

文章编号 1004-924X(2001)04-0372-05

# 微型光谱仪的发展现状

鞠 挥, 吴一辉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:**光谱仪是种类繁多、应用极为广泛的一种理化分析仪器,微加工技术的发展和 MEMS(微机电系统)、MOEMS(微光机电系统)技术的出现为其微小化提供了可能性,本文着重就采用新型滤光技术的微型光谱仪、利用光纤制作的微型光谱仪以及集成式光谱仪进行介绍。光谱仪的微小化是我国微型仪器的一个重要发展方向。

**关键词:**微光机电系统;; 光学纤维; 光谱仪  
**中图分类号:** TN744.1 **文献标识码:** A

## 1 引言

微光学、微电子学、微机械学的结合产生出一类新的应用范围很广的微型光机电系统(MOEMS),它也是机、电、光、磁、化学、传感技术等多种技术的综合<sup>[1]</sup>。MOEMS 日益成为新的光学工具,已经对许多基于光学的仪器显示出应用前景<sup>[2]</sup>。作为 MOEMS 的一种,微型光谱分析仪具有许多大型光谱仪所不具备的优点,如重量轻、体积小、探测速度快、使用方便、可集成化、可批量制造以及成本低廉等。像普通光谱仪一样微型光谱仪有着巨大的应用市场,可以应用在实验室化学分析、临床医学检验、工业监测、航空航天遥感等领域,因而引起了人们广泛的兴趣。

微型光谱仪的实现可以应用多种技术,目前常用的方法包括:采用新型滤光技术制作微型光谱仪;利用光纤的化学传感性制成光纤探针进行光谱分析;使用微细加工制作技术结合集成光学介质光波导的化学传感性制作微型光谱仪等。

## 2 采用新型滤光技术的微型光谱仪

声光可调滤光片(AOTF)是一种微型窄带可调滤光片,是光谱仪微型化的一个发展方向,它通过改变施加在某种晶体上的射频频率来改变通过滤光片的光波长,而通过 AOTF 光的强度可通过

改变射频的功率进行精密、快速的调节<sup>[3]</sup>。与带通滤光片相比,通过 AOTF 光的波长范围很窄,它的分辨率很高,目前可以达到 0.0125nm。与光栅相比,AOTF 没有可动部件,波长调节有很快的速度和很高的灵活性。

美国 Brimrose 公司和 Jet Propulsion 实验室联合设计一种微型电晶体 NIR 光谱仪<sup>[4-5]</sup>。这种基于声光可调滤光片(AOTF)的微型光谱仪主要适用于航天领域,是一种反射型近红外光谱仪,使用发光二极管(LED)阵列作为光源,光纤作为光波传输介质并且采用一种微型 AOTF 作为可调滤光片。光谱分析是通过各向异性声光作用来完成的,只要简单改变驱动 RF 频率控制声控动态光栅就可以在宽带宽范围内快速调节波长。

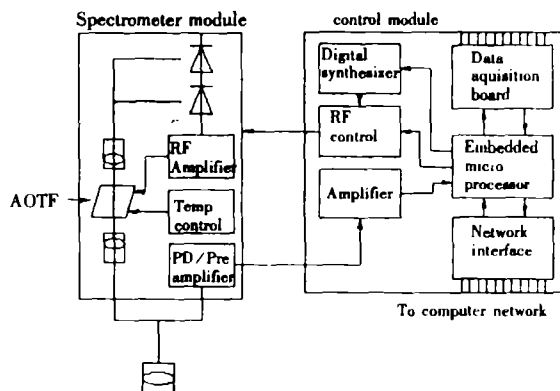


Fig. 1 System illustration of the miniature NIR AOTF spectrometer

收稿日期: 2001-01-16; 修订日期: 2001-07-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 973(G1999033107)

图 1 是光谱仪系统示意图,它由两个分离的单元组成,光谱仪单元和电子控制单元。在仪器中使用 LED 代替了常规使用的卤钨灯。LED 发出的光通过光纤耦合器进入  $\text{TeO}_2$  做成的非线性 AOTF。通过 AOTF 选择的单色光被发送出去,再由一个光探针头通过分叉的光纤束收集。光纤束包括 7 个  $50/125\mu\text{m}$  光纤。光信号被导入线状 InGaAs 光检测器/前置放大单元。在 AOTF 固定位置安装有 TE 冷却器和用于调节温度平衡的电热调节器。

电晶体红外光谱仪有以下优点:重量轻 ( $<250\text{g}$ ),尺寸小 ( $9.2\text{cm} \times 5.4\text{cm} \times 3.2\text{cm}$ ),高灵敏度,超快速 ( $4000\lambda/\text{s}$ ),高可靠性,无运动部件以及不用机械调节的自校准。AOTF 作为光谱仪中最重要的元件,经过美国国防核子局的防辐射测试,这对于在空间工作的仪器是非常重要的。

还有一种利用改变色散元件制作的微型光谱仪,是美国 Hughes Santa Barbara 研究中心研制的线性楔形光谱仪(专利产品)<sup>[6]</sup>,它是由一个微小楔状滤光片和一个阵列检测器组成,可以对多个光谱频带进行检测。楔形光谱仪内有一个楔形的多层薄膜介电材料构成的干扰滤光片,滤光片与二维检测器紧邻,这样根据滤光片在不同位置的带通,每一列检测器可以接收不同光谱波段的能量。阻挡滤光层可以限制边频带,所以单独一个楔形光谱仪可以覆盖很宽的光谱范围。

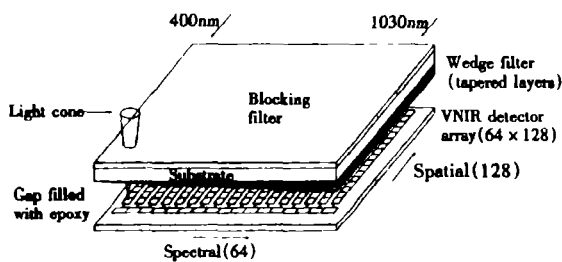


Fig. 2 Wedge spectrometer concept

楔形光谱仪的光谱范围受到滤光片、探测器材料特性的限制,还需要使用多种阻挡滤光片。工作光谱范围分布在可见光和近红外区 ( $400\text{nm} \sim 1030\text{nm}$ )。楔形光谱仪有恒定百分比的带宽特性,即当  $\lambda$  随坡度变化时,  $\Delta\lambda/\lambda$  保持恒定。实际

分辨率是多个参数的函数,包括多层楔形滤光片接收点带宽,在  $\lambda$  方向上探测器的尺寸、光发射锥顶角、光的点扩散函数以及楔状滤光片与探测器阵列间距离。实验结果可以稳定得到  $0.5\% \sim 3\%$  (或更宽)的带宽范围。该光谱仪在实验中还获得了线性色散率。色散率与点带宽无关,而且滤光片可以根据检测器阵列设计成不同的几何形状。

美国亚利桑那州立大学研制了一种微型热发射光谱仪 (Mini Thermal Emission Spectrometer, Mini-TES)<sup>[7]</sup>。Mini-TES 用于火星 2001 登陆器上,是一种傅立叶变换光谱仪,光谱范围  $5\mu\text{m} \sim 28\mu\text{m}$ ,分辨率达  $10\text{cm}^{-1}$ 。Mini-TES 是美国 NASA 火星 2001 登陆器中 Athena 探测装置的一部分。这种 Mini-TES 主要设计用于矿物的遥感探测。Mini-TES 只占全部体积的 15%,并且比以前发射的 MSG TES 轻 83%。这种以迈克尔孙干涉仪为基础的傅里叶光谱技术广泛用于红外光谱法,其优点是分辨率高、杂散光影响小且有利于弱光检测,但色散系统结构复杂,需要复杂的傅里叶变换技术,随着计算机技术的发展这个问题可望得到较好地解决。

### 3 利用光纤制作的微型光谱仪

光纤传感器的主要特点是具有很高的传输信息容量,可以同时反映出多元成分的多维信息,并通过波长、相位、衰减分布、偏振和强度调制、时间分辨、收集瞬时信息等加以分辨,真正实现多道光谱分析和复合传感器阵列的设计,达到对复杂混合物中特定分析对象的检测,这对电传感器和声传感器而言是望尘莫及的<sup>[8]</sup>。光纤的探头直径可以小到与其传播的光波波长属于同一数量级,这样小巧的光纤探头可以直接插入那些非整直空间和无法采样的小空间(如活体组织、血管、细胞)中,对分析物进行连续检测<sup>[9]</sup>。

Ocean Optics 公司的 Michael J. Morris 等人<sup>[9]</sup>研制一种新型微小光谱仪。这种微型光谱仪结合一个紧凑级联光纤 DIP 探针,使用单股光纤以获得高分辨率光谱信息,使用不同的指示材料决定测量液体的吸收、发射和散射光谱,并依据不同的光谱得到溶液的 PH 值或有毒金属浓度。

该系统选择的 CCD 阵列的光谱性能,如光谱

分辨率、杂散光、噪音和动态范围等参数与常规非光纤分析仪器相同。光在光纤中的传播模式限制了光通量,常规应用中可以使用  $50\ \mu\text{m}$  的光纤,通过剪切、抛光将两根平行光纤末端成  $45^\circ$  角,然后固定在一起构成串联光纤探针。

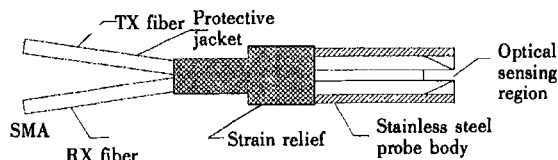


Fig. 3 DIP construction

S1000 型光谱仪和 Ocean 公司的光纤 pH 值传感器可一起使用,这种级联光纤型微小光谱仪优点如下:

- (1) 耦合进入单根光纤的高效输入;
- (2) 高分辨率(约  $1\text{nm}$ );
- (3) 低杂散光;
- (4) 小尺寸(最大直径  $< 6.35\text{cm}$ );
- (5) 低功耗。

微型光纤光谱仪还有美国 Steven Christesen 等人<sup>[10]</sup>研制的便携式光纤喇曼光谱仪,便携式光纤喇曼光谱仪可以对化学试剂鉴定盒进行非接触分析,它包括二极管激光器、中阶梯摄谱仪、电荷耦合器件(CCD)检测器和一个带有滤光涂层的光纤探针,这种光谱仪被用来分析密封玻璃容器中的化学试剂和其它有毒化学物质。这种容器包括小烧杯和玻璃瓶构成化学试剂鉴定装置(CAIS)主要部分,用于军事上的化学分析、安全处理、消毒。对这些试剂需要进行实时非侵入式分析以便对化学试剂中的各种成份进行正确处理。

喇曼光谱仪包括一个 EIC 实验仓, EIC 实验仓由中阶梯摄谱仪型号 NIR700, 紫翠玉或二极管激光器, 和一个 EIC Raman Probe 光纤喇曼探针组成。中阶梯摄谱仪是使用一个  $150\text{mm}$  焦距长准直透镜和一个  $150\text{mm}$  焦距长聚焦透镜组合而成, 目的是增加光通量并在整个光程范围内减小像差。每一个透镜光通量在  $600\text{nm} \sim 1100\text{nm}$  范围大约是  $96\%$ 。需要两个棱镜(光学玻璃类型 SF-10) 以完全分离全部光谱级次。喇曼系统包括一个可以买得到的  $52.65\text{lp/mm}$  的阶梯光栅(Milton Roy 35-15-415), 它是在闪耀角为  $63.5^\circ$  的 Littrow 构成

下工作的。入射角为  $9^\circ$ 。中阶梯摄谱仪分辨率大约是  $1\text{cm}^{-1}$ 。

在进行 CAIS 喇曼光谱测量时使用了两种红光激光系统。一种是脉冲紫翠玉激光器, 波长为  $752\text{nm}$ 。脉冲重复速率和脉冲宽度分别是  $12\text{Hz}$  和  $300\mu\text{s}$ 。另一个是  $785\text{nm}$  连续波二极管激光器。

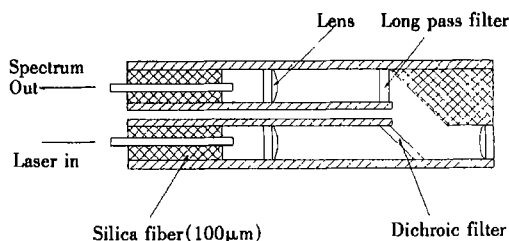


Fig. 4 Illustration of EIC fiber-optic Raman probe

喇曼光谱是通过使用一个带有  $25\text{m}$  光纤的 EIC Raman Probe 探针获得的。Raman Probe 使用一个微小光纤探针头, 探针头利用干涉型滤光片在激光进入样品之前以去除拉曼背景, 然后在进入收集光纤之前去除大部分来自样品散射光中的瑞利线。探针输出功率在紫翠玉激光器下为  $80\text{mW}$ , 而二极管激光器为  $137\text{mW}$ 。探针安装在 EIC 万能样品容器(型号 USH1000) 以便分析。这种微型喇曼光谱仪也可以用于单个活细胞的分析<sup>[11]</sup>。

## 4 集成微型光谱仪

Don S. Goldman 等人<sup>[12]</sup>利用聚合物和金属氧化物平面波导制作一种新型集成式微型光谱分析仪。透过衬底的多波长入射光, 利用位于衬底和波导接口处的衍射光栅耦合进入波导层。另一个衍射光栅将在波导层传播的光在空间范围色散分离, 并由光电二极管阵列进行快速检测。

光栅是在显微镜载玻片上制作的, 使用清洁的玻璃片置于真空炉中加热、冷却并与六甲基二硅胺(HMDS)蒸汽反应。在与 HMDS 反应后接触角度增加至  $75^\circ$  使表面疏水性增强。使用涂胶机在衬底表面上涂大约  $0.35\mu\text{m}$  的光致抗蚀剂, 用干涉法直接在光刻胶表面曝光线性光栅图形。光栅常数  $d$  可以由  $d = \lambda / (2 \sin \alpha)$  确定, 其中  $\alpha$  是入射激光与反射镜间的入射角。烘干后在稀释

的显影剂中显影。在显影之后,用稀释的湿法腐蚀溶液将光刻胶上的光栅图形转移到衬底上。与溶液反应 15s 生成周期为  $0.4\mu\text{m}$  的光栅,使用扫描电子显微镜(SEM)测得样片断面深度约  $0.1\mu\text{m}$ 。光栅的断面的垂直形状接近矩形,仅有最小的凹槽。

在此项研究中使用了聚合物和金属氧化物波导。聚苯乙烯溶于甲基异丁基甲酮(MIBK)中并涂在衬底上。五氧化二钼波导薄膜是在氩氧环境下从钼靶溅射到衬底上的。可以改变压力和氧含量来得到最低传播损耗的波导,衬底置于水冷却铜制工作台,以减小薄膜中结晶效应。

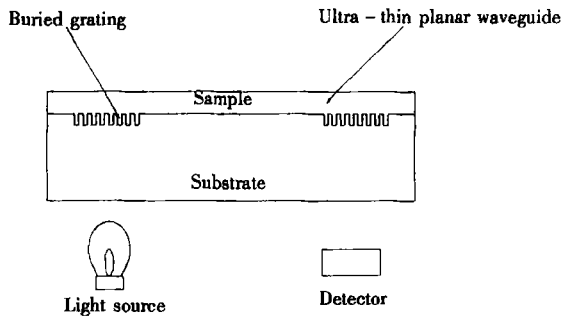


Fig. 5 Planar waveguide sensor

该光谱仪的制作利用了平面介质光波导的消光与化学物质的相互作用,开拓了平面介质波导在化学分析领域的应用,同时可以制作集成式微型光谱仪,为微型光谱仪的研究开辟了一个新的方向。

Gaylin M. Yee 等<sup>[13]</sup>利用微机械加工方法直接在 CCD 成像器件上制作衍射光栅构成集成式微型光谱仪。首先在石英衬底上溅射铬,再涂用 PMMA 光刻胶,利用电子束曝光刻出铬的光栅图

形,然后使用反应离子刻蚀(RTE)对石英衬底进行加工,得到深度为  $0.63\mu\text{m}$  的石英槽。通过重复以上掩蔽和腐蚀的步骤可以制成简单的三阶梯光栅,得到的光谱仪系统衍射效率可以达到 63%,色散率为  $1.7\text{mm}/\text{像元}$ ,分辨率为 74.4。

## 5 结 论

由于光谱仪的结构特点以及光谱仪广泛的应用领域,在微小光谱仪的研究中可以采用多种方法和多种思路。比如改善 AOTF 的波长覆盖范围、波长分辨率和通光本领,使它能应用于各种光谱化学分析,用这样的元件可以制成结构简单、性能良好、成本低廉的光谱仪,或者使用分辨率较高的中阶梯光栅,与一般棱镜结合,进行交叉色散,可以得到分辨率很高的二维光谱图,所以可以根据微小光谱仪的本身特点和工作环境要求来进行设计。

微加工技术的发展以及 MEMS/MOEMS 的出现使许多学科技术的研究都朝着微尺度及微型化的方向发展,更需要一些特殊条件下(如外星、地下、深海、危险区等)的工作仪器。光谱仪在未来的新世纪必将出现高度智能化和微型化的趋势,微型仪器实际上是具有仪器功能的 MEMS/MOEMS 产品,是 MEMS 技术的实际应用。微型仪器的核心技术之一是微型传感技术,采用各种新原理、新概念的各类传感器是实现微型仪器的关键和必要条件。现在仪器朝着微型化、智能化的发展使我们又面临一个新的考验,也是我们发展的一个机遇。

## 参考文献:

- [1] 潘武,钟先信,等.微型光电机械系统技术在光通信中的应用及展望[J].光学精密工程,1999,7(2):1-7.
- [2] 潘武,钟先信,巫正中.微机械微带贴片天线研究[J].光学精密工程,2001,9(3):247-251.
- [3] 汪尔康.21世纪的分析化学[M].北京:科学出版社,1999.
- [4] Zhang Haiyi, Wang Xiaolu, Jolanta Soos. Design of a miniature solid-state NIR spectrometer[J]. SPIE, 2475:376-383.
- [5] Wang Xiaolu. Acousto tunable filters spectrally modulate light[J]. Laser Focus World. 1992, 128(5):173-180.
- [6] Aram M. Milica. Linear-wedge spectrometer[J]. SPIE, 1990, 1298:127-131.
- [7] Silverman Steven, Bates Duane, Schueler Carl, et al. Miniature thermal emission spectrometer for mars 2001 lander[J]. SPIE, 1999, 3756(7):79-90.
- [8] 李力琴,宁雅农.光纤传感器[M].武汉:华中理工大学出版社,1997.
- [9] Morris Michael J, Walters Roy A. Miniature optical fiber-based spectrometer employing a compact tandem fiber probe[J]. SPIE, 1796:141-149.

- [10] Christesen S, Maciver B, Procell L W, et al. Nonintrusive analysis of chemical agent identification sets using a portable fiber-optics Raman spectrometer[J]. Applied Spectroscopy, 1999, 53(7): 850 - 855.
- [11] Surean F, Chinsky L, Amirand C, et al. An ultraviolet micro-Raman spectrometer: Resonance Raman spectroscopy within single living cells[J]. Applied Spectroscopy, 1990, 44(6): 1047 - 1051.
- [12] Goldman Don S White P L, Anheier N C. Miniaturized spectrometer employing planar waveguides and grating couplers for chemical analysis[J]. Appl. Opt, 1990, 29(11): 4583 - 4589.
- [13] Yee Gaylin M, Hing Pan A, Maluf Nadim I, et al. Miniaturized spectrometer for biochemical analysis[J]. Sensor and Actuators, 1997, 58(1): 61 - 66.

## The state of the art of micro spectrometers

JU Hui, WU Yi-hui

(Chungchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Spectrometer is an instrument for physical and chemical analysis, and is widely used in many fields. The development of micromachining and the MOEMS technology make it possible to be miniaturized. The paper mainly describes the micro spectrometers with novel filtering technique, optical fiber based integrated micro-spectrometers and integrated spectrometers. The miniaturization of spectrometers is one of the important developing trends for micro-instruments of our country.

**Key words:** MOEMS; miniaturization; optical fibers; spectrometers

**作者简介:**鞠 挥(1970-),男,吉林长春人,1992年7月毕业于华东化工学院机械工程系,获得学士学位,1999年4月毕业于吉林工业大学机械工程系,获工学硕士学位。现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士学位,主要从事微机械、微光机电系统技术等方面的工作。