

微型近红外光谱仪关键技术研究进展

庾繁^{1,2,3*}, 温泉^{1,2,3}, 雷宏杰^{1,2,3}, 黄良坤^{1,2,3}, 温志渝^{1,2,3**}

¹重庆大学微系统研究中心, 重庆 400044;

²重庆大学新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室, 重庆 400044;

³重庆大学光电工程学院, 重庆 400044

摘要 综述了近年来国内外阵列检测型、光栅扫描型、滤光片型、傅里叶变换型和阿达玛变换型等多种类型微型近红外光谱仪关键技术研究进展,详细讨论了各种类型的优缺点、适合的应用领域及存在的问题。最后,对微型近红外光谱仪的应用和发展趋势进行了总结和展望。

关键词 光谱学; 微型光谱仪; 微光机电系统; 近红外波段

中图分类号 O433.1; O657.33

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100003

Research Progress in Key Technologies on Near Infrared Microspectrometer

Yu Fan^{1,2,3*}, Wen Quan^{1,2,3}, Lei Hongjie^{1,2,3}, Huang Liangkun^{1,2,3}, Wen Zhiyu^{1,2,3**}

¹Microsystem Research Center, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

³College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract The research progress in key technologies on various types of near infrared microspectrometers, such as array detector, scanning grating, filter, Fourier transform, and Hadamard transform, is reviewed. Different instruments are discussed in detail, including their advantages and disadvantages, suitable application fields, and current problems. Finally, the application and development tendency of near infrared microspectrometers are summarized and prospected.

Key words spectroscopy; microspectrometer; micro-opto-electro-mechanical system; near infrared band

OCIS codes 300.6190; 300.6340; 130.3990

1 引言

微型近红外光谱仪(NIM)是一种运用光学原理对物质的组分和含量进行定性、定量分析的微型无损检测仪器,具有小体积、低功耗、低成本、可现场在线分析、便于二次开发等优点,在农业生产、食品安全、生物医药、石油化工、航空航天以及国防安全等众多领域获得了广泛的应用^[1-4]。

20世纪60年代,在美国农业部的支持下 Karl Norris 领导的课题组研制出世界上第一台近红外(NIR)扫描光谱仪,近红外光谱分析技术逐渐得到

关注。但传统的近红外光谱仪存在体积大、功耗高、价格昂贵、难以二次开发等问题,极大地限制了其应用范围。直到20世纪90年代,微光机电系统(MOEMS)技术的兴起使微型化的近红外光谱仪器逐渐出现。相较于传统的大型光谱仪,微型近红外光谱仪不仅成本低、体积小、功耗低、便于现场在线检测,而且可以进行二次开发,因此其应用领域得到扩展。近年来,MOEMS技术的快速发展极大地推动了近红外光谱仪器的微型化进程,国内外研究机构先后提出了多种类型的微型近红外光谱仪,并且已有相当一部分公司向市场推出了基于MOEMS

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-04-19; 录用日期: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项(61327002)

* E-mail: yu_fan@cqu.edu.cn; ** E-mail: wzy@cqu.edu.cn

技术的微型近红外光谱仪。

不论哪种类型的光谱仪,都需要将复色光色散为单色光,所以分光是光谱仪最基本的功能。根据所采用的分光技术的不同,微型近红外光谱仪可分为阵列检测型、光栅扫描型、滤光片型、傅里叶变换(FT)型和阿达玛变换(HT)型等多种类型。阵列检测型、光栅扫描型和滤光片型属于经典色散型光谱仪,主要通过对不同波长的光进行空间或时间上的分离,进而读出光谱;而傅里叶变换型和阿达玛变换型属于调制变换型,对不同波长的光进行波分复用,探测器探测后需通过逆变换完成光谱重构才能得到光谱信号^[2-5]。本文主要介绍和分析上述几种类型的微型近红外光谱仪近年来的研究进展,并对微型近红外光谱仪的应用和发展趋势进行总结和展望。

2 经典色散型微型近红外光谱仪

2.1 阵列检测型

阵列检测型微型近红外光谱仪采用阵列探测器对光栅色散的不同波长的光谱进行探测,仪器性能主要取决于阵列探测器,读取速度较快,是发展最为成熟的微型近红外光谱仪,一直以来占据市场主流。2010年美国海洋光学公司推出的 NIRQuest 系列微型近红外光谱仪,采用平面光栅分光,InGaAs 线阵探测器,工作波段在长波方向可以推进至 2500 nm,分辨率小于 10 nm,其光学结构如图 1 所示。入射光通过光纤进入,经准直后在光栅上色散为光谱,成像后由阵列探测器检测。为了进一步缩小体积,可利用一个集准直、分光、扫描于一体的凹面光栅替代准直镜、平面光栅和成像镜来精简系统。日本滨松公司推出的超小型光谱仪 11708MA^[6]即采用了凹面光栅并集成了入射狭缝的 CMOS 探测器芯片,体积大为缩小(27.6 mm × 16.8 mm × 13 mm),但光谱分辨率下降到 20 nm,光谱响应范围缩减为 640~1050 nm。国内相关学术研究机构如重庆大学^[7]、浙江大学^[8]等,均开展了微型近红外光谱仪关键技术研究,在相关领域取得了一定进展。国内的复享、辰昶、晶飞等公司也相继推出了阵列检测型微型近红外光谱仪产品,但相比于国际同行(如荷兰的爱万提斯、德国 INSION),国内微型近红外光谱仪相关性能仍存在一定差距。

阵列检测型微型近红外光谱仪具有结构简单、容易制作、光谱读取速度快、抗振性能好等优点,在大气监测、航空航天等对体积和抗冲击能力有较高要求的应用领域有很大的优势,但阵列探测器的非

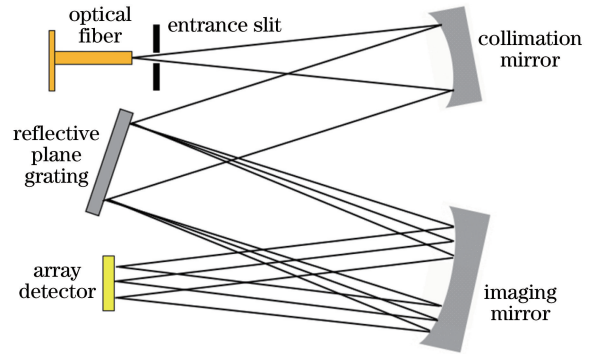


图 1 阵列检测型微型近红外光谱仪光学结构

Fig. 1 Optical schematic of array detector based NIR microspectrometer

均匀性影响仪器的信噪比,且昂贵的阵列探测器使得这类仪器的整体成本较高。

2.2 光栅扫描型

为了降低微型近红外光谱仪的成本,德国夫琅禾费光学微系统研究所(IPMS)率先提出以集分光与扫描于一体的集成 MOEMS 扫描光栅为核心元器件的光栅扫描型微型近红外光谱仪^[9],可以用价格低廉的单管探测器取代昂贵的阵列探测器,仪器的性能不再取决于阵列探测器而是扫描光栅。该类仪器的工作原理如图 2 所示,入射光经准直镜准直,在 MOEMS 扫描光栅上色散为光谱并被扫描,成像后依次通过出射狭缝被单管探测器探测。近年来,夫琅禾费 IPMS 研究所报道了一种体积只有方糖大小的可集成于手机的光栅扫描型微型近红外光谱仪^[10-11],光谱范围 950~1900 nm,分辨率 10 nm,其核心元器件为集成了入射狭缝和出射狭缝的 MOEMS 扫描光栅芯片。扫描光栅面大小为 3 mm × 3 mm,采用静电梳齿驱动,并集成了压电式角传感器进行闭环控制以实现高精度扫描。但由于镜面只有数十微米厚,在扫描过程中,镜面容易出现动态变形的问题,影响光谱仪的信噪比。德国 HiperScan 公司利用夫琅禾费 IPMS 的核心技术已在市场上推出了相应商品化的光栅扫描型微型近红外光谱仪。

国内西北工业大学乔大勇团队也进行了光栅扫描型微型近红外光谱仪的研究^[12-13],该团队研制的 MOEMS 扫描光栅采用 SOI(silicon-on-insulator)制作,驱动方式为静电梳齿驱动,但同样存在镜面动态变形的问题,且静电驱动方式所需驱动电压较高。重庆大学温志渝团队提出的 MOEMS 扫描光栅,利用偏晶向硅片制作的大面积闪耀光栅具有较高的衍射效率和分辨率的特点,且采用较厚的光栅面,有效

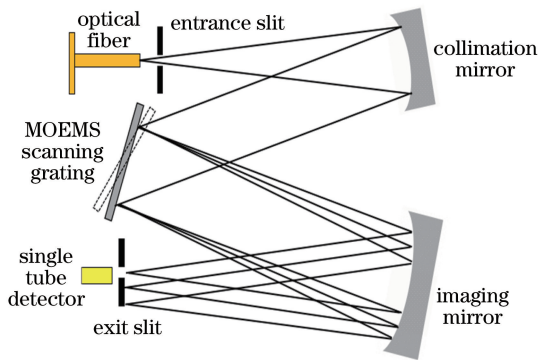


图2 光栅扫描型微型近红外光谱仪工作原理

Fig. 2 Schematic of scanning grating based NIR microspectrometer

避免了动态变形的问题^[14-15],但同时带来了稳健性较弱的问题。扫描光栅采用电磁式驱动和传感,便于一体化集成,且所需驱动电压较低,但存在电磁干扰的问题。

光栅扫描型微型近红外光谱仪具有成本低、光谱范围容易拓宽等优势,但由于有 MOEMS 扫描光栅这一可动部件,抗振性较差,该类仪器在成本要求严格但环境相对稳定的领域具有广阔的应用前景。开发出低成本、高性能的 MOEMS 扫描光栅是光栅扫描型仪器发展所需突破的关键技术问题,而且在拓宽光谱范围的同时需考虑如何解决二级光谱重叠的问题。

2.3 滤光片型

滤光片型微型近红外光谱仪的核心分光元件为基于 MOEMS 技术的可调谐法布里-珀罗滤光片或者线性渐变滤光片(LVOF),本质为法布里-珀罗干涉仪(FPI),由上下两个镜夹一个介质层(谐振腔)构成,如图3所示。不同的介质层厚度(即不同腔长)对不同波长的光具有选择透过性,相当于一个滤光片。

2008年,澳大利亚西澳大学研制了一种将

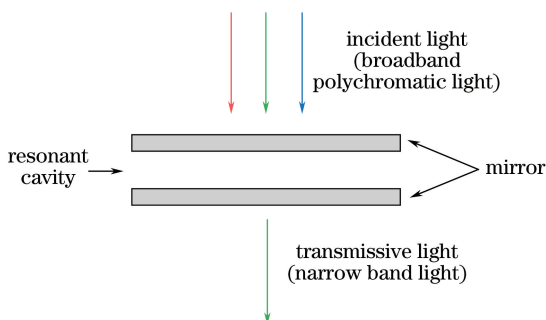


图3 法布里-珀罗干涉仪工作原理

Fig. 3 Schematic of Fabry-Pérot interferometer

MOEMS 可调谐法布里-珀罗滤光片和 HgCdTe 光导探测器集成于一体的微型近红外光谱仪^[16],通过改变上部镜的静电驱动电压来调节谐振腔(介质层为空气)长度以实现连续可调滤波功能,但静电吸合的存在使得可实现的光谱范围仅为 1820 ~ 2300 nm。随后,通过改进驱动器结构来扩大上部镜的行程^[17-18],光谱范围可以扩展为 1615 ~ 2425 nm,在 2000 nm 处的分辨率为 52 nm。为了进一步提高性能,其不再将可调谐滤光片与探测器集成于一体,以避免 HgCdTe 对滤光片热负载的限制和对氮化硅结构层品质的影响;为了提高光谱分辨率,引入五层结构的布拉格镜并利用各层间的应力平衡限制经典驱动的上部镜的弯曲和倾斜,最终 2000 nm 波长处的分辨率提高至 30 nm。可见,这类光谱仪的性能主要取决于 MOEMS 法布里-珀罗滤光片腔长的可调谐范围和分辨率。2016年,芬兰 VTT 技术研究中心^[19]研制的 MOEMS 近红外法布里-珀罗滤光片的光谱范围为 1500 ~ 2000 nm,在 1750 nm 波长处的分辨率提升至 15 nm。日本滨松公司也在市场上推出了相应产品,如 TF 和 TG 系列^[20],其在 2550 nm 处的分辨率为 20 nm。

基于线性渐变滤光片的微型近红外光谱仪利用 MOEMS 技术将具有不同腔长的法布里-珀罗滤光片阵列与阵列式探测器实现单片集成,体积可以做得很小,而且比可调谐法布里-珀罗型光谱仪的稳健性更好,而如何实现腔长渐变的滤光片阵列是其技术难点^[21]。2006年,国内重庆大学微系统中心温志渝等^[22]曾提出基于法布里-珀罗腔阵列的集成化微型光谱仪设计,但其提出的工艺方案为采用多个掩模板依次实现法布里-珀罗腔单元,工艺复杂,且可实现的单元数少。荷兰代尔夫特理工大学 Wolffenbuttel 团队提出的光刻胶回流工艺仅需一张掩模板即可在阵列探测器上集成线性渐变的法布里-珀罗腔阵列^[21-25],其研制的微型近红外光谱仪光谱范围可达 1800 ~ 2800 nm,光谱分辨率为 35 ~ 60 nm。Viavi 公司已在市场上推出了商品化的线性渐变滤光片型微型近红外光谱仪,其波长范围为 950 ~ 1650 nm,扫描速度为 50 s⁻¹,可用于在线生产监测和便携式现场检测。

滤光片型微型近红外光谱仪具有结构简单、体积小、稳健性好、可实现光谱仪的单片集成等优势。可调谐法布里-珀罗滤光片型光谱仪采用单管探测器,成本较低,适合用于农业等便携式窄带检测应用领域;线性渐变滤光片型光谱仪无可动部件,可应用

于深空探测、大气监测等极端环境。但是,该类光谱仪光谱范围和分辨率逊色于光栅扫描型光谱仪,提升该类光谱仪整体性能的关键在于研制出高性能的滤光片。

3 调制变换型微型近红外光谱仪

3.1 傅里叶变换型

傅里叶变换型微型近红外光谱仪是基于光干涉和傅里叶变换原理设计的,一般采用迈克耳孙干涉仪为核心部件,分光原理如图 4 所示。动镜进行活塞运动得到不同光程差的干涉光强,利用一个单管探测器对干涉光进行探测后经傅里叶逆变换即可得到光谱信号。2005 年,德国卡尔斯鲁厄研究中心提出的微型傅里叶变换近红外光谱仪即是这类仪器的典型代表^[26],其动镜采用电磁式驱动机制,最大位移 485 μm ,在 1540 nm 处光谱分辨率为 25 nm。韩国国立首尔大学 Yu 等^[27]也做了相应的研究,其采用 MOEMS 技术实现了迈克耳孙干涉仪的单片集成,使得光谱仪的尺寸大为缩小,但动镜可实现的位移小,导致分辨率较低。微型傅里叶变换光谱仪的分辨率主要取决于动镜可实现的扫描位移,位移越大则分辨率越高。

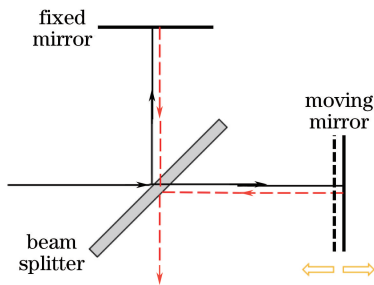


图 4 迈克耳孙干涉仪工作原理

Fig. 4 Schematic of Michelson interferometer

2015 年,德国夫琅禾费硅技术研究所提出了基于锆钛酸铅(PZT)薄膜的压电驱动 MOEMS 活塞镜^[28],在 163 Hz 谐振频率下扫描位移最大可达 $\pm 800 \mu\text{m}$,但在扫描位移较大时存在镜面倾斜的问题。镜面倾斜限制了可用的扫描范围,而且会影响干涉信号,因此降低了分辨率。美国佛罗里达大学谢会开团队对电热驱动 MOEMS 活塞镜进行了深入研究^[29-31],采用双闭环控制的方法不仅有效减小了大位移扫描过程中的镜面倾斜,同时实现了恒定速度的线性扫描,降低了信号处理的难度,使得光谱分辨率和抗干扰能力等性能大为提升。

另一种类型的微型傅里叶变换近红外光谱仪则

是以层状光栅干涉仪(LGI)为核心元件,利用单管探测器对零级光谱进行探测。相较于迈克耳孙干涉仪,层状光栅干涉仪不需要分束器、定镜等光学元件,结构更加简单、紧凑^[32]。这类仪器的光谱分辨率取决于层状光栅干涉仪所能产生的光程差,所以研制出大位移驱动层状光栅干涉仪是提高光谱分辨率的关键所在。2006 年,土耳其科克大学 Urey 团队提出了一种基于垂直梳齿驱动器的层状光栅干涉仪^[33],梳齿电极同时作为驱动器和可动光栅,产生的位移达到 106 μm 。随后,该团队又提出了稳健性更好的基于 FR4 板材的电磁驱动层状光栅干涉仪和基于 MOEMS 技术更大位移的静电驱动层状光栅干涉仪^[34],后者可动光栅的最大位移可扩展至 $\pm 356 \mu\text{m}$,并引入机械闭锁装置以提高抗冲击能力。新加坡国立大学周光亚团队也做了相应的研究^[35-36]。

微型傅里叶变换近红外光谱仪具有结构紧凑、光通量大、波长精度高、有潜在高分辨率等优势,适合应用于对分辨率要求较高的场合,但仍存在抗振性差的固有缺陷以及仪器性能受限于动镜或可动光栅所能实现的活塞位移等问题。目前,瑞士 Arcoptix 公司、日本滨松、埃及 Si-Ware Systems 和国内无锡微奥公司均推出了商品化的微型傅里叶变换近红外光谱仪。

3.2 阿达玛变换型

阿达玛变换型微型近红外光谱仪实际上是一种在色散光谱仪中引入阿达玛变换的数字变换型仪器,通过光的多路复用提高信噪比,而且一般采用单管探测器使得成本较低,无移动部件使其抗冲击能力也优于傅里叶变换型光谱仪。其工作原理如图 5 所示,对色散后的光谱用一个编码模板进行阿达玛变换,经聚焦后由一个单管探测器探测后利用阿达玛逆变换即可解调出光谱信号。早期采用的由步进电机控制的机械运动或旋转式模板存在机械误差大、编码速度低等缺点,限制了阿达玛变换光谱仪的发展。液晶空间调制器通过外加电场改变液晶材料的光学性质来实现对光信号的开关调制,虽然在一定程度上解决了机械模板的不足,但由于液晶材料不能实现光谱的完全透射和反射,因此存在光谱能量损失和杂散光大等问题^[37]。

2008 年,重庆大学韦玮等^[38]报道了一种以自主研发的 MOEMS 光栅光调制器为核心元件的微型阿达玛变换微型近红外光谱仪。光栅光调制器是利用 MOEMS 技术加工的静电驱动可调谐相位光栅

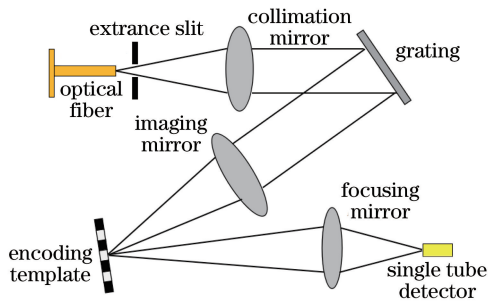


图 5 微型阿达玛变换光谱仪工作原理

Fig. 5 Schematic of Hadamard transform NIR microspectrometer

阵列,通过控制像元的选通即可实现编码,利用一个 InGaAs 单管探测器探测后解码得到光谱。该光谱仪成本低,响应速度快,但是光谱范围仅为 1320~1400 nm,且分辨率受限于所能实现的光栅光调制器的像元数。基于数字微镜阵列(DMD)的微型阿达玛变换近红外光谱仪通过控制微镜单元的选通实现对光信号的开关调制,既减小了光谱能量损失,也抑制了杂散光的干扰,是近年来研究的热点。为了进一步减小光能量损失,重庆大学张智海等^[39]结合 H 矩阵与 S 矩阵的优点,提出了一种互补 S 矩阵编码调制方案,在 S 矩阵的基础上将信噪比提升约 $\sqrt{2}$ 倍。2014 年,长春光学精密机械与物理研究所刘华团队设计了一种光谱折叠式微型阿达玛变换近红外光谱仪,采用两个子光栅使光谱范围有效拓宽为 800~2000 nm,光谱分辨率也得到了提升,但杂散光较大^[40-41]。为了避免这一缺陷并降低光谱仪的复杂度,该团队又提出了一种采用自由曲面透镜准直的光谱折叠式光谱仪来拓宽光谱^[42],光谱范围可以覆盖几乎整个近红外波段,为 800~2400 nm,仿真结果显示分辨率优于 10 nm,提升了光能利用率,降低了消除二次光谱的难度。

微型阿达玛变换近红外光谱仪具有光通量大、信噪比高、成本低、抗振性较好等优点,适用于微弱光谱信号的检测,编码技术和光谱拓宽仍是近年研究的热点。目前,Polychromix 公司、Aspectrics 公司和国内的北京华夏科创仪器公司均有相应的商品化仪器出现在市场上。

4 结束语

在 MOEMS 技术的推动下,微型近红外光谱仪的体积大为缩小,成本也大为降低,可以走出实验室,应用到越来越多的领域中。不同类型的微型近红外光谱仪自身的优缺点决定了各自不同的应用领

域。由于近红外探测器在整台微型近红外光谱仪成本中所占的比重较大,所以采用单管探测器的微型近红外光谱仪成本较低,适合用于对价格有严格限制的应用领域。采用阵列探测器的微型光谱仪虽然价格相对较高,但是没有可移动部件,因而稳健性好,适合在有强冲击、强振动的恶劣环境中使用。调制变换型微型近红外光谱仪具有光通量大、分辨率高、信噪比高等优势,适用于光信号微弱或对性能要求较高的应用环境。微型近红外光谱仪不仅在农业生产、食品安全、生物医药、石油化工、航空航天以及国防安全等众多领域中发挥着越来越大的作用,而且逐渐与智能手机相结合走入人们的日常生活中,如近年来出现的 SCIO、TellSpec、百度筷搜、谱芸奶粉卫士等廉价小巧的专用型微型近红外光谱仪。国内在微型近红外光谱仪的研究方面起步较晚,且探测器、数字微镜阵列等重要元器件仍依赖进口,虽然研究单位众多,如重庆大学、浙江大学、长春光学精密机械与物理研究所等,在国家仪器专项的支持下取得了一系列进展,但应用到市场上的产品较少,且类型以阵列检测型为主。目前国内的相关研究主要集中于跟踪国外前沿技术,自行提出的相关结构和检测方法较少;受制于探测器等核心器件的约束,国内研究出的微型近红外光谱仪在尺寸大小、性能参数(如分辨率)等方面较国外仍有一定差距。国内生产销售微型近红外光谱仪的公司较少且规模不大,相比于国外成熟的产销体系,我国在这方面仍存在很大的差距。因此,国内微型近红外光谱仪产品所占市场份额仍然较少。近年来,国家越来越重视近红外分析仪器的研发应用,未来将会有更多类型的高性能微型近红外光谱仪出现在市场上。此外,专用型的分析仪也是微型近红外光谱仪商品化的一个重要方向。微型近红外光谱仪一直朝着宽光谱范围、高分辨率、高信噪比、高集成度、小体积、低成本、快速检测等方向发展,国内外的科研机构一直在新原理、新工艺、新材料等方面进行着不懈的探索和努力,如清华大学鲍捷等^[5]提出的量子点微型光谱仪在可见光波段已完成原理性验证,有望推广至近红外波段。今后,各种微纳技术的发展势必会给微型近红外光谱仪的发展提供有力的技术支撑,而且随着对微型近红外光谱仪的二次开发和应用领域的拓宽,光谱与人类生产生活的联系将会更加密切。

参 考 文 献

- [1] Brennan D, Alderman J, Sattler L, *et al.* Issues in

- development of NIR micro spectrometer system for on-line process monitoring of milk product [J]. Measurement, 2003, 33(1): 67-74.
- [2] Schuler L P, Milne J S, Dell J M, *et al.* MEMS-based microspectrometer technologies for NIR and MIR wavelengths[J]. Journal of Physics D, 2009, 42 (13): 133001.
- [3] Barthès B G, Brunet D, Rabary B, *et al.* Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) could be used for characterization of soil nematode community [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43 (8): 1649-1659.
- [4] Tseng V F G, Xie H. Simultaneous piston position and tilt angle sensing for large vertical displacement micromirrors by frequency detection inductive sensing [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107 (21): 214102.
- [5] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. Nature, 2015, 523(7558): 67-70.
- [6] Hamamatsu. C11708MA 微型光谱仪 MS 系列 [EB/OL]. [2018-03-01]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/category/10345/0/11945/index.html>. Hamamatsu. C11708MA microspectrometer - MS series [EB/OL]. [2018-03-01]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/category/10345/0/11945/index.html>.
- [7] Xiang X Y, Wen Z Y, Long Z C, *et al.* Development of analysis system for miniature near-infrared spectrometer[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2286-2290.
向贤毅, 温志渝, 龙再川, 等. 微型近红外光谱仪分析系统的研制[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29 (8): 2286-2290.
- [8] Liu K, Yu F H. Accurate wavelength calibration method using system parameters for grating spectrometers [J]. Optical Engineering, 2013, 52 (1): 013603.
- [9] Grueger H, Wolter A, Schenk H, *et al.* Realization of a spectrometer with micromachined scanning grating[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4945: 46-53.
- [10] Pügner T, Knobbe J, Grüger H, *et al.* Design of a hybrid-integrated MEMS scanning grating spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8167: 816718.
- [11] Pügner T, Grüger H. Miniaturized NIR scanning grating spectrometer for use in mobile phones [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9855: 985502.
- [12] Yan B, Yuan W, Sun R, *et al.* Design and simulation of microspectrometer based on torsional MEMS grating [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7657: 76570V.
- [13] Qiao D, Kang B, Liu Y, *et al.* A resonance scanning grating based on SOI for microspectrometer application [J]. Laser Physics, 2013, 23 (3): 035601.
- [14] Nie Q, Wen Z, Huang J. A high-performance scanning grating based on tilted (111) silicon wafer for near infrared micro spectrometer application[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21 (8): 1749-1755.
- [15] Nie Q, Wen Z, Huang J. Design and fabrication of a MEMS high-efficiency NIR-scanning grating based on tilted (111) silicon wafer [J]. European Physical Journal Applied Physics, 2015, 72(1): 10702.
- [16] Keating A J, Antoszewski J, Silva K K M B D, *et al.* Design and characterization of Fabry-Pérot MEMS-based short-wave infrared microspectrometers [J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37(12): 1811-1820.
- [17] Dell J M, Milne J S, Antoszewski J, *et al.* MEMS-based Fabry-Perot microspectrometers for agriculture [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7319: 73190K.
- [18] Milne J S, Dell J M, Keating A J, *et al.* Widely tunable MEMS-based Fabry-Perot filter [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009, 18 (4): 905-913.
- [19] Akujärvi A, Gao B, Mannila R, *et al.* MOEMS FPI sensors for NIR-MIR microspectrometer applications [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9760: 97600M.
- [20] Hamamatsu. 微型光谱仪 [EB/OL]. [2018-03-01]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/category/10345/10345/index.html?page=1>. Hamamatsu. Microspectrometer [EB/OL]. [2018-03-01]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/category/10345/10345/index.html?page=1>.
- [21] Emadi A, Wu H, Grabarnik S, *et al.* Fabrication and characterization of IC-compatible linear variable optical filters with application in a micro-spectrometer [J]. Sensors & Actuators A, 2010, 162 (2): 400-405.
- [22] Wen Z Y, Chen G, Wang J G. The project and simulation of a compositive miniature spectrum instrument based on the array of Fabry-Perot cavity [J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2006, 26 (10): 1955-1959.

- 温志渝, 陈刚, 王建国. 基于 Fabry-Perot 腔阵列的集成化微型光谱仪方案及模拟[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(10): 1955-1959.
- [23] Emadi A, Wu H, Grabarnik S, *et al.* IC-compatible fabrication of linear variable optical filters for microspectrometer[J]. Procedia Chemistry, 2009, 1(1): 1143-1146.
- [24] Emadi A. Near- and mid-IR microspectrometers based on linear-variable optical filters[C] // Sensors, IEEE, 2011: 424-427.
- [25] Ghaderi M, Silva M F, Emadi A, *et al.* Design, fabrication and characterization of LVOF-based IR microspectrometers[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9130: 91300T.
- [26] Wallrabe U, Solf C, Mohr J, *et al.* Miniaturized Fourier transform spectrometer for the near infrared wavelength regime incorporating an electromagnetic linear actuator[J]. Sensors & Actuators A, 2005, 123: 459-467.
- [27] Yu K, Lee D, Krishnamoorthy U, *et al.* Micromachined Fourier transform spectrometer on silicon optical bench platform [J]. Sensors & Actuators A, 2006, 130(2): 523-530.
- [28] Quenzer H J, Gu-Stoppel S, Stoppel F, *et al.* Piezoelectrically driven translatory optical MEMS actuator with 7 mm apertures and large displacements [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9375: 93750O.
- [29] Wang W, Chen J P, Zivkovic A S, *et al.* A compact Fourier transform spectrometer on a silicon optical bench with an electrothermal MEMS mirror [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2016, 25(2): 347-355.
- [30] Han F, Wang W, Zhang X, *et al.* Modeling and control of a large-stroke electrothermal MEMS mirror for Fourier transform microspectrometers [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2016, 25(4): 750-760.
- [31] Han F T. Miniature Fourier transform spectrometer with a dual closed-loop controlled electrothermal micromirror[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22650-22660.
- [32] Kumar H, Nisam N, Kulkarni A, *et al.* Lamellar grating interferometer FTIR spectroscopy and its applications: a review [C] // 15th International Conference on Nanotechnology, IEEE, 2015: 1107-1110.
- [33] Ataman C, Urey H, Wolter A. A Fourier transform spectrometer using resonant vertical comb actuators [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2006, 16(12): 2517-2523.
- [34] Ataman C, Urey H. Compact Fourier transform spectrometers using FR4 platform [J]. Sensors & Actuators A, 2009, 151(1): 9-16.
- [35] Lee F, Zhou G, Yu H, *et al.* A MEMS-based resonant-scanning lamellar grating Fourier transform micro-spectrometer with laser reference system [J]. Sensors & Actuators A, 2009, 149(2): 221-228.
- [36] Wang S, Yu H, Siong C F. A miniaturized lamellar grating based Fourier transform spectrometer with electrostatic actuation [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(12): 1869-1874.
- [37] Zhang Z H, Mo X X, Guo Y J, *et al.* A novel MOEMS NIR spectrometer [J]. Physics Procedia, 2011, 19: 110-114.
- [38] Wei W, Huang S, Zhu Y, *et al.* Analysis of a Hadamard transform near-infrared spectrometer based on grating light modulator[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7159: 71590N.
- [39] Zhang Z H, Gao L X, Guo Y J, *et al.* The design and experiment of complementary S coding matrix based on digital micromirror spectrometer [J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2012, 32(12): 3429-3432.
- 张智海, 高玲肖, 郭媛君, 等. 数字微镜光谱仪的互补 S 编码矩阵的设计及实验 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12): 3429-3432.
- [40] Wang X D, Liu H, Lu Z W, *et al.* Design of a spectrum-folded Hadamard transform spectrometer in near-infrared band [J]. Optics Communications, 2014, 333: 80-83.
- [41] Quan X, Liu H, Lu Z, *et al.* Correction and analysis of noise in Hadamard transform spectrometer with digital micro-mirror device and double sub-gratings [J]. Optics Communications, 2016, 359: 95-101.
- [42] Wang X, Liu H, Juschkin L, *et al.* Freeform lens collimating spectrum-folded Hadamard transform near-infrared spectrometer [J]. Optics Communications, 2016, 380: 161-167.