空间位置呈现,对比度依然会受到一定影响,可以看到其散斑的谱相关函数并没有随着波长的偏移单调减小,这将最终影响其光谱分辨率。不管是哪种复用方式,其性能提升的同时都增加了系统复杂性,并降低了便携性和实时性。Englund 等人

采用了一种不同的散斑测量方法^[60],如图 2(d)所示,他们采用非绝热式拉锥的 5 mm 长的多模光纤,从侧面拍摄拉锥光纤的泄漏模形成的散斑,分别展示了 634.8 nm~639.4 nm 和 1500 nm~1580 nm 两个波长范围内 40 pm 和 10 pm 的光谱分辨率,并认为在 500 nm~1600 nm 整个波段都具有高分辨率。他们认为这种拉锥形貌形成了光纤中非均匀的模式色散,并沿着拉锥方向对模式干涉参数微扰,因此提高了大波长范围内的散斑对比度。不过这种对拉锥光纤泄漏模的成像架构也导致了整个系统的光学效率不高,仅有 1% 的入射光被探测,导致系统的信噪比有限。

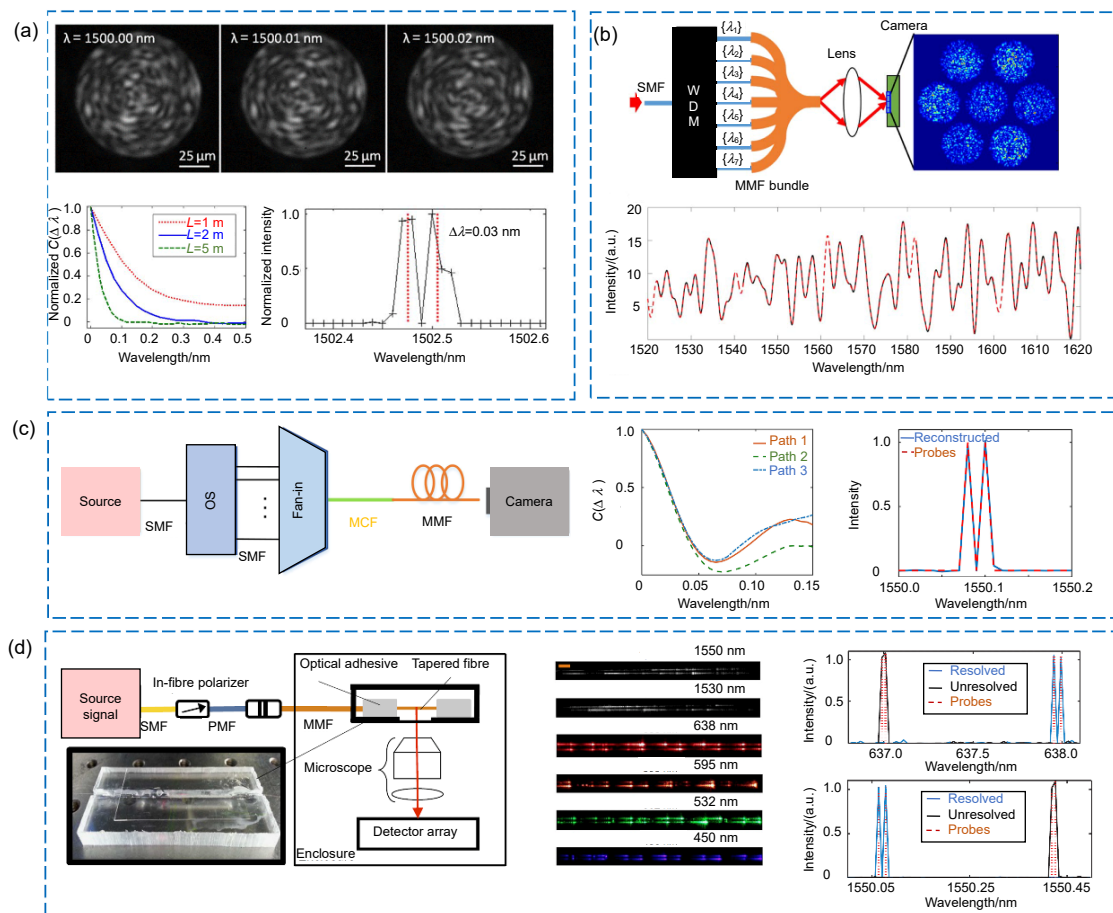


图 2 多模光纤的微型光谱仪示意图。(a) 不同波长入射光在 5 m 长多模光纤出射端的散斑分布、谱自相关函数和窄带激光谱线测试结果^[45]; (b) 基于七根多模光纤波分复用的光纤微型光谱仪和 100 nm 宽带范围的光谱测试结果^[48]; (c) 基于光开关空分复用的光纤微型光谱仪、谱自相关函数和窄带激光谱线测试结果^[59]; (d) 基于拉锥光纤的光纤微型光谱仪、不同波长散斑分布和窄带激光谱线测试结果^[60]

Fig. 2 Diagram of miniature spectrometer with multimode fiber. (a) Speckle pattern intensity distribution at the end of a 5 m long multimode fiber with varying input wavelength, spectral correlation function of the different length multimode fiber, and 5 m long multimode fiber spectrometer can resolve narrow-band laser spectral lines^[45]; (b) Fiber spectrometer with wavelength division multiplexers and a 1-to-7 fan-out fiber bundle, reconstructed spectrum test results in the 100 nm bandwidth^[48]; (c) Miniature multimode fiber spectrometer using optical switch space-division multiplexing, spectral correlation function, reconstructed narrow spectral lines test results^[59]; (d) Miniature spectrometer using multimode tapered optical fibre, speckle pattern intensity distribution with varying input wavelength, and reconstructed narrow spectral lines test results^[60]

除了上述多模光纤模式干涉的技术方案,基于光纤体系还有其他一些通过散斑检测来进行光谱分析的方法。Dogariu 等人在光纤束的端面上涂敷二氧化硅微球来产生散斑^[61],这些随机分散的微球相对于光纤束中每根纤芯的位置不同,因此每根光纤都具有不同的频率和偏振响应,在光纤束另一端面用 CCD 相机记录下散斑分布,他们重构出的光谱的均方根误差在 1%以内。Skorobogatiy 等人采用 10×10 个具有 Bragg 光栅的光子晶体光纤组成光纤束^[62],不同频谱分布的入射光在光纤束的输出端呈现出不同的组合图样,被 CCD 相机拍摄下来,最终在 $400 \text{ nm} \sim 840 \text{ nm}$ 波段获得了约 30 nm 的光谱分辨率。不同于上述的基于散斑检测的光纤光谱仪,这里的光纤中不存在多模干涉作用,输出端的图样是多个分离的不同光纤由于其光子禁带导致的传输模式的差异形成的,原理类似滤波器阵列体系的微型光谱仪。

3.1.2 基于平面光波导的微型光谱仪

片上波导集成的微型光谱仪通常基于刻蚀衍射光栅和阵列波导光栅等分光结构,如前所述,这些频谱-空间一对一映射的技术对分光效率要求非常高,微型设备尤其是片上集成体系很难实现高性能分光,因此限制了光谱分辨率。实际上,不完美分光的结果就是不同输出波导位置有不同波长的光分量,即不同波长光在探测器阵列上会形成不同的分布,这些分布与波

长有一一映射的关系,因此可以类似前述微型光纤光谱仪,通过解析这种映射关系把原始光谱重构出来。

Cao 等人将前述多模光纤技术移植到多模平面波导中,展现了更加集成化的微型光谱仪^[46]。如图 3(a)所示,他们利用平面波导工艺的优势制备了极小间距的强耦合螺旋波导结构,增加了光在波导中传输路径的扩展,从而增加了有效光程,可以看到这种强耦合波导输出端散斑的谱相关函数比弱耦合情况具有更高的光谱分辨率。在 $500 \mu\text{m}$ 直径和 50 nm 波导间距的螺旋波导结构中他们实验展示了 10 pm 的光谱分辨率,不过这种结构受限于波导中导模数量($10 \mu\text{m}$ 宽波导中有 40 个正交模式),工作波长范围仅有 0.4 nm 。为了增加带宽,Piels 等人提出了采用光开关阵列来构建多路输入的架构^[63],光开关控制入射光从不同波导耦合进入多模波导,由于多模波导中模式耦合与入射光的位置相关,类似 Li 等人在光纤体系中运用的空分复用技术^[59],可以增加独立的空间散斑数量,即增大工作波长范围。如图 3(b)所示,利用级联的 2×2 光开关阵列结合强耦合的螺旋波导结构,他们在 1550 nm 波段实现了 250 GHz 带宽内 2 GHz 的光谱分辨率,工作波长范围相比于没有光开关阵列的结构提高了一个量级。

除了上述常规的条形波导,平面工艺的优势使得平面波导结构可以有更多的选择和变化。Adibi 等人展

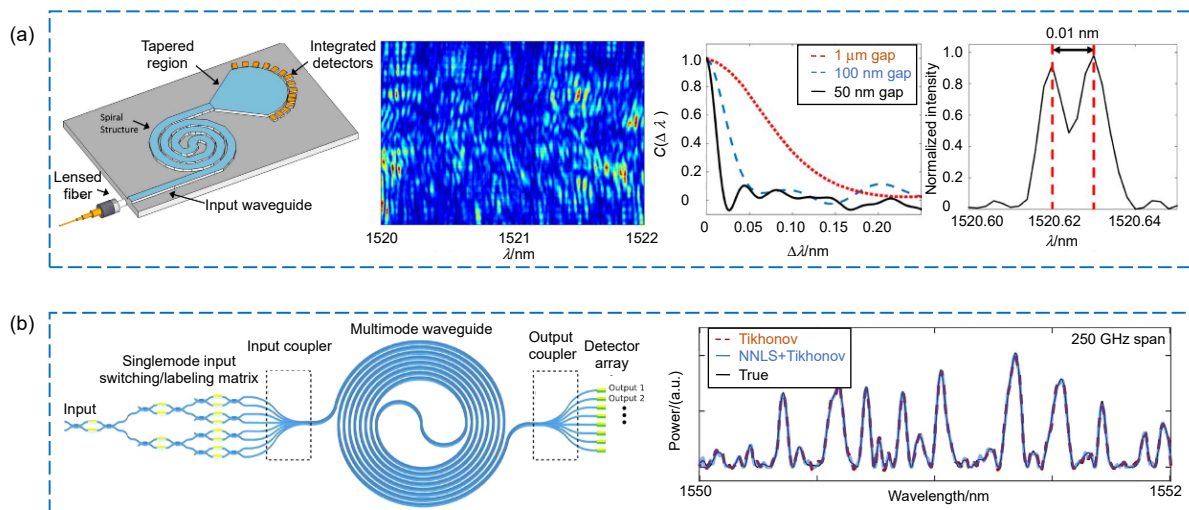


图 3 平面条形光波导的微型光谱仪。(a) 基于多模螺旋波导的微型光谱仪示意图、不同波长散斑分布、谱自相关函数和窄带激光谱线测试结果^[46]; (b) 基于级联光开关阵列的光谱测试范围扩展技术和测试结果^[63]

Fig. 3 Diagram of a miniature spectrometer with a planar strip optical waveguide. (a) Schematic of a spiral spectrometer, speckle pattern intensity distribution with varying input wavelength, spectral correlation function, and reconstructed narrow laser spectral lines test results^[46]; (b) Schematic of input switch matrix silicon multimode waveguide spectrometer, and reconstructed test results^[63]

示了可见光波段的光子晶体微型光谱仪^[64], 通过精细调节光子晶体的能带结构, 利用超棱镜效应获得高效的片上色散, 并利用负折射效应抑制了背景光干扰。如图 4(a)所示, 由光子晶体结构出射的不同波长光的主分量分别耦合到不同输出锥形光波导中, 但在临近波导位置也存在一些串扰, 对所有输出波导进行成像

就获得类似散斑的图像。他们发现波长间隔 1.2 nm 的单色光可以被分到相邻 3 μm 的不同输出波导中。随后他们在 1550 nm 波段开展了类似工作, 估算的光谱分辨率达到 10 pm^[65]。进一步, 他们提出了将这种光子晶体光谱仪与微盘传感器片上集成形成芯片实验室的设计, 并估计 60 μm 长的光子晶体有望实现 5 nm

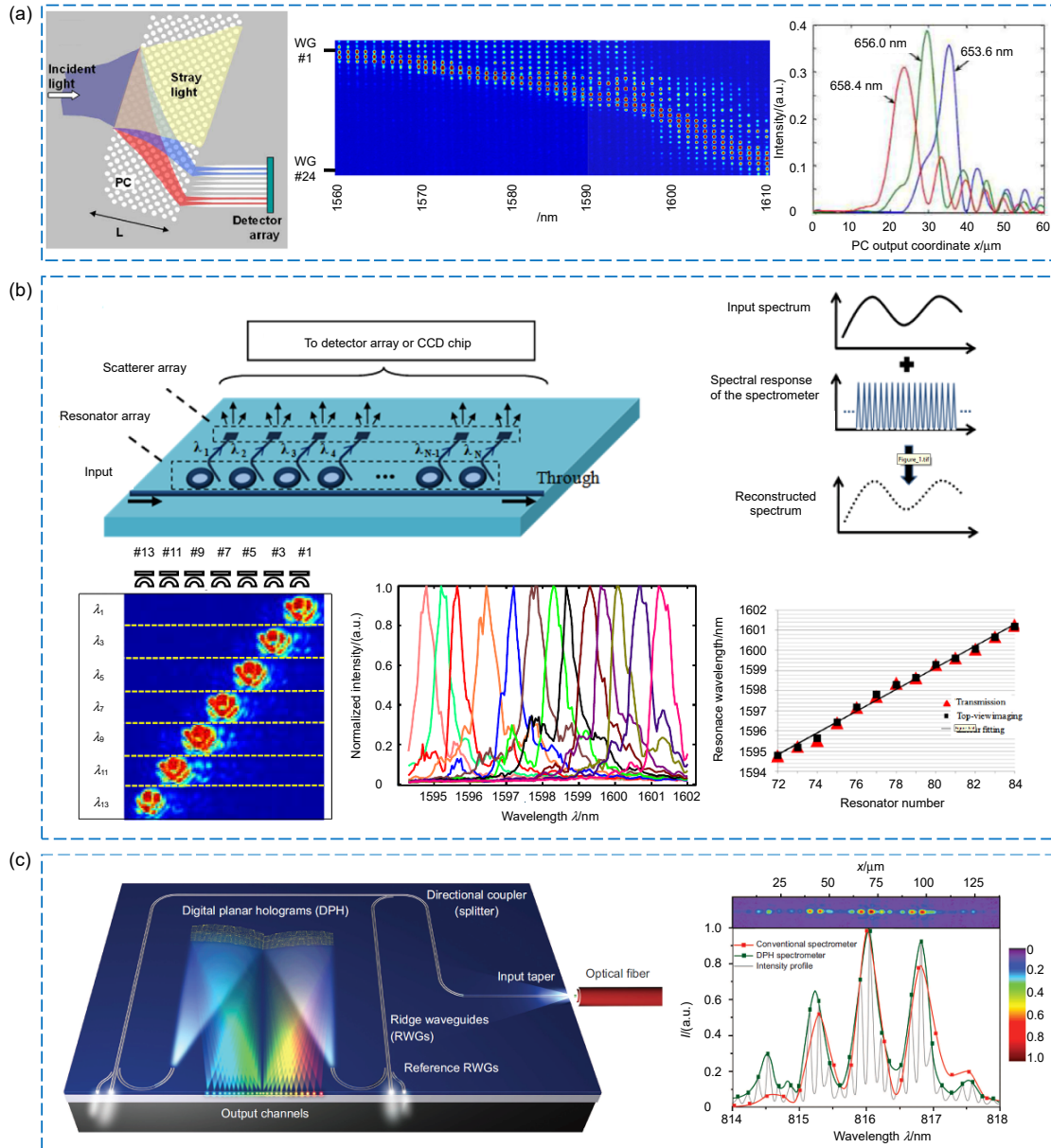


图 4 平面光子晶体及微环光波导的微型光谱仪示意图。(a) 基于光子晶体超棱镜效应的微型光谱仪示意图和不同波长在输出波导处形成的散斑分布^[65]; (b) 基于微环谐振腔阵列的微型光谱仪、不同波长对应的外散斑分布和光谱测试结果^[69]; (c) 基于数字平面全息图光谱仪示意图、散斑分布和光谱测试结果^[71]

Fig. 4 Diagram of miniature spectrometer with planar photonic crystal and micro-ring optical waveguide. (a) Schematic of integrated photonic crystal spectrometers, and speckle distribution with different wavelengths at the output waveguide^[65]; (b) Micro-spectrometer based on miniaturized microdonut resonators array, out-of-plane speckle pattern intensity distribution with varying input wavelength, and reconstructed spectral test results^[69]; (c) Schematic of an integrated digital plane hologram spectrometer, speckle pattern intensity distribution, and reconstructed spectral test results^[71]

的光谱分辨率^[66]。除了光子晶体, Adibi 还提出了基于波导耦合微盘谐振腔阵列的片上光谱分析技术, 利用微盘的选频路由作用和平面外的散斑图像, 原则上也可以实现光谱的测量^[67]。他们在 1550 nm 波段实验验证了这种技术的可行性, 如图 4(b)所示, 利用面外散斑重构出的每个微环选频通道的波长与光谱仪直接测量的结果吻合较好, 在 1550 nm 到 1610 nm 波长范围内获得优于 0.6 nm 的光谱分辨率^[68-69]。

另外, 平面数字全息技术是最近兴起的一种平面波导光谱分析技术, 它可以实现各种人工设计的光传输功能。依照软件生成的全息图通过刻蚀平面波导形成类似 0 和 1 的二维空间分布, 这些结构将入射光按波长分别导引到适当的位置, 通过相机记录不同波长形成的散斑图, 同样可以实现片上光谱分析^[70]。如图 4(c)所示, Peroz 等人利用这种技术展示了近红外波段的片上全息光谱分析, 相邻输出通道的波长间隔为 0.15 nm, 输入被测激光在不同通道出射形成散斑, 通过重构获得了与商业光谱仪类似的激光光谱, 利用平

面加工的优势他们在不到 2 cm² 的面积内集成了 926 个通道, 覆盖 148 nm 的工作波长范围^[71]。

3.1.3 基于平面散射体导光结构的微型光谱仪

除了上述规则的平面导光结构, 利用平面内无序结构对光的面内散射也可以形成与波长相关的光场分布, 而且其结构尺寸的容差更大。如图 5 所示, Cao 等人在 SOI 衬底上刻蚀出无序的纳米孔散射结构, 输入波导的光进入纳米孔阵列后将在其内部多次散射, 不同波长的光形成的散射路径不同^[47]。他们在无序纳米孔半圆形散射体结构的圆弧上设置了 25 个输出波导, 并用光子晶体结构将散射体和输出波导包裹起来抑制面内背散射和波导间串扰。这样不同波长的入射光将在输出波导阵列中形成一一对应的散斑分布, 从而可通过重构算法获得原始光谱。利用半径 25 μm 的散射体构建片上散斑光谱仪, 在 1550 nm 波段获得了 0.75 nm 的光谱分辨率。需要注意的是, 虽然这种平面散射体导光结构周围用光子晶体包覆, 二维仿真结构显示仅有 60% 的光传输到探测器, 如果考虑不可避免

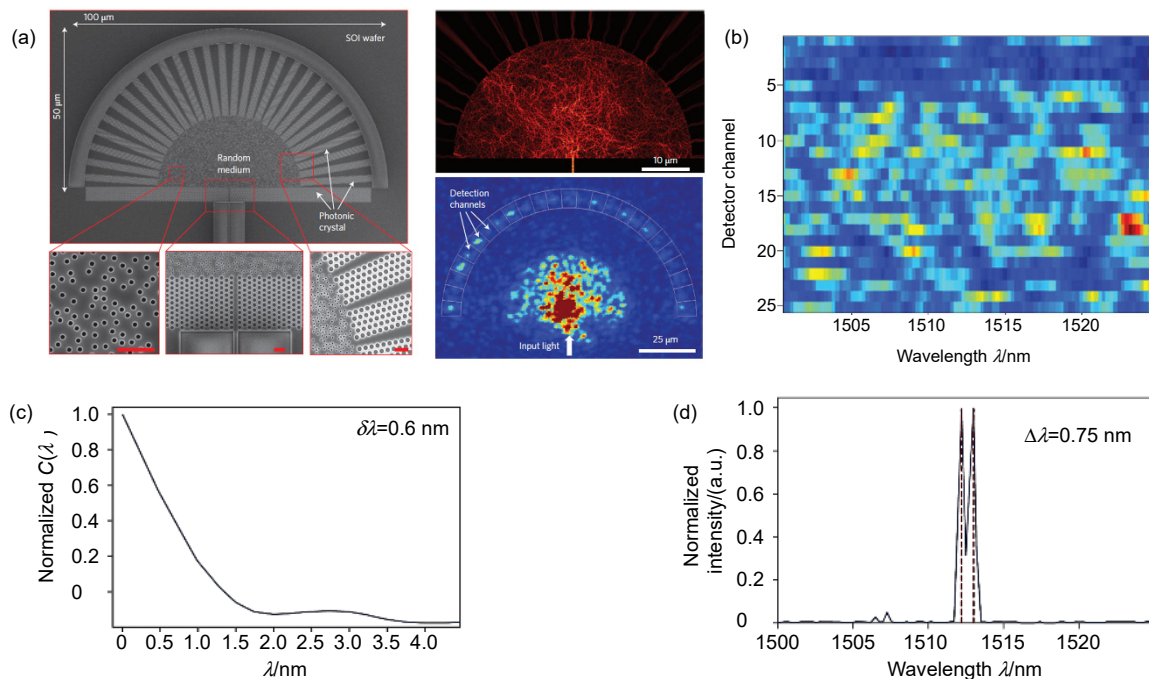


图 5 平面散射体导光结构的微型光谱仪。(a) 基于无序光子结构的光谱仪的 SEM 图像, 底部方框区域为放大的图像, 比例尺为 1 μm 。右边为在 1500 nm TE 偏振光数值模拟结果示意图和在 1500 nm 处实验结果图像^[47];
 (b) 无序光子结构的校准矩阵^[47]; (c) 基于无序光子结构所有检测通道上的平均光强度的光谱相关函数^[47];
 (d) 基于无序光子晶体结构光谱仪的窄带激光谱线测试结果^[47]

Fig. 5 Miniature spectrometer with plane scatter light guide structure. (a) SEM image of the disordered photonic spectrometer, the bottom area is an enlarged image with a scale of 1 μm , the right area is numerical simulation and experimental results at 1500 nm^[47]; (b) Calibration matrix of disordered photonic structure^[47]; (c) The spectral correlation function based on the average intensity of all detection channels^[47]; (d) Disordered photonic spectrometer can resolve narrow-band laser spectral lines^[47]

的面外散射, 真实的光学效率远低于 3.1.1 和 3.1.2 所介绍的规则导光结构。

从整体看, 上述波导型的基于散斑检测的微型光谱仪技术中, 3.1.2 和 3.1.3 介绍的技术基本都是利用散斑的一维分布, 而 3.1.1 充分利用了二维空间的散斑分布, 因此具有更佳的散斑对比度, 进而可以容纳更多的空间通道数, 提高系统的光谱分辨率。

3.2 空间型微型光谱仪

空间型微型光谱仪就是入射光由色散元件平面外入射并相互作用的系统。这种架构不仅避免了波导在面内布局的限制, 而且可以形成空间信息更丰富的二维散斑分布, 与图像采集设备的集成也更加直接, 有望实现芯片化的光谱分析系统^[72]。自由空间的散斑形成技术包括非均匀光子晶体^[72]、纳米颗粒^[2]、磨砂玻璃^[14]等^[73], 入射光照射到这些结构后由于前向或后向散射形成了波长相关的稳定空间光场分布。

Brady 等人在 2003 年提出了利用聚合物纳米球构建的非均匀三维光子晶体来实现频谱-空间映射结构的想法^[74]。如图 6(a)所示, 这种结构的无序性增大了频谱-空间的多相性, 利用重构算法对探测器阵列记录散斑图的分析, 在 500 nm~650 nm 波长范围内实现了约 5 nm 的光谱分辨率。相比于 3.1 部分介绍的各种需

要精密加工的波导结构, 这里的聚合物纳米球仅需要低成本的自组装工艺即可实现大面积制备。Mazilu 等人采用了更为简单的技术来制备散射结构^[75], 如图 6(b)所示, 他们通过在玻璃片上滴纳米氧化铝颗粒溶液获得散射分光结构, 在对散斑定标后, 实现了 800 nm 附近单波长可调谐激光器波长的准确测定, 获得 0.1 nm 的分辨率。Hanson 等人则用喷砂铝板作为色散元件, 通过 CMOS 相机记录散斑图案, 并根据图案间的协方差峰值位置来检测波长变化, 最终在可见光波段获得了 100 MHz 的光谱分辨率^[76]。

南京邮电大学的杨涛等人在基于空间散射结构的微型光谱仪方面做了大量工作^[2,4,14,19,49,77]。他们首先采用不同孔径的金属微米孔阵列作为色散元件, 如图 7(a)所示, 相邻孔的中心间距 60 μm , 直径在 10 μm ~20 μm 之间。入射光经过此微孔阵列后形成散斑, 由于各微孔直径不同, 对不同波长的衍射角也不同, 提高了散斑的对比度。在 120 nm 波长范围内用 1 nm 光谱精度对此色散元件的散斑定标后, 对未知光谱的测试结果显示了小于 2 nm 的中心波长偏移^[49]。这些金属微孔阵列是由聚焦离子束刻蚀技术在 Al 膜上制备的, 为了进一步降低制备成本, 他们尝试用一块毛玻璃来做色散元件^[14], 这种微米级的粗糙表面同样可以对不同波

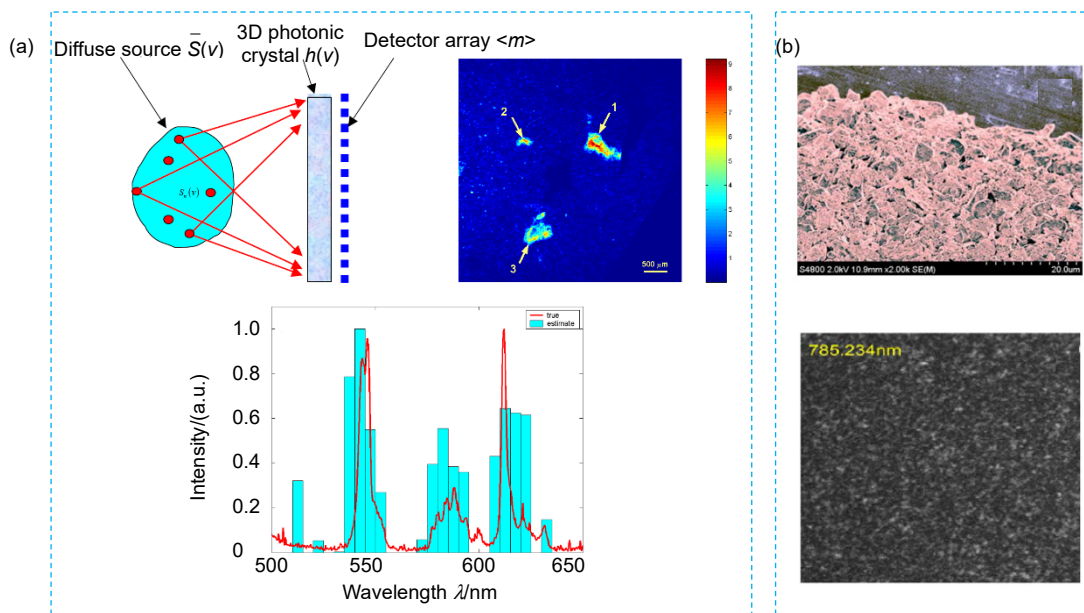


图 6 部分空间型光谱仪。(a) 基于非均匀自组装光子晶体的微型光谱仪示意图、散斑分布和光谱测试结果^[74];

(b) 氧化铝颗粒的 SEM 图像和远场散斑图^[75]

Fig. 6 Part of spatial type spectrometer. (a) Schematic of miniature spectrometer based on inhomogeneous and self-assembled disordered photonic crystals, speckle pattern distribution, and spectral test results^[74];

(b) SEM image and far-field speckle pattern of alumina particles^[75]

长的光通过散射和衍射过程形成不同的散斑分布,如图 7(b)所示,他们发现在多色散元件定标时采用更高的光谱分辨率可以提高散斑光谱仪后期测试应用时的光谱重构精度,并实验中区分了 4 nm 间隔的两个峰。为了突破现有系统受限于可见光波段 CCD 的探测波长范围,他们在 CCD 前面加了一块上转换或下转换材料覆盖的元件,如图 7(c)所示,上下转换材料将红外和紫外的入射光转变为常规 CCD 可以探测的可见光,从而获得紫外到红外超宽的工作波长范围^[2,77,57]。他们还利用化学合成的银纳米颗粒结合红外显色卡,实现了可见光 CCD 对 1500 nm 波段未知光谱的测试,同时利用可调谐窄带激光器代替之前工作中的单色仪来做提高定标的光谱精度,在定标光谱精度 0.02 nm 情况下获得重构光谱分辨率约 0.2 nm^[2]。分别利用毛

玻璃和微孔阵列结合下转换材料,在 1 pm 定标光谱分辨率的情况下,实现对 15 pm 间距两个窄激光峰的分辨。他们还发现毛玻璃因为具有更高的光效,作为色散元件具有更高的灵敏度和工作效率^[14]。除了这种上下转换材料结合探测器面阵的方法,这种散射结构的光谱重构机制还可以直接推广到其他波段,例如太赫兹^[4]。由于太赫兹波段的探测器阵列较为昂贵,杨涛等人利用电动位移台来调制一块粗糙表面透明版的位置和角度,通过单个探测器时分复用的方式来替代探测器阵列,最终在 1 THz 波段重构光谱的峰值与原始光谱偏差小于 40 GHz,他们的理论分析光谱分辨率有望进一步提高到 1 GHz。

美国盐湖城大学的 Menon 等人采用相位版来调控不同波长在空间的相位延迟分布,从而获得与波长

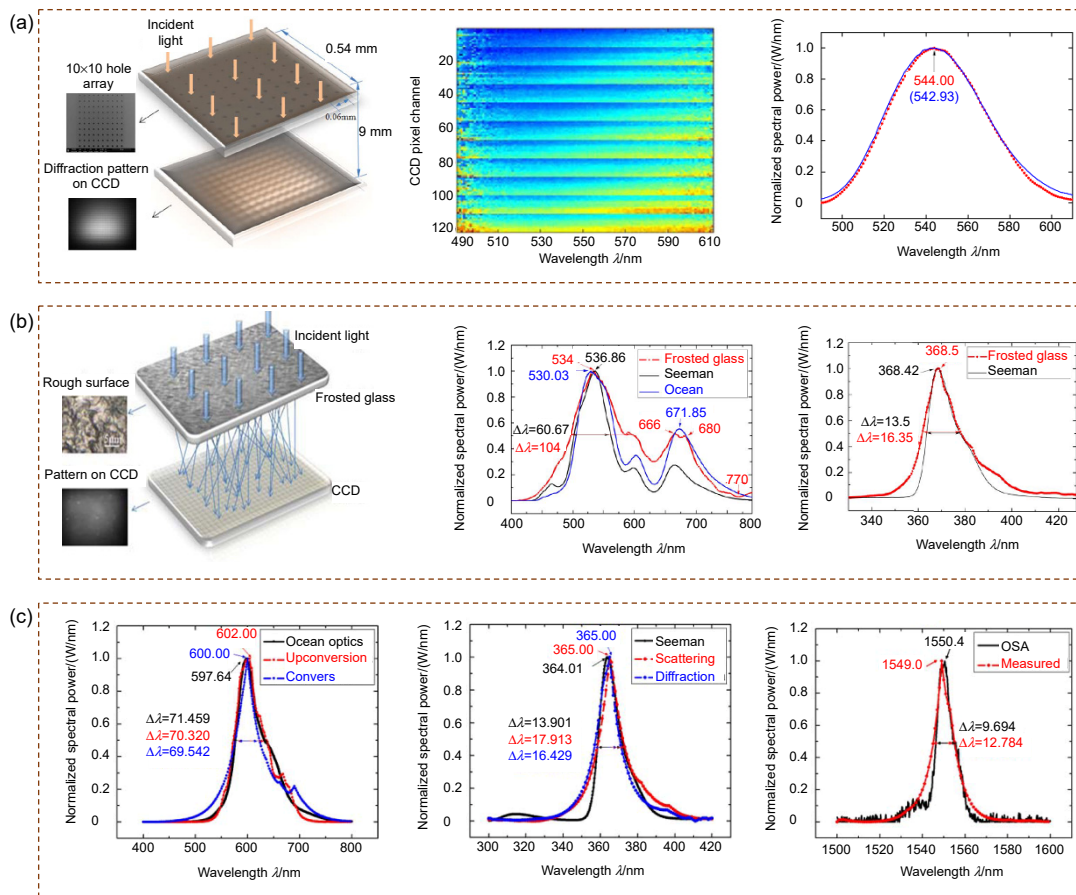


图 7 空间散射结构型光谱仪。(a) 基于微米孔阵列的微型光谱仪示意图、散斑分布和光谱测试结果^[49]; (b) 基于磨砂玻璃的微型光谱仪示意图,以及可见光和紫外波段的光谱测试结果^[14]; (c) 基于磨砂玻璃的方法并结合上下转换材料分别在紫外、可见光、红外三个波段的光谱测试结果^[77]

Fig. 7 Space scattering structure type spectrometer. (a) Schematic of miniature spectrometer based on hole array, speckle distribution and spectrum test results^[49]; (b) Schematic of a miniature spectrometer based on frosted glass, and the spectrum test results in the visible and ultraviolet bands^[14]; (c) The frosted glass spectrometer using up conversion and down conversion materials spectral test results in the three bands of ultraviolet, visible and infrared^[77]

相关的散斑图案^[78]。如图 8(a)所示,他们利用灰度曝光技术分别在透明材质上制备了两类相位版,一类是刻槽深度规律变化的均匀相位版,具有 64 阶不同刻蚀深度,一种是刻槽深度随机分布的非均匀相位版,具有 6 阶不同刻蚀深度。如图所示,非均匀相位版的空间-光谱点分布函数具有更加均匀分布,即散斑对比度更高,自相关函数预示基于非均匀相位版的散斑光谱仪具有更小的光谱分辨率。通过对激光、LED 和氙灯等多种光源光谱进行测试,实验展示了这种基于相位版的光谱重构技术可以分辨出波长间距 1 nm 左右的光谱峰。虽然非均匀相位版具有更高的分辨率,但重构的光谱噪声明显高于均匀相位版。这是因为散射

体系由于光散射方向的不确定性,导致系统光效较低。为此, Cai 等人提出将定向光传输的衍射结构和无序结构结合的技术方案。如图 8(b)所示,通过在色散元件表面制备取向随机分布的光栅单元阵列,利用不同光栅将入射光衍射到成像面不同的地方,并一起形成散斑图案。这样既保证了较高的光学效率,又能够利用无序结构的散斑图案特点来获得高光谱分辨率。仿真结果显示,在 3% 的幅度噪声和均方根噪声的影响下,此系统仍能够获得 10 pm 的光谱分辨率^[79]。此外,土耳其伊斯坦布尔大学的 Ferhanoglu 等人提出了将散斑机制与现有商业光谱仪技术相结合的技术方案。如图 8(c)所示,通过在棱镜光谱仪前端光路中插入散射

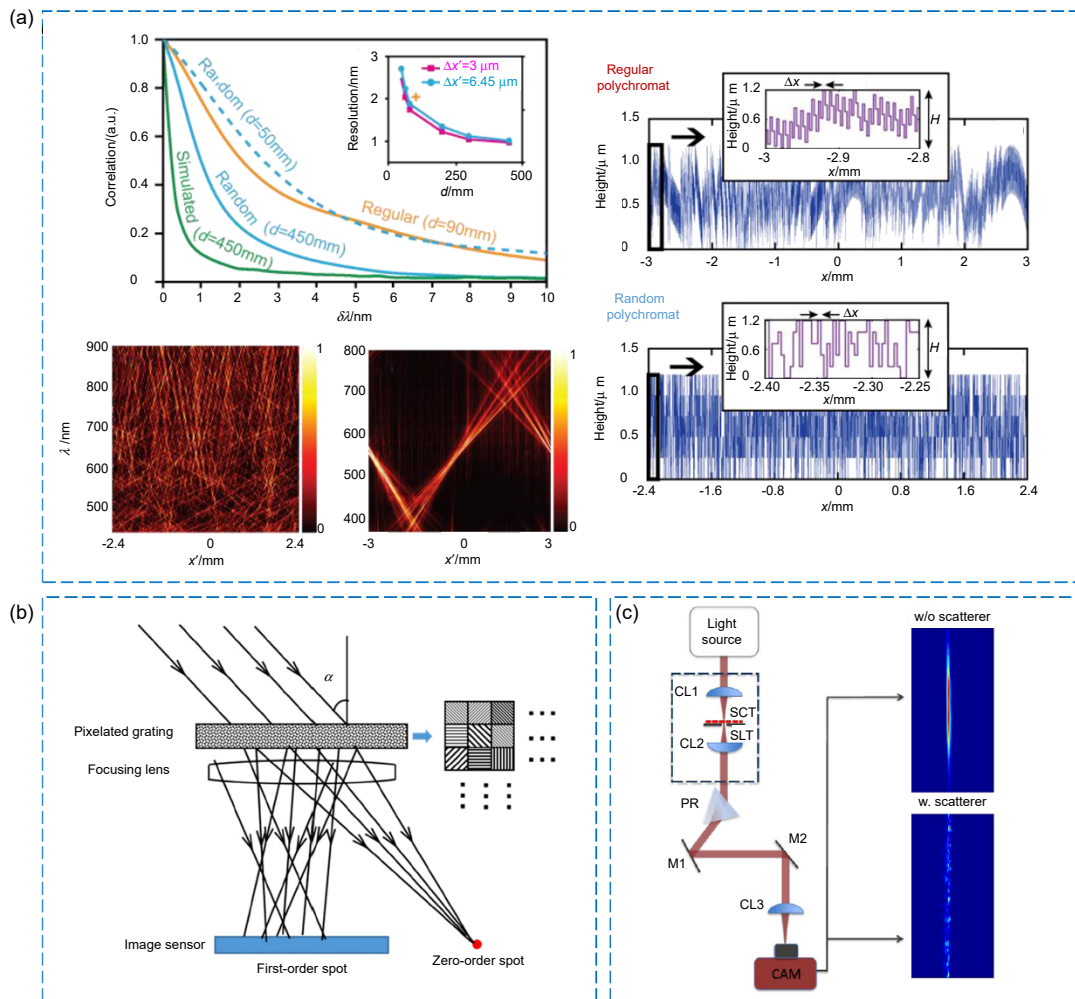


图 8 相位版、光栅和纳米颗粒结构型光谱仪。(a) 基于相位版的光谱分析技术: 两类相位版的槽深分布、散斑分布和对应的谱自相关函数^[33]; (b) 基于无序取向的光栅单元阵列的微型光谱仪示意图^[79]; (c) 基于纳米颗粒散斑增强的棱镜光谱仪示意图和散斑分布^[80]

Fig. 8 Polychromats, grating, and nanoparticles structure type spectrometer. (a) Spectral analysis based on the polychromats: the groove depth distribution, speckle pattern distribution and correlation function of the two types of polychromats^[33]; (b) Schematic diagram of the random grating array speckle spectrometer^[79]; (c) Schematic of nanoparticles speckle-enhanced prism spectrometer^[80]

元件,利用散斑机制提高光谱分辨率,同时利用棱镜将不同波长的散斑图案分开到不同空间位置,确保大的工作波长范围。他们在实验中尝试了磨砂玻璃、胶带、纳米颗粒等不同散射元件,通过散斑图案的自相关函数,计算发现纳米颗粒的散射元件可以获得更高的光谱分辨率(17 pm)^[80]。

从整体看,上述空间型的基于散斑检测的微型光谱仪技术特别适合于图像传感器,充分利用了二维空间的光场分布,具有非常好的空间扩展性。不过相比于波导型架构,大多数空间型的散射元件表面由于和光传输方向垂直,导致光散射路径较短的问题,限制了光谱分辨率^[81]。

4 展望与总结

光的散射是一个广泛存在的光学现象,通过上述研究进展可以看到,利用这种常见的光学现象可以有效地压缩光谱分析系统的尺寸,并保证较高的光谱分辨率,甚至在性能上已经超越了当前大多数小型化的商用光谱系统。其核心原理建立在光散射过程中对原始光谱信息的完整保存和这种波长与散斑分布的固定映射关系。相对于传统光谱仪将宽带光分散成窄带光到探测器线阵上形成一维的空间映射分布,散斑技术可以将光谱信息映射到二维平面分布,并充分利用数学分析技术,因此具有更大的检测潜力。从前文中可以看到,基于散斑检测的微型光谱仪基本可分为波导型和空间型两大类,其中波导型指光传输在波导内发生,包括光纤、平面波导和平面内散射体等技术方案,而空间型指光传输方向与色散结构垂直的情况,包括尺寸和排列均无序的结构、尺寸无序排列有序的结构,以及尺寸有序排列无序的结构等技术方案。各种技术方案有各自特点和适用范围。例如,光纤方案中可以通过简单的加长光纤来增加光与结构的作用距离,从而提高不同波长的相差积累,即增大对应的散斑差异,可以获得 pm 甚至 fm 的光谱分辨率,而且光纤的传输能够保证较高的光学效率,因此适用于对分辨率和光学效率要求较高的应用场景;平面波导和平面散射体由于片上光路由的优势,相对于光纤方案可以进一步压缩波导的长度,因此具有小型化的优势,但片上探测器(或光栅耦合器)大规模阵列的集成难度一定程度限制了信道数即光谱分辨率,也一定程度增加了加工的难度与成本;空间型的微型光谱仪得益于和低成本大规模的图像传感器的集成性,通常都具有较高的集

成性和成本优势,尤其是纳米颗粒和毛玻璃的技术方案,但由于垂直入射的架构限制了光与散射结构的作用距离,散斑相关度较高,导致光谱分辨率通常低于波导型的,因此适合于低成本、高载荷和体积限制的应用场景。虽然散斑检测机制的微型光谱仪展现了较好的性能和应用前景,但这项技术也存在固有的缺点。散射体系对光的传输是发散的,因此探测系统的光收集效率比常规的衍射系统低许多,导致这种技术受环境噪声的影响较大。同时由于散射会引起类似匀光的效应,导致依赖于散斑对比度的检测受限于空间正交散射通道数的限制,工作波长范围往往有限。虽然目前通过波分复用和空分复用等技术可以有效扩展光谱检测范围,更易集成和更低成本的技术期望能够进一步发展。对于一种检测技术,我们还需要了解其检测误差的来源。散斑检测的主要测量是对散斑的成像检测,因此成像分辨率将显著影响重构光谱的精度。对于空间型的散斑微型光谱仪,由于通常基于成熟的图像传感器,像素规模在几百万到几千万的级别,可以非常精确地对散斑图案进行成像,从而呈现出细小波长差异带来的图像的变化,有助于提高光谱分辨率。而波导型的散斑微型光谱仪,尤其是平面波导和平面散射体技术方案往往依赖于在片上集成的探测器(或光栅耦合器)阵列来提取散斑信号,受限于阵列规模导致光谱分辨率有限,即误差较大。另外,散斑微型光谱仪在进行光谱检测前都需要利用一系列单波长光源来定标,因此单波长光源的波长精度对后续基于散斑检测的光谱重构的误差也具有明显影响。除了这些物理量的检测误差,光谱重构算法本身的精度和检测系统的杂散光等噪声也都会贡献到最终的检测误差中。

基于散斑检测的微型计算光谱分析技术的原理已经很清楚,后续发展将主要集中在技术层面。包括:1) 集成技术。依托当前最为广泛使用的手机平台,结合大数据和云端技术等,将极大推动光谱分析技术的应用。2) 智能化技术。需要与人工智能和机器学习等新兴技术结合,提高散射元件的定标效率和重构光谱的精度。3) 提高适用性。由于散射机制固有的低光效,需要发展各种噪声抑制和处理技术,提高系统在各种环境中的适用性。总之,基于散斑检测的微型计算光谱分析技术突破了传统光谱仪复杂、笨重、高成本等限制,提供了一种高精度、低成本和便携式的光谱检测能力,未来在生物医药、环境食品、农业、安防等领域具有巨大的应用前景。

参考文献

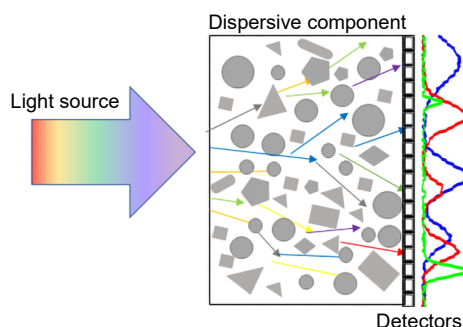
- [1] Shi J F, Hui M, Wang D S, *et al.* Micromation and applications of spectrometers[J]. *Opt Tech*, 2003, **29**(1): 13–16, 20.
史俊锋, 惠梅, 王东生, 等. 光谱仪的微型化及其应用[J]. 光学技术, 2003, **29**(1): 13–16, 20.
- [2] Yang T, Peng J X, Ho H P, *et al.* Visible-infrared micro-spectrometer based on a preaggregated silver nanoparticle monolayer film and an infrared sensor card[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10616**: 1061610.
- [3] Pang Y J, Zhang Y X, Yang H D, *et al.* Compact broadband high-resolution infrared spectrometer with a dihedral reflector[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(13): 14960–14967.
- [4] Yang T, Zhang Y, Ge J C, *et al.* Compact terahertz spectrometer based on sequential modulation of disordered rough surfaces[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(24): 6061–6064.
- [5] Avrutsky I, Salakhutdinov I, Chaganti K. Diffractive imaging micro-spectrometer[J]. *Proc SPIE*, 2006, **6388**: 63880Q.
- [6] Podmore H, Scott A, Lee R, *et al.* A compressive-sensing fourier-transform on-chip Raman spectrometer[J]. *Photonic Instrum Eng V*, 2018, **10539**: 105390L.
- [7] Ballard Z S, Shir D, Bhardwaj A, *et al.* Computational sensing using low-cost and mobile plasmonic readers designed by machine learning[J]. *ACS Nano*, 2017, **11**(2): 2266–2274.
- [8] Reinig P, Gröger H, Knobbe J, *et al.* Bringing NIR spectrometers into mobile phones[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10545**: 105450F.
- [9] McGonigle A J S, Wilkes T C, Pering T D, *et al.* Smartphone spectrometers[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, **18**(1): 223.
- [10] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. *Nature*, 2015, **523**(7558): 67–70.
- [11] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, *et al.* Compact folded metasurface spectrometer[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 4196.
- [12] Craig B, Shrestha V R, Meng J J, *et al.* Experimental demonstration of infrared spectral reconstruction using plasmonic metasurfaces[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(18): 4481–4484.
- [13] Cerjan B, Halas N J. Toward a nanophotonic nose: a compressive sensing-enhanced, optoelectronic mid-infrared spectrometer[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(1): 79–86.
- [14] Yang T, Huang X L, Ho H P, *et al.* Compact spectrometer based on a frosted glass[J]. *IEEE Photonics Techno Lett*, 2017, **29**(2): 217–220.
- [15] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cui H X, *et al.* Single-nanowire spectrometers[J]. *Science*, 2019, **365**(6457): 1017–1020.
- [16] Pichette J, Charle W, Lambrechts A. Fast and compact internal scanning CMOS-based hyperspectral camera: the Snapscan[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10110**: 1011014.
- [17] Yokino T, Kato K, Ui A, *et al.* Grating-based ultra-compact SWNIR spectral sensor head developed through MOEMS technology[J]. *Proc SPIE*, 2019, **10931**: 1093108.
- [18] Chen Q, Liang L, Zheng Q L, *et al.* On-chip readout plasmonic mid - IR gas sensor[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(3): 190040.
- [19] Cao H. Perspective on speckle spectrometers[J]. *J Opt*, 2017, **19**(6): 060402.
- [20] Liu J X, Yin X H, Han S H, *et al.* Review of portable near-infrared spectrometers[J]. *J Henan Agri Univ*, 2019, **53**(4): 662–670.
刘建学, 尹晓慧, 韩四海, 等. 便携式近红外光谱仪研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2019, **53**(4): 662–670.
- [21] Wang W P, Jin L. Research progress of on-chip spectrometer based on the silicon photonics platform[J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2020, **40**(2): 333–342.
- [22] Redding B, Popoff S M, Cao H. All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(5): 6584–6600.
- [23] Seffler G A, Shaw T J, Valley G C. Demonstration of speckle-based compressive sensing system for recovering RF signals[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(17): 21390–21402.
- [24] Halpaap D, Tiana-Alsina J, Vilaseca M, *et al.* Experimental characterization of the speckle pattern at the output of a multimode optical fiber[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(20): 27737–27744.
- [25] Meng J J, Cadusch J J, Crozier K B. Detector-only spectrometer based on structurally colored silicon nanowires and a reconstruction algorithm[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(1): 320–328.
- [26] Kurokawa U, Choi B I, Chang C C. Filter-based miniature spectrometers: spectrum reconstruction using adaptive regularization[J]. *IEEE Sens J*, 2011, **11**(7): 1556–1563.
- [27] Redding B, Popoff S M, Bromberg Y, *et al.* Noise analysis of spectrometers based on speckle pattern reconstruction[J]. *Appl Opt*, 2014, **53**(3): 410–417.
- [28] Yee G M, Maluf N I, Hing P A, *et al.* Miniature spectrometers for biochemical analysis[J]. *Sens Actuators A Phys*, 1997, **58**(1): 61–66.
- [29] Ma X, Li M Y, He J J. CMOS-compatible integrated spectrometer based on echelle diffraction grating and MSM photodetector array[J]. *IEEE Photonics J*, 2013, **5**(2): 6600807.
- [30] Chang C C, Lin N T, Kurokawa U, *et al.* Spectrum reconstruction for filter-array spectrum sensor from sparse template selection[J]. *Opt Eng*, 2011, **50**(11): 114402.
- [31] Kraft M, Kenda A, Frank A, *et al.* Single-detector micro-electro-mechanical scanning grating spectrometer[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2006, **386**(5): 1259–1266.
- [32] Huang E, Ma Q, Liu Z W. Etalon array reconstructive spectrometry[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 40693.
- [33] Wang P, Menon R. Computational spectroscopy via singular-value decomposition and regularization[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(18): 21541–21550.
- [34] Valley G C, Seffler G A, Shaw T J. Multimode waveguide speckle patterns for compressive sensing[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(11): 2529–2532.
- [35] Chang C C, Lee H N. On the estimation of target spectrum for filter-array based spectrometers[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(2): 1056–1061.
- [36] Tang C Y, Shi J J. Fast reconstruction algorithm based on transformation domain for compressed sensing[J]. *Softw Guide*, 2019, **18**(7): 96–99.
唐川雁, 史姣姣. 基于变换域的压缩感知快速重构算法[J]. 软件导刊, 2019, **18**(7): 96–99.
- [37] Brady D J, Gehm M E, Pitsianis N, *et al.* Compressive sampling strategies for integrated microspectrometers[J]. *Intell Integr Microsystems*, 2006, **6232**: 62320C.
- [38] LU C C, Chen K, Huang L R, *et al.* Signal recovery for compressive spectrometers[J]. *Sens Agric Food Qual Saf X*, 2018, **10665**: 106650U.
- [39] Chong X Y, Li E W, Squire K, *et al.* On-chip near-infrared spectroscopy of CO₂ using high resolution plasmonic filter array[J]. *Appl Phys Lett*, 2016, **108**(22): 221106.
- [40] Kim C, Park D, Lee H N. Convolutional neural networks for the reconstruction of spectra in compressive sensing spectrometers[J]. *Opt Data Sci II*, 2019, **10937**: 109370L.

- [41] Zhang S, Dong Y H, Fu H Y, *et al.* A spectral reconstruction algorithm of miniature spectrometer based on sparse optimization and dictionary learning[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, **18**(2): 644.
- [42] Hong L Y, Sengupta K. Fully integrated optical spectrometer in visible and Near-IR in CMOS[J]. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2017, **11**(6): 1176–1191.
- [43] Oliver J, Lee W B, Lee H N. Filters with random transmittance for improving resolution in filter-array-based spectrometers[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(4): 3969–3989.
- [44] Feller S D, Chen H J, Brady D J, *et al.* Multiple order coded aperture spectrometer[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(9): 5625–5630.
- [45] Redding B, Cao H. Using a multimode fiber as a high-resolution, low-loss spectrometer[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(16): 3384–3386.
- [46] Redding B, Liew S F, Bromberg Y, *et al.* Evanescently coupled multimode spiral spectrometer[J]. *Optica*, 2016, **3**(9): 956–962.
- [47] Redding B, Liew S F, Sarma R, *et al.* Compact spectrometer based on a disordered photonic chip[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(9): 746–751.
- [48] Liew S F, Redding B, Choma M A, *et al.* Broadband multimode fiber spectrometer[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(9): 2029–2032.
- [49] Yang T, Xu C, Ho H P, *et al.* Miniature spectrometer based on diffraction in a dispersive hole array[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(13): 3217–3220.
- [50] Freude W, Fritzsche C, Grau G, *et al.* Speckle interferometry for spectral analysis of laser sources and multimode optical waveguides[J]. *J Lightwave Technol*, 1986, **4**(1): 64–72.
- [51] Hlubina P. Spectral and dispersion analysis of laser sources and multimode fibres via the statistics of the intensity pattern[J]. *J Mod Opt*, 1994, **41**(5): 1001–1014.
- [52] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. *J Phys E: Sci Instrum*, 1981, **14**(11): 1270.
- [53] Yamaguchi I. Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation[J]. *Opt Acta: Int J Opt*, 1981, **28**(10): 1359–1376.
- [54] Yamaguchi I, Kobayashi K, Yaroslavsky L P. Measurement of surface roughness by speckle correlation[J]. *Opt Eng*, 2004, **43**(11): 2753–2762.
- [55] Imai M. Statistical properties of optical fiber speckles[J]. 北海道大学, 1986, **130**: 89–104.
- [56] Redding B, Alam M, Seifert M, *et al.* High-resolution and broadband all-fiber spectrometers[J]. *Optica*, 2014, **1**(3): 175–180.
- [57] Xu D Y, Du C N. Design and implementation of high sensitivity micro spectrometer based on area array CCD[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(11): 30–40.
徐丹阳, 杜春年. 基于面阵 CCD 的高灵敏度微型光谱仪的设计与实现[J]. 光电工程, 2018, **45**(11): 30–40.
- [58] Coluccelli N, Cassinero M, Redding B, *et al.* The optical frequency comb fibre spectrometer[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**(1): 12995.
- [59] Meng Z Y, Li J Q, Yin C J, *et al.* Multimode fiber spectrometer with scalable bandwidth using space-division multiplexing[J]. *AIP Adv*, 2019, **9**(1): 015004.
- [60] Wan N H, Meng F, Schröder T, *et al.* High-resolution optical spectroscopy using multimode interference in a compact tapered fibre[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 7762.
- [61] Kohlgraf-Owens T W, Dogariu A. Transmission matrices of random media: means for spectral polarimetric measurements[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(13): 2236–2238.
- [62] Hang Q, Ung B, Syed I, *et al.* Photonic bandgap fiber bundle spectrometer[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(25): 4791–4800.
- [63] Piels M, Zibar D. Compact silicon multimode waveguide spectrometer with enhanced bandwidth[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**: 43454.
- [64] Pervez N K, Cheng W, Jia Z, *et al.* Photonic crystal spectrometer[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(8): 8277–8285.
- [65] Momeni B, Hosseini E S, Askari M, *et al.* Integrated photonic crystal spectrometers for sensing applications[J]. *Opt Commun*, 2009, **282**(15): 3168–3171.
- [66] Momeni B, Yegnanarayanan S, Soltani M, *et al.* Silicon nanophotonic devices for integrated sensing[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2009, **3**(1): 031001.
- [67] Soltani M, Li Q, Yegnanarayanan S, *et al.* Large-scale array of small high-Q microdisk resonators for onchip spectral analysis[C]//2009 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009: 703–704.
- [68] Xia Z X, Eftekhari A A, Soltani M, *et al.* Near infrared absorption sensor based on large-scale array of miniaturized microdonut resonators[C]. *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics, Optical Society of America*, 2010: IME6.
- [69] Xia Z X, Eftekhari A A, Soltani M, *et al.* High resolution on-chip spectroscopy based on miniaturized microdonut resonators[J]. *Opt Exp*, 2011, **19**(13): 12356–12364.
- [70] Babin S, Bugrov A, Cabrini S, *et al.* Digital optical spectrometer-on-chip[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, **95**(4): 041105.
- [71] Calafiore G, Koshelev A, Dhuey S, *et al.* Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy[J]. *Light: Sci Appl*, 2014, **3**(9): e203.
- [72] Wang Z, Yi S, Chen A, *et al.* Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 1020.
- [73] Wang G D, Xia G, Li Z Y, *et al.* Design and key technology research of portable UV-VIS spectrometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(10): 70–81.
王国栋, 夏果, 李志远, 等. 便携式紫外-可见光谱仪设计及关键技术研究[J]. 光电工程, 2018, **45**(10): 70–81.
- [74] Xu Z C, Wang Z L, Sullivan M, *et al.* Multimodal multiplex spectroscopy using photonic crystals[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(18): 2126–2133.
- [75] Mazilu M, Vetteng T, Di Falco A, *et al.* Random super-prism wavelength meter[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(1): 96–99.
- [76] Chakrabarti M, Jakobsen M L, Hanson S G. Speckle-based spectrometer[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(14): 3264–3267.
- [77] Yang T, Peng J X, Li X A, *et al.* Compact broadband spectrometer based on upconversion and downconversion luminescence[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(21): 4375–4378.
- [78] Wang P, Menon R. Computational spectrometer based on a broadband diffractive optic[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(12): 14575–14587.
- [79] Wu L, Cai Z J, Su Y F, *et al.* Simulative study on speckle-spectral properties of a random pixelated grating[J]. *J Opt Soc Am A*, 2019, **36**(8): 1410–1417.
- [80] Çetindağ Ş K, Toy M F, Ferhanoğlu O, *et al.* A speckle-enhanced prism spectrometer with high dynamic range[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2018, **30**(24): 2139–2142.
- [81] Wang X J, Long Y X, Zheng H Y, *et al.* Design of optical system of miniature spectrometer for ultrahigh-resolution[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(10): 82–90.
王贤俊, 龙亚雪, 郑海燕, 等. 超高分辨力微型光谱仪的光学系统设计[J]. 光电工程, 2018, **45**(10): 82–90.

Research progress of computational microspectrometer based on speckle inspection

Zheng Qilin, Wen Long, Chen Qin*

Institute of Nanophotonics, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China



Schematic of speckle pattern distribution on the detector array after the incident light passing through the dispersive component

Overview: Fast, accurate and nondestructive spectral analysis technique is important to differentiate matters and widely used in the fields of scientific research, information, biomedical, pharmaceutical detection, agriculture, environment, and security. The existing spectroscopic analysis equipments usually use individual optical elements such as gratings, prisms and interferometer to obtain spectral information, and therefore the whole system is usually bulky, complex and expensive, which are difficult to adapt to portable application scenarios such as on-site rapid detection, point-of-care diagnostics, and light-load platform in low-resource settings. It is not straight forward to minimize the conventional spectrometer without a loss of performance because the spectral resolution is usually associated with the length of light path. Novel mechanisms and advanced techniques are required to tackle this issue. With the rapid developments of the novel nanophotonic techniques and micro-nano fabrication methods, spectral analysis has been achieved on a single chip with decent spectral resolution, for example, quantum dot microspectrometer, photonic crystal microspectrometer, and so on, which shows great advantages in volume, weight, integration, cost, etc. In addition, combining such minimized spectrometers together with the cloud technology and big data technology is expected to significantly improve the efficiency of spectral information in collection, distribution and analysis, which is important for timely, accurate and portable applications. In particular, the computational spectral technology based on the speckle inspection can obtain high-resolution spectral information by recording and analyzing the speckle patterns formed by the light scattering process. In general, the speckle detection-based spectral analysis techniques are divided into two categories: the waveguide types and the normal incidence types. The waveguide types include multimode fibers, multimode waveguides, and in-plane scatters. Different modes have different propagation constants and thus different phase delay. Different scattering paths also result in different phase delay. The light interference therefore induces the generation of the wavelength-dependent speckles. The normal incidence type usually includes disordered micro-nano structures such as nanoparticles, micro-holes, and frosted glass. Similar optical interference phenomenon occurs and generates wavelength-dependent speckles. By initially calibrating the speckle generation structures by a series of monochromatic light and dealing the speckle with the compressive sensing algorithm, the spectral information of the target spectrum can be reconstructed. This paper will introduce the relevant technical principles and technical development status, analyze the existing technical performance, advantages and disadvantages, discuss and summarize the future development direction and application prospects.

Zheng Q L, Wen L, Chen Q. Research progress of computational microspectrometer based on speckle inspection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(3): 200183; DOI: 10.12086/oee.2021.200183

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2019YFB2203402), National Natural Science Foundation of China (11774383, 11774099 and 11874029), Guangdong Science and Technology Program International Cooperation Program (2018A050506039), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2020B1515020037), and Pearl River Talent Plan Program of Guangdong (2019QN01X120)

* E-mail: chenqin2018@jnu.edu.cn