

光谱域编码的压缩光谱测量技术

徐亦静, 吴志鹏, 王琦龙

(东南大学电子科学与工程学院, 江苏南京 210096)

摘要: 光谱测量技术在生物医药、国防、安检、生产监控、地质勘测、物质分析、环境保护和减灾防灾等方面有着广泛的应用。但受制于现有探测器件和应用的技术条件,传统类型光谱仪在上述领域的应用灵活性和适用性的限制较多,光谱系统微型化和可集成化是确定发展的趋势之一。光谱成像系统有着向微型化、芯片化和智能化发展的迫切需求,且伴随相关计算光谱成像理论的成熟完善,计算型光谱仪有望在减少器件或系统重量与尺寸的同时,大幅提升光谱分辨能力。基于压缩感知理论的计算型光谱仪具有实时性好、适用范围广、结构调整灵活、成本低廉等诸多优势。文中参考压缩感知理论的基础框架,详细对比多种分光结构的设计方法,分析光谱域直接编码的压缩光谱测量技术,归纳总结具有压缩感知功能的智能芯片化光谱仪的发展趋势和技术问题。

关键词: 压缩感知; 光谱测量; 重构算法; 计算光谱学; 光电探测

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220093

Compressed spectral measurement technology based on coding of spectrum domain

Xu Yijing, Wu Zhipeng, Wang Qilong

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Spectral detection technology has a wide range of applications in biomedicine, national defense, security check, production monitoring, geological survey, material analysis, environmental protection, disaster reduction and so on. However, due to the existing detectors and application technology conditions, the flexibility and applicability of traditional spectral instruments is limited in above territories. The miniaturization and integration of spectral systems is one of the inevitable development trends. With the critical demand of miniaturized, chip and intelligent spectral imaging and the maturation of the computational spectral imaging theory, computational spectrometers have attracted much attention because of the ability to improve spectral resolution while reducing the mass and volume of devices or systems. The computational spectrometers based on compressed sensing theory have the advantages of short calculation time, wide application range, flexible structure, low cost and so on. This review compares the design methods of various spectral structure based on the framework of compressed sensing theory, analyzes the compression spectral measurement technology which realizes the direct coding of spectrum domain and reveals the development trend and bottleneck of miniaturized, intelligent chip spectrometers based on compressed sensing algorithm.

Key words: compressed sensing; spectral measurement; reconstruction algorithm; computational spectroscopy; photoelectric detection

收稿日期:2022-05-10; 修订日期:2022-06-20

作者简介:徐亦静,女,博士生,主要研究方向为微纳光学器件、表面等离子体元光子学及其应用。

导师简介:王琦龙,男,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为等离子体元光电器件、超快电子源、冷阴极微波电真空器件及碳基纳电子器件等。

0 引言

光谱仪是一种常用的光学检测仪器,通过对光谱的探测实现对物质成分的分析,具有高光谱分辨率和宽波段测量范围的特性,在航空遥感、生物医学、军事探测、农业普查、环境监测等众多领域中具有非常广泛的应用^[1-6]。光谱仪根据其工作原理大致可分为色散型光谱仪、滤波型光谱仪、调制型光谱仪和计算型光谱仪。随着应用领域的拓展,人们对光谱仪的尺寸及功耗提出了更高的要求,希望在不降低光谱仪灵敏度、探测范围等性能的基础上,构建小型化甚至微型化的光谱仪系统。目前,商品化的微型光谱仪大都采用基于元件的微型化,对传统系统结构进行空间优化,提高系统集成度,实现仪器微型化,最常见的是基于光栅色散的光谱仪以及基于干涉调制的傅里叶变换光谱仪。光栅型光谱仪的高分辨率依赖于狭缝结构,但狭缝结构也会降低入射光的光通量,导致光谱仪信噪比低、抗干扰能力差等问题;而傅里叶变换光谱仪对扰动敏感,对外部使用环境有严格的要求,并且结构复杂、价格昂贵,限制了其在民用领域的应用。因此,研究人员希望能研制出一种高性能、低成本的微型化光谱仪,而从小型化、微型化乃至近期逐步提出的芯片化的路程中,都存在以降低性能来缩减器件尺寸的问题,而随着数学理论与计算方法的发展,特别是机器学习、深度学习等算法的提出,微型化光谱仪与计算方法的结合,使得器件的性能能够满足应用的需求。

计算型光谱仪作为一种新兴的技术路线最早提出于 20 世纪 90 年代,是利用对探测目标的先验知识,从不完整的物理测量中重构探测目标的系统,该系统由光学硬件系统和计算重构算法两部分组成。通过光学系统中探测器采集的信号并非最终探测目标,但是通过重构算法求解逆问题,即可恢复探测目标。因此,计算系统可以存储更多的信息,并且比传统光学系统拥有更小的尺寸和成本。随着软件的优化、数学工具的发展、计算能力的提升,与算法结合的光谱测量已成为光谱仪微型化过程中最具有发展前景的研究方向。常见的计算方法包括主成分分析(PCA)^[7-8]、矢量量化(VQ)^[9]、截断奇异值分解

(TSVD)^[10]、Tikhonov 正则化^[11-12]、压缩感知^[13]等,其中压缩感知理论的提出打破了传统采样定理,解决了光谱数据冗余的问题,能够用有限的快速高效地重构目标信号,与传统的重构算法相比,压缩感知具有无可比拟的优势。

文中将聚焦基于压缩感知的计算型光谱仪,从压缩感知的基本原理入手,对信号的稀疏度、观测矩阵和重构算法三个方面进行了详细介绍,重点梳理了近年来基于压缩感知理论的微型化光谱测量技术的实现方法并对各方法的特点进行了分析和讨论,最后总结现有的问题和未来的发展方向。

1 压缩感知理论

2004 年, Candes 等提出了压缩感知理论,是求解欠定方程组稀疏解的一种方法^[14-15],后来随着人们对信息需求量的增加,压缩感知被广泛地应用于信号处理领域。传统的信号采样方法是基于经典的香农采样定理,为了不失真地恢复信号,采样频率应该不小于奈奎斯特频率(即信号频谱中的最高频率)的 2 倍,采集的数据量非常大且存在大量冗余,需要在采集完毕后再进行有损压缩。压缩感知可以避免这个问题,其基本概念是,如果一个信号在某个变换域是稀疏的,便可用一个与变换基不相关的观测矩阵将变换所得的高维信号投影到一个低维空间上,然后通过求解一个最优化问题,就可以从少量的投影中以高概率重构原信号^[16],理论框架如图 1 所示。因此基于压缩感知理论,只要信号是稀疏的,那么它就可以由远低于香农采样定理要求的采样点重建恢复。与传统压缩重建方法所依据信号的连续性和有限带宽相比,压缩感知重建方法利用的是信号在某个域上具有稀疏性(可压缩性)的先验信息。由于大部分信号是可稀疏性的,压缩感知理论具有广泛适用性。同时压缩感知对信号进行亚采样,再用算法消除亚采样导致的伪影,直接在采样过程中实现压缩,避免传统的先采样后压缩导致的资源浪费问题,降低了系统对数据存储和传输能力的要求。

压缩感知测量和重构的过程主要分为两个部分:信号的获取采样和信号的重构恢复。假设 x 是为长度 N 的一维原始信号,一般的自然信号 x 本身并不是

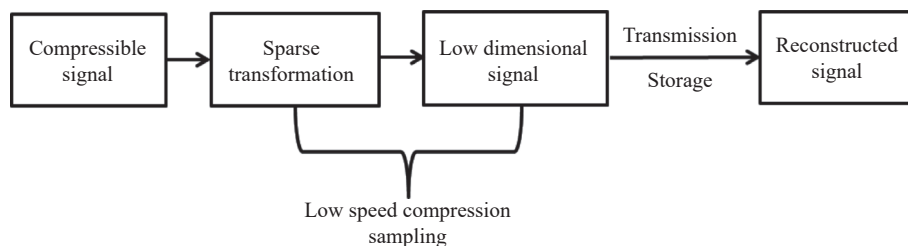


图 1 压缩感知的流程图

Fig.1 Flow chart of compressed sensing

稀疏的,需要在某种稀疏基上进行稀疏表示即 $x=\phi s$,其中 ϕ 为稀疏基矩阵, s 为稀疏度是 K 的稀疏信号。假设 ϕ 为 $M \times N (M < N)$ 的观测矩阵,对应着亚采样这一过程,将高维信号 x 投影到低维空间,则长度 M 的一维测量信号 y 可表示为:

$$y = \phi x = \phi \varphi s = \theta s \quad (1)$$

其中令 $\theta = \phi \varphi$, 即把 $\phi \varphi$ 合并成一个矩阵,称之为传感矩阵。因此,基于压缩感知的信号计算问题就是在已知测量信号 y 和观测矩阵 ϕ 的基础上,结合优化求解的算法,精确重构出原始信号 x 。压缩感知理论的核心内容主要体现在信号的稀疏表示、观测矩阵和信号重构算法三个方面。

1.1 信号的稀疏表示

自然界中的大部分信号都能在变换域上进行稀疏表示,如果当原始信号映射到变换域上时,大部分信号都为零或者趋近于零,即可认为原始信号在该变换域上是稀疏的,因此对于变换域的选择至关重要,只有合适的变换域才能保证信号的稀疏度,从而保证信号的重构精度。常见的变换域的选择有离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT)、离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT)、短时间傅里叶变换 (Short time Fourier transform, STFT)、离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 等^[17]。(1) DFT: 傅里叶变换是一种全局变换,它是以为两个方向上都无限伸展的三角信号波作为正交基函数,因此无法表述信号的局部性质,适用于确定性信号和平稳信号。(2) DCT: 类似于 DFT,但只使用实数。(3) STFT: 又称窗口傅里叶变换,在 DFT 中引入了局部化的窗函数,可提取局部信息。当窗函数取为高斯窗时,一般称为 Gabor 变换,也是最优的窗口傅里叶变换。(4) DWT: 为了更好地处理非平稳信号和分析局部信息,小波变

换将傅里叶变换中无限长的三角函数基换成了有限长的会衰减的小波基,并且针对 STFT 中窗函数灵活性差的问题,小波函数窗口的大小、形状可随频率的变化而变化,其变化规律使得小波变换具有良好的局部化特性。常见的小波函数包括 Haar 系列、Daubechies 系列、Coiflets 系列、Symlets 系列、Biorthogonal 系列等^[18],根据应用领域的不同,选择合适的小波基系列进行稀疏表示。目前,小波变换由于其优越的特性被广泛用于各种数据信号的处理,在模式识别、语音识别等方面都有较好的发展。

1.2 观测矩阵的设计

在压缩感知理论中,通过变换域得到信号的稀疏表示后,观测矩阵的设计也是一大要点,其目的在于将原始信号投影到低维的观测信号并且保证原始信息不遗漏不破坏,以便能重构出高精度的原始信号。由公式 (1) 可知,方程的个数远小于未知数的个数 ($M < N$),压缩感知可以视为在一定条件下求解欠定问题。通常欠定问题是没有确定解的,为了能够得到精确的解,Candes 等通过理论分析并推导得出确定解的约束条件,即为有限等距性质 (Restricted Isometry Property, RIP)^[19-20],其定义的公式如下:

$$(1 - \delta_k) \|x\|_2^2 \leq \|\phi x\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|x\|_2^2 \quad (2)$$

式中: δ_k 为约束等距常数,范围为 (0, 1)。 δ_k 可以看作是观测矩阵 ϕ 中 K 列组成的子集与正交矩阵的相似程度。 δ_k 越小说明观测矩阵内的任意 K 阶列向量之间的正交性越好,利用其对稀疏信号进行感知采样时,传感矩阵各列采集到的信息差异性越大,越有利于进行信号的重构和恢复。然而利用 RIP 性质作为判据来构造和优化传感矩阵是极其复杂的,不具有实际操作性。据此,Baraniuk 给出了 RIP 的等价条件^[20]: 如果观测矩阵 ϕ 和稀疏矩阵 ϕ 不相关 (即 ϕ 的行和 ϕ 的

列不能相互稀疏表示),那么传感矩阵在很大概率上满足 RIP 准则。由于稀疏矩阵是固定的,因此设计观测矩阵是关键,对矩阵的优化也主要集中在如何使其列间相关性变得更弱。观测矩阵的分类主要有两种:(1) 随机测量矩阵,例如高斯矩阵、伯努利矩阵、部分傅里叶矩阵,部分哈达玛矩阵等;(2) 确定性测量矩阵,例如托普利兹矩阵、循环矩阵、混沌序列矩阵、多项式矩阵等。压缩感知理论要求观测矩阵与信号尽可能的不相关,所以普遍采用的是性能较好的随机测量矩阵。这类测量矩阵虽然重构结果比较好,但是也存在很多不足:首先,随机矩阵具有不确定性,因此在仿真实验中需要通过大量的实验求均值的方法来降低不确定性对实验结果带来的影响;其次,在实际应用中,该类测量矩阵计算复杂度高,占用存储空间大,而且硬件难以实现。因此,确定性测量矩阵成为测量矩阵新的研究方向。确定性测量矩阵虽然能够很好的弥补硬件实现上的不足,但是该类测量矩阵同样也存在一些不足:和随机测量矩阵相比,重建效果上存在一定的差距;而且由于理论不完善,还存在应用方面的限制。因此观测矩阵的设计需要满足高性能、低复杂度、低存储量、高普适性等主要原则。

1.3 信号的重构算法

当原始信号为 K 阶稀疏且观测矩阵满足 RIP 时,就能够从低维测量信号中准确重构出高维原始信号,即求解欠定方程可得到一个最优解。压缩感知理论最后一个环节就是信号重构算法,在具体应用与实现的过程中,每一种算法针对于特定的指标来讲都不是最优的,因此选择信号重构算法时有必要做折中处理^[21],需要考虑噪声鲁棒性、计算速度、测量信号的数量等因素。若原始信号的先验信息是稀疏表示,公式(1)的逆求解问题就可以转化成求解极小化 L_0 范数问题:

$$\min \|s\|_0 \text{ s.t. } \|y - \Theta s\|_2 \leq \varepsilon \quad (3)$$

式中: $\|s\|_0$ 表示 s 中非零元素个数,即稀疏度; ε 表示噪声。但它是一个非确定性多项式问题,即求解需要将所有的可能性逐一尝试,算法的复杂度更高。因此上述极小化 L_0 范数问题并不实用。极小化 L_1 范数是最接近 L_0 的凸优化问题,具有比 L_0 更好的优化求解特性:

$$\min \|s\|_1 \text{ s.t. } \|y - \Theta s\|_2 \leq \varepsilon \quad (4)$$

目前压缩感知的信号重构算法主要分为五类^[22]:贪婪算法,凸优化算法,贝叶斯算法,非凸优化算法和暴力算法。其中,贪婪算法和凸优化算法的计算效率较高,是比较常用的算法。贪婪算法从测量矩阵中选择与信号最匹配的列向量来构建稀疏逼近,并求出信号残差,然后再选择与信号残差最为匹配的列向量,经过一定次数的迭代,求解出局部最优解。最基础的算法就是由 Mallet 提出的匹配追踪算法 (Matching Pursuit, MP)^[23],但 MP 无法保证每次迭代结果最优,导致计算效率低下,因此研究人员提出了例如正交匹配追踪算法 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[24]、分段 OMP (StOMP) 算法^[25] 和正则化 OMP (ROMP) 算法^[26] 等改进算法。凸优化算法是一种非线性优化技术,将压缩感知信号重构问题转化为极小化 L_1 范数的凸优化问题,与贪婪算法相比,其优势在于局部最优解即为全局最优解,计算重构精度更高。主要的方法包括基追踪算法 (Basis Pursuit, BP)^[27]、梯度投影稀疏重建算法 (Gradient Projection for Sparse Reconstruction, GPSR)^[28]、迭代阈值收缩算法 (Iterative Shrinkage-Thresholding, IST)^[29] 等。

2 基于压缩感知的光谱测量技术

随着压缩感知理论的不完善和发展,与其相关的研究已经渗透到广大领域,并在实际应用中发挥着重要的作用。其中,基于压缩感知的计算光学技术正是信号处理领域最前沿的研究方向,压缩感知理论中信号的采样和恢复在光谱测量领域体现在光谱的编码和解码上,解码过程即为计算重构光谱,重点在于重构算法的选择和优化;编码则是对于光学硬件系统的设计,在压缩感知理论中对于观测矩阵的选择最终要在器件上得以实现。目前,编码光谱信息的途径主要分为两种:复杂光谱-空间映射技术和光谱响应技术^[30-32]。传统的色散元件利用光谱域到空间域的一一映射关系可直接在探测器上读出光谱,而这对于分光效率要求极高,在微型化设备中很难实现高性能的分光,因此限制其光谱分辨率。复杂光谱-空间映射技术提供了一种解决方案,即构建一个色散元件将不同波长的光按照不同比例传输到不同探测器单元^[33],

从而确定光谱-空间映射矩阵,最后利用压缩感知技术通过少量探测器单元实现高精度的光谱重构,常见的光学系统包括多模光纤^[34-38]、多模波导^[39-40]、无序光子结构^[41-42]、色散孔阵列^[42]等。另一种编码技术是为每个探测器单元定制不同的光谱响应,即通过在探测器顶端集成滤波光学元件,构建光谱响应矩阵。如果考虑到设计和制造光谱系统的复杂度和成本,光谱域编码的压缩感知光谱测量技术更具有优势,可以避免波导在平面布局的限制,与探测器的集成更加直接,有望实现芯片化的光谱探测系统。近年来,基于光谱域编码的压缩感知光谱测量技术的发展较快,其中光谱编码器件的选择和设计包括常见的滤光片类型,如可调谐滤波器^[43-53]、法布里-珀罗(FP)标准具阵列^[54-57]、光学薄膜^[58-60]等。一些新型纳米光子材料也被应用于压缩感知光谱测量中,如光子晶体板^[61-66]、量子点^[67-69]、等离子体^[70-75]、纳米线^[76-79]等。

2.1 基于可调谐滤波器的压缩光谱测量

根据可调谐滤波器滤波原理的不同主要可分为两种:一种是基于外部微扰与入射光场之间的模式耦合,例如声光可调谐(AOTF)^[45-46]、电光可调谐^[47-48]以及磁光可调谐^[49]滤波器,另一种是基于光干涉的滤波作用,最典型的就是FP腔可调谐滤波器^[50-52]。它们的共同点在于利用动态的物理场调控光谱,能在不同时间段分离不同的光谱。在过去的十几年中,随着压缩感知算法的出现、发展和广泛应用,结合日趋成熟的微机电系统(MEMS)和微光机电系统(MOEMS)的制造技术,可以研制具有精细光谱分辨率和宽光谱探测范围的微型光谱仪。

在可见光波段, August 等首次提出了一种基于液晶可变相位延迟器的压缩感知光谱测量系统^[80],在 10% 的采样率下利用两步迭代阈值收缩(TwIST)算法实现 400~796 nm 范围内 0.4 nm 的光谱分辨率,如图 2(a) 所示,该光谱仪由单个液晶相位延迟器和单个

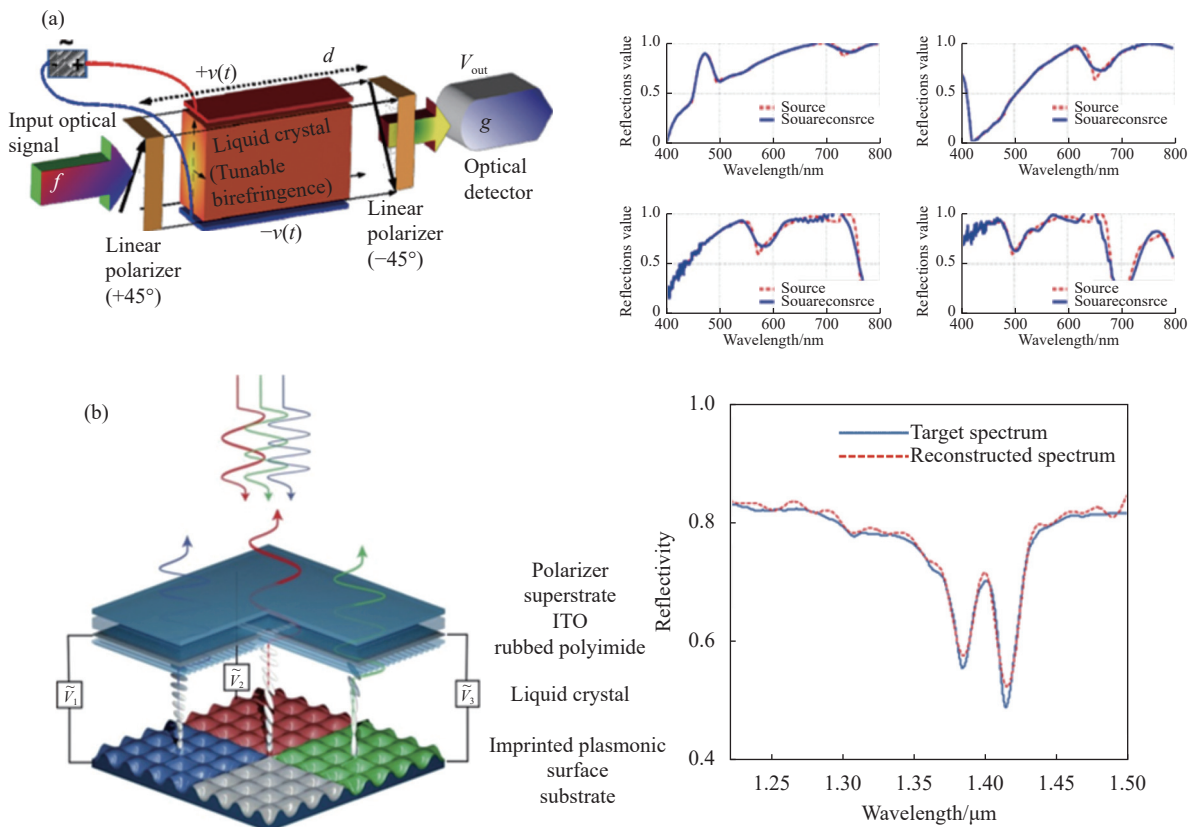


图 2 基于液晶电光效应的计算型光谱仪。(a) 液晶可变相位延迟器的光谱测量系统示意图及重构光谱^[80]; (b) 液晶可调谐滤光片结构示意图及重构光谱^[81]

Fig.2 Computational spectrometer based on liquid crystal electro-optic effect. (a) Schematic diagram of liquid crystal variable phase retarder spectral measurement system and reconstructed spectra^[80]; (b) Schematic diagram of liquid crystal tunable filter structure and reconstructed spectrum^[81]

光探测器组成,与传统光谱仪相比,减少了系统的规模和复杂性以及信号采集时间,适用于微型化高效光谱仪的设计。在近红外波段,中国科学院汪琪等人提出了一种基于液晶可调谐滤光片(LCTF)的压缩感知光谱测量方法^[81],选取冗余基作为稀疏基,稀疏贝叶斯估计(MSBL)算法作为压缩感知重构算法,利用 32 个 LCTF 采样测量值在 1200~1520 nm 之间实现 2.5 nm 的重构波长精度,如图 2(b)所示,可见重构光谱与原始光谱基本符合,谱线中的尖锐峰值得到了明显的区分,这将推动 LCTF 在超分辨光谱测量领域的发展。

在 LCTF 发展的同时,FP 腔因结构简单、易制备、响应快等优点而备受关注。2017 年, Oiknine 提出了基于 FP 谐振腔的压缩感知光谱测量系统^[52],如图 3(a)所示,利用压电驱动器改变 FP 腔腔长以此改变干涉条件来实现对入射光谱的调制,通过使用 TwIST 算法分别重构不同类型的光谱信号,实现在可见光范围内压缩比约为 1 : 13 的光谱重构。考虑到

FP 腔在工作过程中难以保证两平面反射镜之间的绝对平行,中北大学吴笑男设计了一种基于 FP 标准具阵列的压缩感知光谱探测系统^[57],如图 3(b)所示,通过设计满足 RIP 约束条件的 1×19 的 FP 微阵列,经过 TwIST 算法重构可以得到压缩比约为 1 : 37 的原始光谱数据,实现 400~700 nm 范围内的高光谱分辨率。

综上所述,微型化的可调谐滤波器技术原理简单,应用广泛,但在其发展中也存在以下不足:通过 MEMS 工艺制造的可调谐 FP 腔滤波器对两个腔镜的表面光洁度和光学反射率要求极高,制作工艺复杂、难度大、成本高,由于使用机械的调谐方式,其调谐速度只达到毫秒级,调谐速度较慢,同时 FP 谐振腔对振动干扰敏感,两镜面会因为静电牵引而产生弯曲变形,无法保持相对移动过程中的平行度,因此会考虑使用 FP 标准具阵列或楔形 FP 滤波器,而且金属反射镜层具有较高的损耗,导致较低的透射率和信噪比,影响光谱分辨率,可以考虑用介质反射镜或分布式布拉格反射镜来替代或是用算法来弥补。

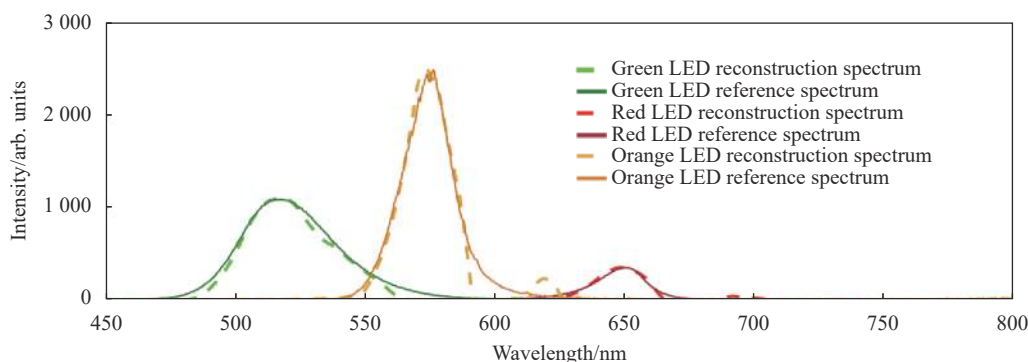


图 3 基于 FP 腔的计算型光谱仪。(a) 压电 FP 腔光谱测量系统示意图及重构光谱^[52]; (b) FP 微阵列滤光片结构示意图和 FP 腔两种不同的光谱响应及重构光谱^[57]

Fig.3 Computational spectrometer based on FP cavity. (a) Schematic diagram of piezoelectric FP cavity spectral measurement system and reconstructed spectra^[52]; (b) Schematic diagram of FP microarray filter and two different spectral responses of FP cavity and reconstructed spectra^[57]

2.2 基于光学薄膜的压缩光谱测量

薄膜干涉是自然界生物结构色最大的来源^[82-83],当光线入射到单层膜上时,薄膜上表面的反射光与下表面反射再折射的光相干,可以对特定波长光有加强效果,当薄膜层数增加时,相干性会逐渐增强。通常薄膜光学滤波器是由多层高低折射率介质沉积在衬底上组成,通过改变层数、每层的厚度和介质折射率,由于光的干涉原理其透射率会随着波长而变化。

由压缩感知理论可知,具有随机透射率的观测矩阵重构结果较好,据此, Oliver 等采用光学薄膜作为滤光器件结构,通过改变薄膜每一层的厚度(即不是传统的固定的四分之一波长厚度)产生随机透射率矩阵,利用压缩感知实现 300~700 nm 波长范围内 0.99 nm 的光谱分辨率,证明使用随机透射率的滤光片是一种提高微型光谱仪分辨率的方法^[58]。如图 4(a)所示,研究人员选择了 40 个厚度不同的双层薄膜滤

光片,其厚度是随机的,由此生成的滤波器的透射函数也是随机的,其自协方差函数是类狄拉克分布而交叉协方差函数也非常小,这表明每个滤波器在一个波长的传输与其他波长的传输完全不相关且每个滤波器的透射函数与其他滤波器的透射函数也是互不相关的。不过由于层的厚度和材料折射率的限制,随机透射滤波器阵列的实现只在实验室进行,在实际应用中难以大规模生产,考虑到制作的难度和误差, Lee 等提出了更加切实可行的低相关性薄膜滤光片设计,在 500~1100 nm 的范围内使用 64 个滤波器可以实现 5 nm 的光谱分辨率^[60]。如图 4(b) 所示,

选择高低折射率差大的材料 SiN_x 和 SiO_2 以及适当的层数来扩大探测范围,每个滤光结构被设计成不同厚度的层来降低观测矩阵列之间的相关性,该方案同样可以提高分辨率,虽然在高噪声水平下,恢复的光谱效果会有所下降,但对于非高精度的仪器其性价比更高。

基于薄膜滤光的光谱仪具有低成本、小型化、可便携性等优势,但多层薄膜的干涉现象限制了此类光谱仪在探测范围和分辨率上的进一步发展,同时此类光谱仪还存在制备方法复杂、成本昂贵、工艺难度大,难以实现工业化大规模生产等问题。

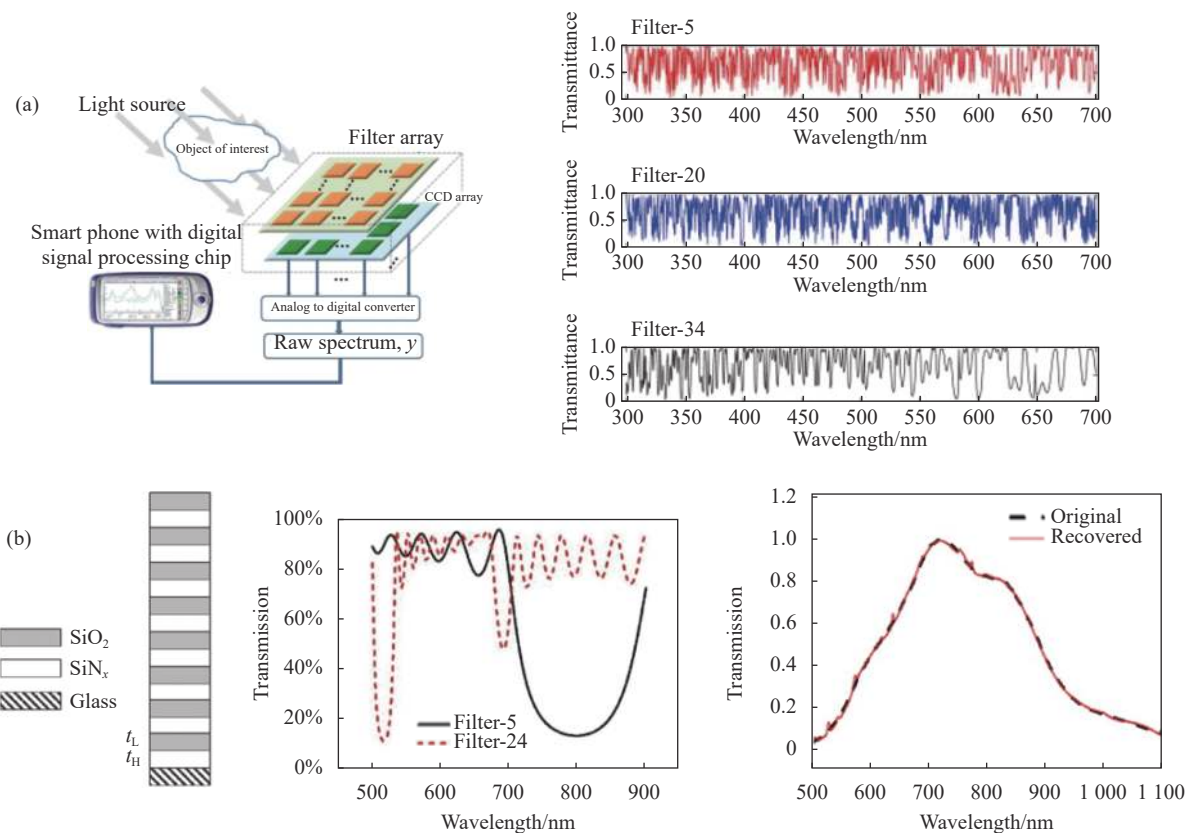


图 4 基于光学薄膜的计算型光谱仪。(a) 薄膜滤波器阵列光谱仪原理图及产生的随机透射率^[58]; (b) 多层介质滤波器结构示意图和两种不同的透射光谱及重构光谱^[60]

Fig.4 Computational spectrometer based on optical thin film. (a) Schematic diagram of thin-film filter array spectrometer and its random transmittance^[58]; (b) Schematic diagram of multilayer dielectric filter structure and two different transmission spectra and reconstructed spectra^[60]

2.3 基于光子晶体的压缩光谱测量

光子晶体是由不同相对介电常数的材料空间周期性分布而形成的,由于其光子禁带和光子局域的特性,是可以用于制作高性能光学器件的一种新型材

料^[84-86]。当在周期性光子晶体中引入其他介质或结构时,会使光子晶体的光子禁带中出现缺陷,而频率处在缺陷态内部的光会穿过光子晶体,这一特性可以用来制作滤光片^[87],通过设计不同周期性、不同形状

或不同介质材料来改变光子晶体的结构,从而改变其光学特性,既可以实现高品质因子的窄带滤波函数,也可以实现近似于随机响应的复杂滤波函数,借助压缩感知理论进行光谱信号重构。

为了研究光谱分辨率与光子晶体阵列数和窄带滤波函数的关系, Bryan 等之前工作的基础上提出了将最初的 9 个光子晶体周期阵列扩展到 17 个,在考虑噪声的情况下,用离散一阶导数正则化算法重构了 450~700 nm 可见光范围内的各种 LED 光谱,实现

了改进的光谱重构^[64],如图 5(a) 所示。同时经过模拟仿真发现,当光子晶体阵列的数量达到一定阈值后,光谱响应函数将取代其成为影响分辨率的主要因素,如果预期达到 10 nm 的光谱分辨率,则需要 50 个光子晶体阵列,每个阵列的响应函数宽度为 5 nm。除了窄带滤波,光子晶体的复杂宽带滤波也可实现高光谱分辨率,由第 2 节的内容可知,压缩感知的性能依赖于观测矩阵的随机性,传统的干涉仪难以实现多种谱线形状和多样化频谱特征的光谱响应并保证不同光

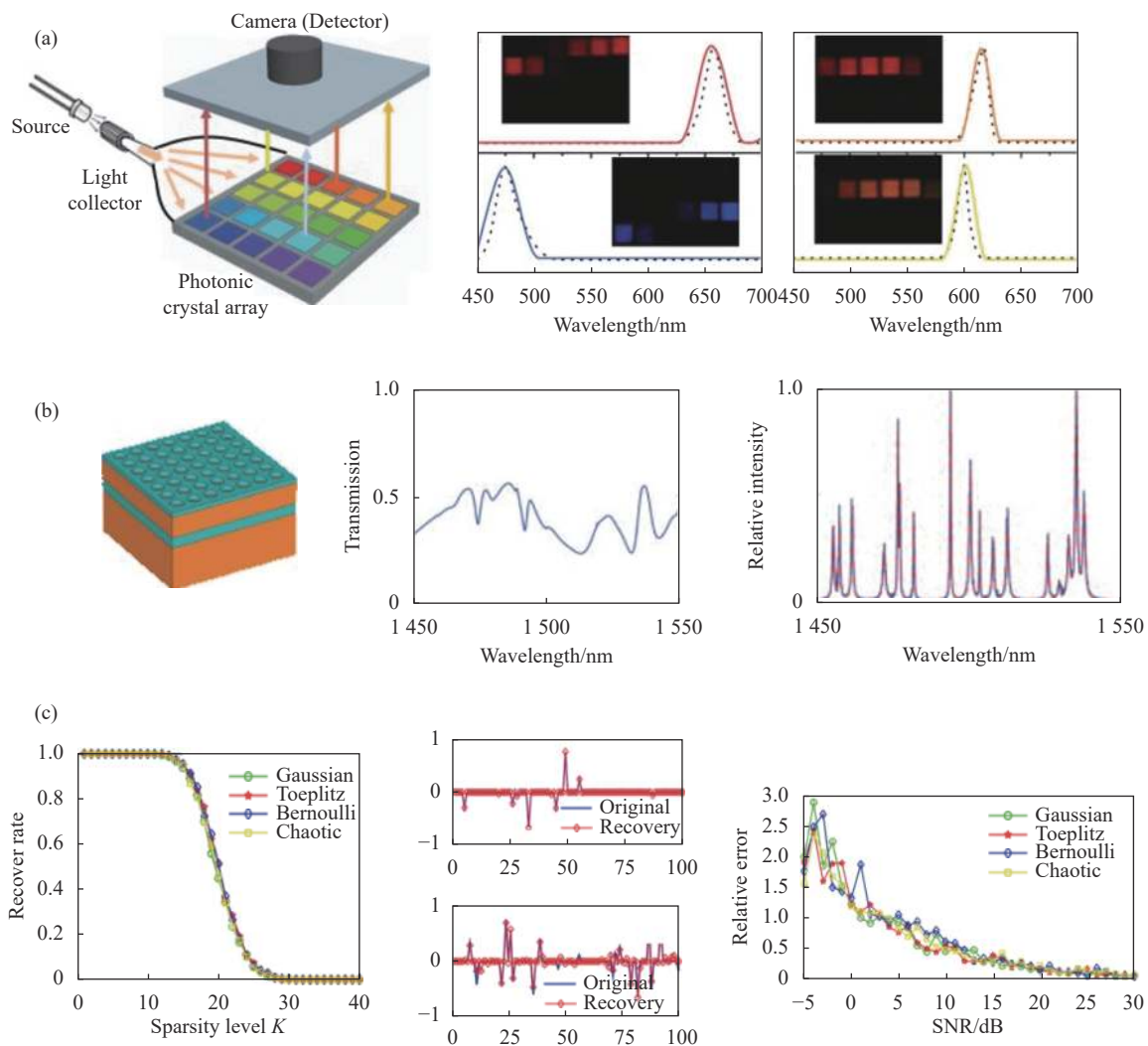


图 5 基于光子晶体的计算型光谱仪。(a) 光子晶体光谱仪工作原理示意图及各种 LED 光谱的重构^[64]; (b) Si 孔光子晶体板结构示意图及透射光谱和多条洛伦兹线重构信号^[65]; (c) 不同观测矩阵的光谱信号恢复率和相对误差及稀疏度为 10 和 20 的光谱重构^[66]

Fig.5 Computational spectrometer based on photonic crystal. (a) Schematic diagram of photonic crystal spectrometer and reconstructed spectra of LED^[64]; (b) Schematic diagram of Si-hole photonic crystal plate structure and its transmission spectrum and multiple Lorentz line reconstructed signals^[65]; (c) Spectral signal recovery rate and relative error of different observation matrices and reconstructed spectra with sparsity of 10 and 20^[66]

谱响应函数间的最小相关性,而光子晶体结构在空间参数的巨大自由度可提供丰富的光谱响应特征。美国威斯康星大学 Wang 等设计了不同的纳米结构(Si 孔/SiO₂/ Si/SiO₂),其界面对光的多次反射提供了压缩感知所需的具有近似于随机分布的光谱特征,利用 400 个光子晶体阵列实现了 1450~1550 nm 近红外光谱波段 0.1 nm 的光谱分辨率^[65],如图 5(b)所示,验证了此类宽带滤波结构在微型化器件尺寸下实现高分辨率的可行性。由于压缩感知理论要求的高度随机的亚采样在硬件实现中是昂贵的,因此研究人员选择尝试易于硬件实现的混沌序列矩阵构造技术。西南大学 Guo 等提出了利用硅基光子晶体微腔构造混沌序列矩阵,并利用其对一维波形进行了测试^[66],如图 5(c)所示。研究表明该结构耦合非线性的物理原理产生非重复的混沌波形,每 50 个混沌波形中取一个采样点构造的传感矩阵高概率满足 RIP,在信号包含强噪声时表现出良好的鲁棒性,通过与高斯、伯努利和托普利兹随机矩阵比较,得到类似的重构效果,并且完全兼容 CMOS 工艺,易于制造在芯片上。

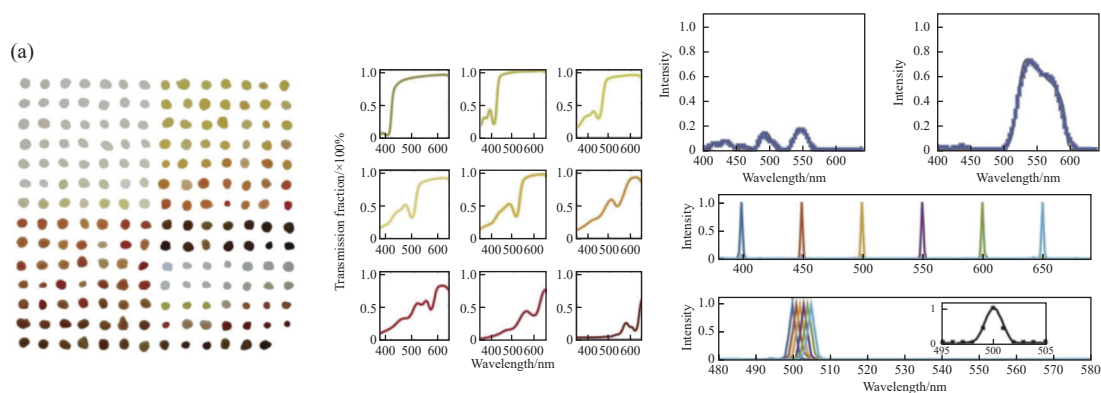
光子晶体由于其光子带隙对光子的影响类似于半导体能带隙对电子的影响而成为最有前途的光操纵材料之一,光子晶体周期性的纳米结构允许光在其中多次反射和折射,会影响较宽的光谱范围内的光程,产生非常丰富光谱特征。与传统的光栅光谱仪相比,光子晶体光谱仪具有体积小、工作波段范围宽和成本低等多种优势。

2.4 基于量子点的压缩光谱测量

量子点是一种由 II~VI 族或 III~V 族元素组成的尺寸在 1~100 nm 之间的纳米微粒^[88]。量子点独特的

光学性质基于量子尺寸效应的存在,通过控制量子点的大小和形状,可以改变其吸收光谱范围,量子点连续可调谐的带隙为微型光谱仪中滤波器的选择提供了一个方案,只需改变量子点的组成、大小和形状,就可以获得从深紫外到中红外波长范围内的吸收光谱,是一种理想的宽带滤光材料。

2015 年, Bao 等首次通过胶体量子点组成二维吸收滤光片阵列与传感器集成,并借助压缩感知理论还原 390~690 nm 可见光范围内的原始光谱,用低采样实现 3.2 nm 的高分辨率的光谱测量^[67],如图 6(a)所示。胶体量子点光谱仪基于波长复用原理,同时对多波段进行测量和编码,其阵列结构由 195 种不同的量子点组成,通过改变量子点的大小和组成(硫化镉 CdS, 硒化镉 CdSe)实现每个量子点滤光片不同的透射光谱。北京理工大学 Li 等人构建了一个基于硫化铅 PbS 和硒化铅 PbSe 量子点的光谱仪,将探测的光谱范围由可见光扩大至近红外区域,利用全变分算法在 900~1700 nm 的宽光谱范围内实现 6 nm 左右的光谱分辨率^[68],如图 6(b)所示,通过在石英板上排列 195 个 PbS 和 PbSe 量子点,根据其不同的带隙表现出不同的吸收峰,从而对非吸收波长的光具有良好的透射率。2020 年, Zhu 等研制了 MA₃Bi₂X₉ 和 Cs₂SnX₆ (MA = CH₃NH₂; X = Cl, Br, I) 钙钛矿量子点取代传统量子点的光谱仪,利用全变分优化算法实现了在 250~1000 nm 的紫外-可见-近红外波段内 1.6 nm 的光谱分辨率^[69],如图 6(c)所示。通过将 361 种钙钛矿量子点组成的滤波器阵列与 CCD 阵列集成,其中原位制备的钙钛矿量子点嵌入薄膜具有高透光率效率、宽可调性光谱和易于制备的优势,可实现超出人眼识别的光谱范围和光谱分辨率。



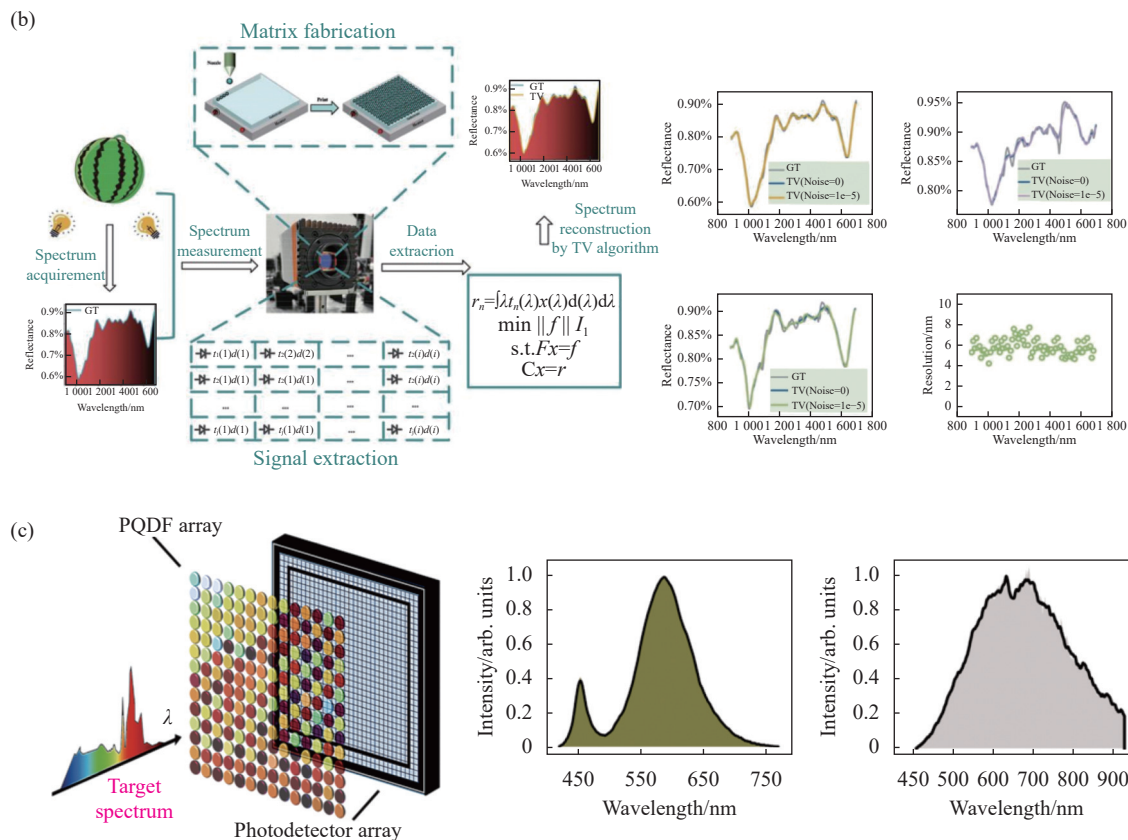


图 6 基于量子点的计算型光谱仪。(a) 胶体量子点滤波器结构和透射光谱及重构的随机和单色光光谱^[67]; (b) 近红外量子点计算型光谱仪工作过程示意图及重构光谱^[68]; (c) 钙钛矿量子点光谱仪结构示意图及其重构光谱^[69]

Fig.6 Computational spectrometer based on quantum dots. (a) Structure and transmission spectra of colloidal quantum dot filter and reconstructed spectra of random and monochromatic light^[67]; (b) Schematic diagram of NIR quantum dot computational spectrometer and reconstructed spectra^[68]; (c) Schematic diagram of perovskite quantum dot spectrometer and reconstructed spectra^[69]

量子点光谱仪是一种极具发展潜力的高性能微型光谱仪，它的光谱范围和光谱分辨率与量子点的吸收光谱相关，只需改变不同量子点的数量即可相应变化，与传统窄带滤波光谱仪相比，具有结构简单、成本低、系统集成度高等优势。但镉铅元素的量子点对人体和环境具有严重的危害性，且量子点光致发光的特性会影响光谱仪的性能，因此开发具有精确可控光谱、无发光特性和环境友好的量子点光谱仪是未来的方向。

2.5 基于纳米线的压缩光谱测量

除了将上述结构作为滤波器阵列与光电探测器阵列集成的微型光谱仪的研制，研究人员还考虑到是否可以将光谱滤波和探测功能组合成一个独立的组件，并结合算法推动高光谱分辨率的微型光谱仪的发展。2019年，剑桥大学 Yang 等展示了一种基于单一

纳米线的微型光谱仪^[78]，光谱仪的整个有源元件可以被缩小到几百纳米宽和几十微米长，且不需要其他复杂的光学元件，如图 7(a) 所示，具有宽空间成分梯度的半导体 CdS_xSe_{1-x} 纳米线经过外延生长处理并且在纳米线上利用电子束光刻技术制造平行 In/Au 电极阵列，其组成和光谱响应沿其长度变化，通过探测光子吸收电流并结合算法，精确地重构光谱。该光谱仪工作波长范围和分辨率主要受到纳米线材料成分和生长工艺的限制，考虑到工艺复杂度和成本，为此，墨尔本大学 Meng 等设计了一个基于硅纳米线阵列的芯片级光谱仪^[79]，其光谱响应覆盖，其光谱响应覆盖了 400~800 nm 的整个可见光波段，如图 7(b) 所示。该芯片上每个像素点都由垂直方向的硅纳米线 (P 型/本征/N 型硅) 组成，堆叠在平面光电探测器 (N 型/本征/P 型硅) 上，每个硅纳米线结构结合了波长选择和光

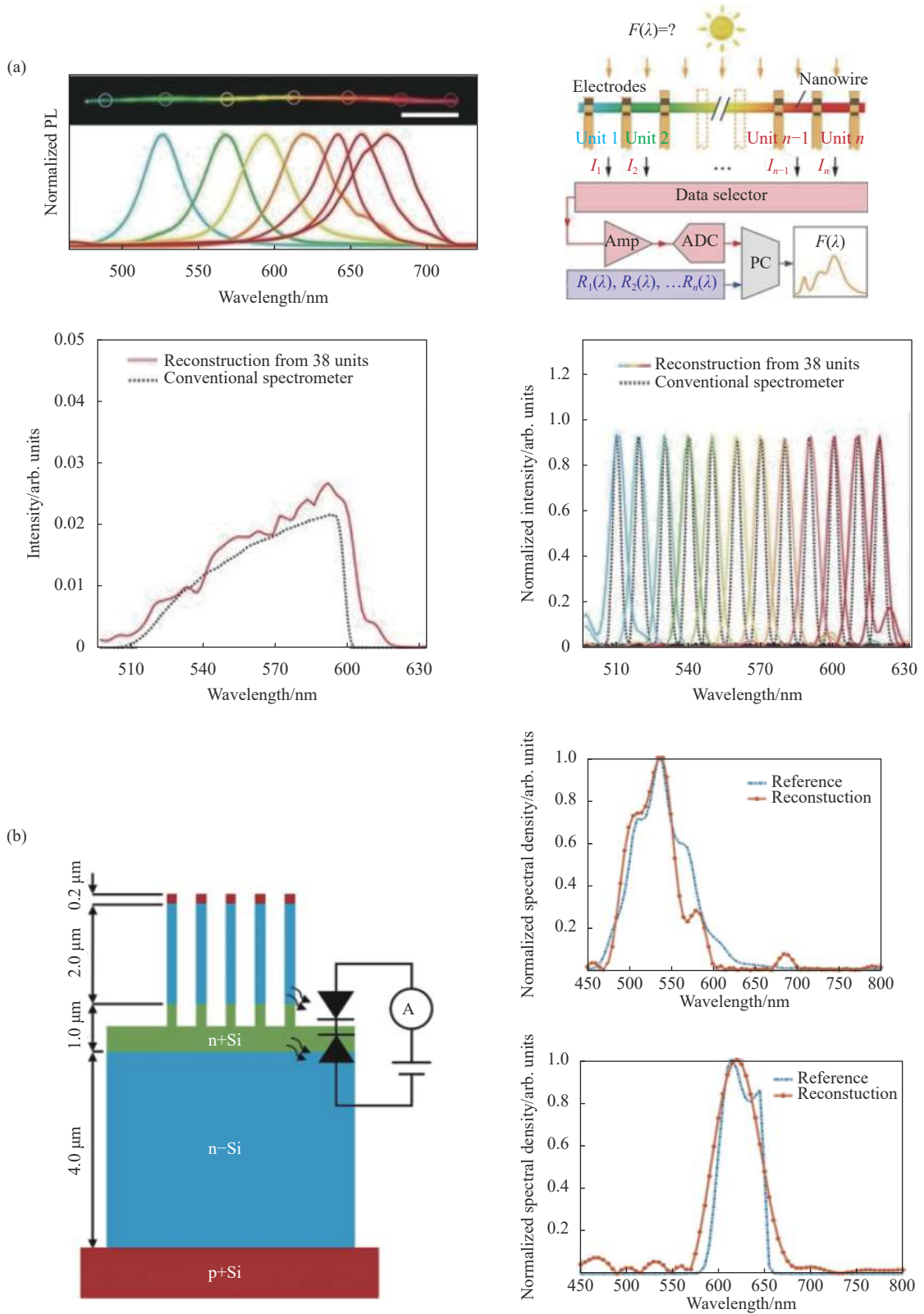


图 7 基于纳米线的计算型光谱仪。(a) 成分梯度纳米线光谱仪结构示意图及重构光谱^[78]; (b) 硅纳米线阵列结构示意图及重构光谱^[79]

Fig.7 Computational spectrometer based on nanowire. (a) Schematic diagram of composition gradient nanowire spectrometer and reconstructed spectra^[78]; (b) Schematic diagram of silicon nanowire array structure and reconstructed spectra^[79]

谱探测的功能,通过控制纳米线半径来改变响应光谱,从实际制造的角度来讲,这比沿着纳米线的轴向位置精确改变成分更容易实现。

基于纳米线结构的光谱仪是将滤波与探测功能组合成一个单一的结构,即设计具有不同波长响应的光电探测器,并结合算法实现微型化的光谱仪。未来可以利用多种方法来设计纳米线结构,例如非周期纳米线阵列或径向无序纳米线等,以得到更加多样化的响应光谱,从而改善光谱重构。此外,还可以将探测光谱范围扩宽,例如考虑用 Ge 或 InP 替代 Si 材料,使之在红外范围也得以应用。

2.6 基于表面等离子激元的压缩光谱测量

表面等离子激元是存在于金属和介质分界面的集体电荷振荡,具有近场增强、亚波长约束、突破衍射极限等光学特性^[89-90],可以实现在纳米级尺寸下对光的传输和操控。近年来,有关等离子体阵列结构的微型光谱仪的研究也是一个热点,等离子体滤光片的工作原理是基于表面等离子激元光学中的异常透射(EOT)现象^[91-92],通过设计等离子体纳米结构,如纳米孔或纳米狭缝阵列,光照射激发出波长相关的表面等离子体共振,导致在亚波长范围内光的透射增强,因此可以取代传统的滤光器件^[93]。

2011年,Chang等首次提出了用稀疏表示进行模板选择的概念,将压缩感知算法引入基于等离子体滤波阵列的芯片级光谱传感器^[72]。如图8(a)所示,该结构在一个CMOS传感器上集成了195个等离子体滤波器,测量光谱范围为400~1000 nm,并且每个滤波器的透射函数是非类狄拉克函数。通过在金属薄膜上引入纳米级结构,透射波长由单层上的横向结构控制,而单层等离子体金属结构可以使用刻蚀和纳米压印等工艺直接在CMOS传感器晶圆上进行加工,这使得制造成本降低,这项工作验证了采用低成本光谱传感器阵列制造芯片级微型光谱仪的可行性。2019年,美国莱斯大学Cerjan等设计了一种基于铝光栅阵列的 μm 尺度中红外光谱仪,利用凸优化算法使光谱分辨率高于香农-奈奎斯特定律的极限分辨率,能够准确地重构分辨率为40 nm的输入光谱^[73],如图8(b)所示,通过在300 nm厚的铝膜上用电子束光刻出间隔范围为1250~3600 nm的20个不同的光栅阵列结构,由于每个光栅阵列的间距不同,它们的光谱响应曲线

也不同。其制作简单,价格便宜,可在室温下工作,为开发便携式的微型化片上红外光谱仪提供了一种方法,并且在环境监测、生物传感和化学成像等领域有广阔的应用前景,但其光谱分辨率依然不够精细,为此暨南大学纳米光子学研究所提出了一种新型的中红外等离子体气体传感器,在L1最小化算法的帮助下,利用窄带传感器阵列实现具有0.01 nm超高光谱分辨率的片上光谱测量^[74]。如图8(c)所示,多层堆叠(Au/Si₃N₄/VO₂/Si₃N₄)涂层的亚波长周期性光栅结构只需改变其周期便可实现可调谐的吸收波长,通过设计80个气体传感器构成阵列,每个传感器检测一定波长范围内的目标气体吸收光谱信号,最终可以重建CO₂分子吸收光谱,该系统有望取代价格昂贵、体积庞大的傅里叶变换红外光谱仪,用于制造有气体识别功能的便携式装置。为了进一步扩展光谱探测范围,墨尔本大学Benjamin等成功演示了利用递归最小二乘法重构从短波到长波的1.5~19 μm 范围内的红外光谱^[75],如图8(d)所示,每一个滤波器由无掺杂硅衬底上的正方形金块组成,其大小为周期的一半,滤波器周期范围为0.25~6 μm ,总共116个滤波器。其重构结果与傅里叶变换红外光谱仪直接测量的光谱基本一致,验证了在更广泛的光谱范围内实现光谱仪微型化的可行性。笔者课题组在微型化光谱仪的研究中提出了利用微纳结构与光学腔体形成模式共振的方式构建分光系统,结合商用光电探测器(CMOS器件或CCD器件),实现入射光谱的有效探测及分辨。而据此设计的一种基于六角分布型银纳米圆盘阵列超表面结构,其结构如图8(e)所示,此光谱分辨探测器对入射光谱具有高灵敏、高分辨、高探测效率等优点,进一步结合压缩感知算法时,能够有效的重构原始入射光谱的特性信号峰,并有望实现1 nm特征入射信号的读取。在此研究基础上,课题组针对基于超表面结构的片上式光谱重构系统提出了理论模型及框架图。

基于表面等离子激元滤光片的光谱仪相较于FP腔、光子晶体、量子点等结构其优势在于制造的复杂性和成本有所降低,通过改变金属纳米图案的结构参数来调制入射光的性能,更易于实现,而压缩感知算法的引入也解决了该结构低Q因子导致低光谱分辨率的问题,是极具发展前景的高性能微型光谱仪。不过,

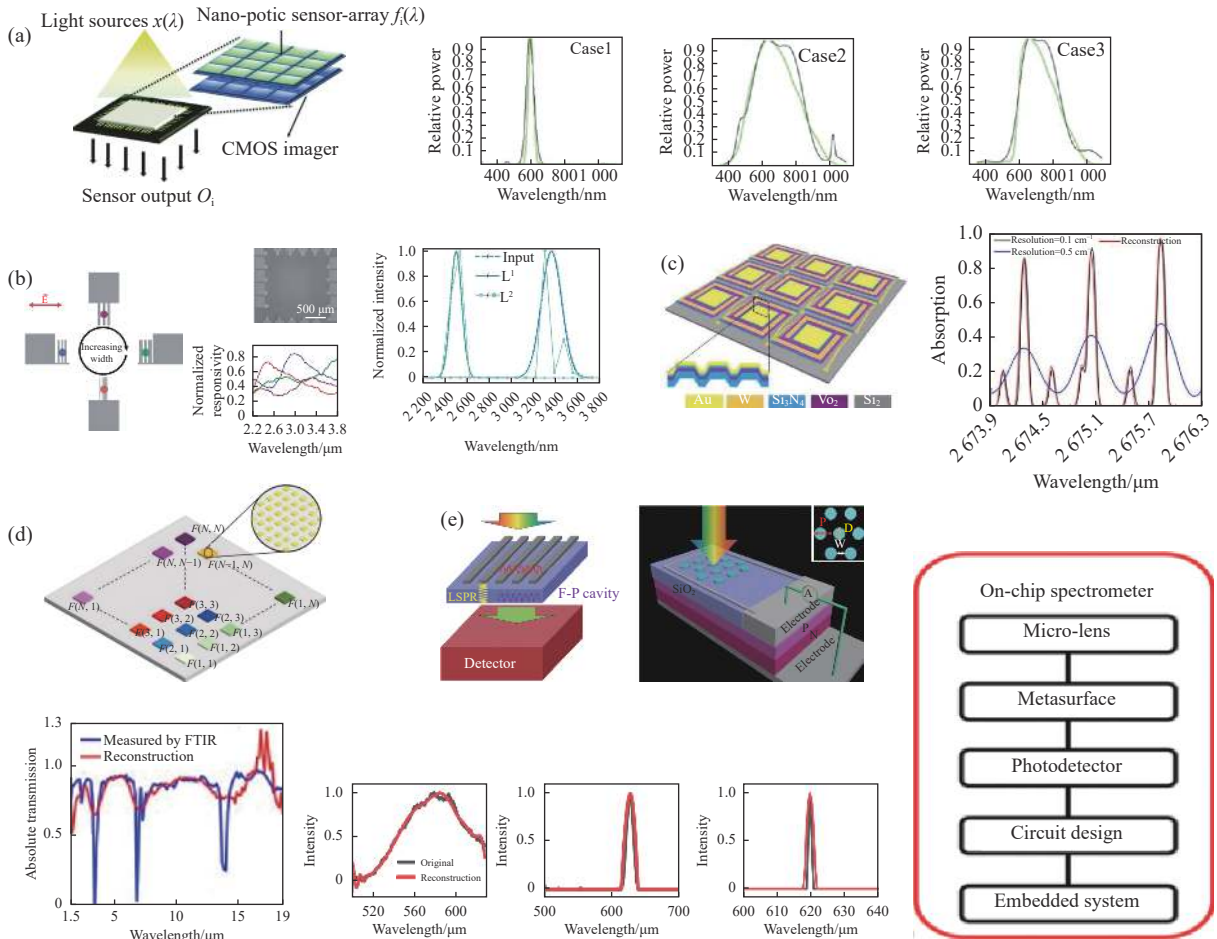


图 8 基于等离子体的计算型光谱仪。(a) 等离子体滤波阵列光谱传感器原理图和重构光谱^[72]；(b) 铝纳米光栅阵列结构示意图和其光谱响应曲线及重构光谱^[73]；(c) 片上中红外气体传感器阵列结构示意图及重构 CO₂ 分子吸收光谱^[74]；(d) 金纳米正方形滤波器阵列结构示意图及重构聚乙烯光谱^[75]；(e) 金纳米圆盘阵列结构示意图及其重构随机光谱

Fig.8 Computational spectrometer based on plasmon. (a) Schematic diagram of plasmon filter array spectral sensor and reconstructed spectra^[72]; (b) Schematic diagram of aluminum nano-grating array structure and its spectral response curve and reconstructed spectrum^[73]; (c) Schematic diagram of on-chip mid-infrared gas sensor array and reconstructed spectrum of CO₂ molecular absorption^[74]; (d) Schematic diagram of gold nano-square array and reconstructed spectrum of polyethylene^[75]; (e) Schematic diagram of gold nano-disk array structure and reconstructed spectra

大多数周期性等离子体结构中存在量子效应，研究人员试图在减小器件尺寸的同时增加光的耦合效率，如何制造这样的结构是未来工作中亟待解决的问题。

3 总结与展望

综上所述，随着不断提高的科研水平和扩大的应用领域对光谱仪器的性能提出了更高要求，研究人员也在不断探索一种具有高分辨率、宽光谱范围和小尺寸的微型化光谱测量系统。随着光谱重构算法的成熟，光谱仪微型化过程中带来的性能损失情况能得到很大改善，基于压缩感知理论的光谱测量技术是近年

来一个具有良好发展前景的研究领域。但在未来研究过程中仍然需要考虑以下几个方面：(1) 微型化的实现手段：开发微型化光谱仪已经是大势所趋，而微型化的需求增加了原始探测器单元的复杂性，开发光谱分辨和探测一体化的纳米结构是一个发展趋势^[94-95]；(2) 高性能的特性需求：由于空间分辨率和光谱分辨率两者存在矛盾，随着光谱仪尺寸的减小，在保证空间分辨率的情况下，减少探测器数量会限制光谱分辨率，此外，将微型光谱仪尺寸缩小到芯片级会削弱光与物质的相互作用，从而降低灵敏度，提高探测器的信噪比是一个重要的研究方向^[96]。同时应用

环境也必须考虑到外部因素,如温度、空气成分变化和振动等,这些都会影响光谱仪的正常工作^[97-98],提高器件的工作稳定性也将是微型化光谱要面临的挑战;(3)成熟化的算法应用:在计算型光谱仪中,算法软件的设计和硬件的优化是同步进行的,需要综合考虑采样光谱的数量、光谱响应函数的多样性和噪声等多方面因素,保证算法所需的数据能够通过光谱测量得到,从而实现更加精确的光谱重构。随着计算能力的不断提升,深度神经网络算法^[99-101]、深度迁移学习^[102-103]等机器学习的方法被用来在测量值和重构光谱之间建立更准确的关系,可以用于重构随机光谱或噪声等非结构性光谱信号,提高压缩感知理论的普适性。

参考文献:

- [1] Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 227-248.
- [2] Whitmore L, Wallace B A. Protein secondary structure analyses from circular dichroism spectroscopy: Methods and reference databases [J]. *Biopolymers*, 2008, 89(5): 392-400.
- [3] Perr J M, Furton K G, Almirall J R. Solid phase microextraction ion mobility spectrometer interface for explosive and taggant detection [J]. *Journal of Separation Science*, 2005, 28(2): 177-183.
- [4] Elmore A J, Shi X, Gorence N J, et al. Spatial distribution of agricultural residue from rice for potential biofuel production in China [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2008, 32(1): 22-27.
- [5] Bacon J R, Butler O T, Cairns W R L, et al. Atomic spectrometry update - a review of advances in environmental analysis [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2020, 35(1): 49-53.
- [6] Shang J, Meng Q L, Huang R S, et al. Nondestructive testing of kiwifruit quality and maturity by fiber optic spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1190-1198. (in Chinese)
- [7] Su Y, Liao Y-X, Guo Y-L. Extraction of individual component spectra in gas chromatograph coupled with ion trap mass spectrometer by principle component analysis [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2007, 65(14): 1377-1380.
- [8] Shi Z, Wang Q L, Peng J, et al. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations [J]. *Science China-Earth Sciences*, 2014, 57(7): 1671-1680.
- [9] Huang C M, Bi Q, Stiles G S, et al. Fast full search equivalent encoding algorithms for image compression using vector quantization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1992, 1(3): 413-416.
- [10] Srivastava M, Freed J H. Singular Value Decomposition Method To Determine Distance Distributions in Pulsed Dipolar Electron Spin Resonance: II. Estimating Uncertainty [J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2019, 123(1): 359-370.
- [11] Wang P, Menon R. Computational spectroscopy via singular-value decomposition and regularization [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21541-21550.
- [12] Chang C-C, Lee H-N. On the estimation of target spectrum for filter-array based spectrometers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1056-1061.
- [13] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-306.
- [14] Candes E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [15] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [16] Lan R M. Single-photon counting spectral measurement based on compressed sensing [D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [17] Wang Z Q. Research on compressed sensing of diseased image data based on C++ [D]. Xi'an: University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] Jiao L C, Tan S. Multiscale geometric analysis of image: Review and prospect [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003(S1): 1975-1981. (in Chinese)
- [19] Baraniuk R, Davenport M, Devore R, et al. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices [J]. *Constructive Approximation*, 2008, 28(3): 253-263.
- [20] Baraniuk R G. Compressive sensing [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4): 118-121.
- [21] Wang S. Research on compressed sensing spectral measurement based on electro-optic regulated transmissivity coding [D]. Taiyuan: North University of China, 2020. (in Chinese)
- [22] Tropp J A, Wright S J. Computational methods for sparse solution of linear inverse problems [J]. *Proceedings of the*

- IEEE*, 2010, 98(6): 948-958.
- [23] Mallat S G, Zhang Z F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [24] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [25] Donoho D L, Tsaig Y, Drori I, et al. Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(2): 1094-1121.
- [26] Needell D, Vershynin R. Signal recovery from Incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(2): 310-316.
- [27] Kim S-J, Koh K, Lustig M, et al. An interior-point method for large-scale $l(1)$ -regularized least squares [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(4): 606-617.
- [28] Figueiredo Ma T, Nowak R D, Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(4): 586-597.
- [29] Wright S J, Nowak R D, Figueiredo M a T. Sparse reconstruction by separable approximation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(7): 2479-2493.
- [30] Yang Z, Albrow-Owen T, Cai W, et al. Miniaturization of optical spectrometers [J]. *Science*, 2021, 371(6528): 480.
- [31] Zhao Y S, He W J, Liu Z Y, et al. Development of convex flaring grating in coded aperture spectral Imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(03): 20220007. (in Chinese)
- [32] Gao Z D, Gao H X, Zhu Y Y, et al. Summary of snapshot spectral imaging technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1323-1343. (in Chinese)
- [33] Zheng Q, Wen L, Chen Q. Research progress of computational microspectrometer based on speckle inspection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(3): 4-8.
- [34] Redding B, Cao H. Using a multimode fiber as a high-resolution, low-loss spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3384-3386.
- [35] Liew S F, Redding B, Choma M A, et al. Broadband multimode fiber spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2029-2032.
- [36] Meng Z, Li J, Yin C, et al. Multimode fiber spectrometer with scalable bandwidth using space-division multiplexing [J]. *Aip Advances*, 2019, 9(1): 015004.
- [37] Wan N H, Meng F, Schroeder T, et al. High-resolution optical spectroscopy using multimode interference in a compact tapered fibre [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7762.
- [38] Sefler G A, Shaw T J, Valley G C. Demonstration of speckle-based compressive sensing system for recovering RF signals [J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21390-21402.
- [39] Redding B, Liew S F, Bromberg Y, et al. Evanescently coupled multimode spiral spectrometer [J]. *Optica*, 2016, 3(9): 956-962.
- [40] Piels M, Zibar D. Compact silicon multimode waveguide spectrometer with enhanced bandwidth [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 43454.
- [41] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 746-751.
- [42] Yang T, Xu C, Ho H-P, et al. Miniature spectrometer based on diffraction in a dispersive hole array [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3217-3220.
- [43] Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: A review. Conference on Wavelet Applications VII[C]//Proc SPIE, 2000, 4056: 50-64.
- [44] Carmo J P, Rocha R P, Bartek M, et al. A review of visible-range Fabry-Perot microspectrometers in silicon for the industry [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(7): 2312-2320.
- [45] Zhang H Y, Wang X L, Soos J, et al. Design of a miniature solid-state NIR spectrometer[C]// Conference on Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy, 1995, 2475: 376-383.
- [46] Herrmann H, Schafer K, Schmidt C. Low-loss tunable integrated acoustooptical wavelength filter in LiNbO₃ with strong sidelobe suppression [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(1): 120-122.
- [47] Guarino A, Poberaj G, Rezzonico D, et al. Electro-optically tunable microring resonators in lithium niobate [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(7): 407-410.
- [48] Yao Y, Hou J, Liu H, et al. Design of programmable multi-wavelength tunable filter on lithium niobate [J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102741.
- [49] Miao Y P, Wu J X, Lin W, et al. Magnetic field tunability of optical microfiber taper integrated with ferrofluid [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29914-29920.
- [50] Mallinson S R, Jerman J H. Miniature micromachined Fabry-Perot interferometers in silicon [J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(20): 1041-1043.

- [51] Stone J, Stulz L W, Marcuse D, et al. Narrow-band FiEnd etalon filters using expanded-core fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(12): 1851-1854.
- [52] Oiknine Y, August I, Blumberg D G, et al. Compressive sensing resonator spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 25-28.
- [53] Yu X C, Xu Y Q, Cai J C, et al. Research progress of tunable micro-nano filter structure [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1069-1088. (in Chinese)
- [54] Correia J H, De Graaf G, Kong S H, et al. Single-chip CMOS optical microspectrometer [J]. *Sensors and Actuators a-Physical*, 2000, 82(1-3): 191-197.
- [55] Kong S H, Correia J H, De Graaf G, et al. Integrated silicon microspectrometers [J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2001, 4(3): 34-38.
- [56] Emadi A, Wu H, De Graaf G, et al. Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 489-507.
- [57] Wu X N. Research on Spectral Modulation Reconstruction of Improved FP Microarray Based on Compressed Sensing [M]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [58] Oliver J, Lee W-B, Lee H-N. Filters with random transmittance for improving resolution in filter-array-based spectrometers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 3969-3689.
- [59] Wang S-W, Xia C, Chen X, et al. Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 632-640.
- [60] Lee W-B, Kim C, Ju G W, et al. Design of thin-film filters for resolution improvements in filter-array based spectrometers using DSP [J]. *Next-Generation Spectroscopic Technologies* **Ix**, 2016, 9855: 98550.
- [61] Kim S H, Park H S, Choi J H, et al. Integration of colloidal photonic crystals toward miniaturized spectrometers [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(9): 946.
- [62] Momeni B, Hosseini E S, Adibi A. Planar photonic crystal microspectrometers in silicon-nitride for the visible range [J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 17060-17069.
- [63] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1020.
- [64] Bryan K M, Jia Z, Pervez N K, et al. Inexpensive photonic crystal spectrometer for colorimetric sensing applications [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4411-4423.
- [65] Wang Z, Yu Z. Spectral analysis based on compressive sensing in nanophotonic structures [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25608-25614.
- [66] Guo P, Wang Z, Shi B, et al. Compressive sensing based on mesoscopic chaos of silicon optomechanical photonic crystal [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5): 3022801.
- [67] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer [J]. *Nature*, 2015, 523(7558): 67.
- [68] Li H Y, Bian L H, Gu K, et al. A near-infrared miniature quantum dot spectrometer [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(15): 0376.
- [69] Zhu X, Bian L, Fu H, et al. Broadband perovskite quantum dot spectrometer beyond human visual resolution [J]. *Light-Science Applications*, 2020, 9(1): 73.
- [70] Kurokawa U, Choi B I, Chang C-C. Filter-based miniature spectrometers: Spectrum reconstruction using adaptive regularization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(7): 1556-1563.
- [71] Tittel A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces [J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1105.
- [72] Chang C-C, Lin N-T, Kurokawa U, et al. Spectrum reconstruction for filter-array spectrum sensor from sparse template selection [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 4402.
- [73] 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.
- [74] Chen Q, Liang L, Zheng Q, et al. On-chip readout plasmonic mid-IR gas sensor [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(7): 190040.
- [75] 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.
- [76] Zheng B, Li L, Wang J, et al. On-chip measurement of photoluminescence with high sensitivity monolithic spectrometer [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(11): 2000191.
- [77] Dong J J. The smallest nanowire spectrometers [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2019, 12(4): 341.
- [78] Yang Z, Albrow-Owen T, Cui H, et al. Single-nanowire spectrometers [J]. *Science*, 2019, 365(6457): 1017.
- [79] Meng J, Cadusch J J, Crozier K B. Detector-only spectrometer based on structurally colored silicon nanowires and a reconstruction algorithm [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(1): 320-328.

- [80] August Y, Stern A. Compressive sensing spectrometry based on liquid crystal devices [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 4996-4999.
- [81] Wang Q, Ma L, Li C, et al. A spectral super-resolution method of LCTF based on compressive sensing [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(1): 40-45, 72.
- [82] Jewell S A, Vukusic P, Roberts N W. Circularly polarized colour reflection from helicoidal structures in the beetle *Plusiotis boucardi* [J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(4): 99.
- [83] Lowrey S, De Silva L, Hodgkinson I, et al. Observation and modeling of polarized light from scarab beetles [J]. *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, 2007, 24(8): 2418-2425.
- [84] Guo B. Photonic band gap structures of obliquely incident electromagnetic wave propagation in a one-dimension absorptive plasma photonic crystal [J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16(4): 043508.
- [85] Hermann D, Diem M, Mingaleev S F, et al. Photonic crystals with anomalous dispersion: Unconventional propagating modes in the photonic band gap [J]. *Physical Review B*, 2008, 77(3): 035112.
- [86] Argyros A, Birks T A, Leon-Saval S G, et al. Photonic bandgap with an index step of one percent [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 309-314.
- [87] Meng Q, Ouyang Z, Wang Jong C, et al. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1290-1294.
- [88] Zou M Q, Yang R, Li J F, et al. Optical properties of quantum dots and their applications in life science [J]. *Journal of Analytical Measurement*, 2005(6): 133-137. (in Chinese)
- [89] Zhang D, Wang P, Jiao X, et al. Progress in surface plasmon subwavelength optics [J]. *Physics*, 2005, 34(7): 508-512.
- [90] Zhen-Lin W. A review on research progress in surface plasmons [J]. *Progress in Physics*, 2009, 29(3): 287-324.
- [91] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [92] Liu H, Lalanne P. Microscopic theory of the extraordinary optical transmission [J]. *Nature*, 2008, 452(7188): 728-731.
- [93] Li M X, Wang D Y, Zhang C. Principle and application of metamaterial surface structure color [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 900-926. (in Chinese)
- [94] Sun H, Tian W, Wang X, et al. In situ formed gradient bandgap-tunable perovskite for ultrahigh-speed color/spectrum-sensitive photodetectors via electron-donor control [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(14): e1908108.
- [95] Zhang M N, Wu X, Riaud A, et al. Spectrum projection with a bandgap-gradient perovskite cell for colour perception[J]. *Light-Science & Applications*. 2020, 9(1):324-327.
- [96] Crocombe R A. Portable spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2018, 72(12): 1701-1751.
- [97] Malinen J, Rissanen A, Saari H, et al. Advances in miniature spectrometer and sensor development[C]//Sensing Technologies + Applications, 2014, 9101: 91010C.
- [98] Herrero-Bermello A, Velasco A V, Podmore H, et al. Temperature dependence mitigation in stationary Fourier-transform on-chip spectrometers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2239-2242.
- [99] Ng W, Minasny B, Montazerolghaem M, et al. Convolutional neural network for simultaneous prediction of several soil properties using visible/near-infrared, mid-infrared, and their combined spectra [J]. *Geoderma*, 2019, 352: 251-267.
- [100] Xiao D, Ba Tuan L, Thai Thuy Lam H. Iron ore identification method using reflectance spectrometer and a deep neural network framework [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 248: 119168.
- [101] Li D L, Lu B. Optical fiber sensor recognition algorithm based on deep neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20210971. (in Chinese)
- [102] Jha D, Choudhary K, Tavazza F, et al. Enhancing materials property prediction by leveraging computational and experimental data using deep transfer learning [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5316.
- [103] Smith J S, Nebgen B T, Zubatyuk R, et al. Approaching coupled cluster accuracy with a general-purpose neural network potential through transfer learning [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2903.