

微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高

贾 辉, 姚 勇

哈尔滨工业大学深圳研究生院, 电子与信息工程学科部, 激光信息技术研究中心, 广东 深圳 518055

摘 要 微小型光谱仪的设计制作可以采用多种方法, 其结构特点和光谱分辨率也各不相同, 目前实用高光谱分辨率微小型光谱仪采用的是光栅色散型光学系统。简要回顾了微小型光谱仪的发展过程, 分析了典型的光栅色散型微小型光谱仪采用的光学系统, 如基于罗兰圆的光学系统, 基于 Czerny-Turner 的光学系统的特点, 总结了提高微小型光栅光谱仪光谱分辨率采用的方法和技术, 特别是解决光谱仪的微小型化和光谱分辨率之间的矛盾以及测量光谱范围和光谱分辨率之间的矛盾的方法, 从而为新型微小型光谱仪的研制提供经验和借鉴。

关键词 微小型光谱仪; 光谱分辨率; 罗兰圆; Czerny-Turner 光学系统

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2007)08-1653-04

引 言

微小型光谱仪自从它诞生的那一天起, 就显示了它无与伦比的优越性。它结构紧凑、体积小、重量轻、探测速度快、使用方便、耗能耗材少、性能稳定、寿命长、可集成化、可批量生产以及成本低廉等等, 特别是它易于实现模块化, 可以进行实时及多通道分析, 具有现场应用价值, 并且它还具有二次开发性能, 可以利用微小光谱仪来进一步制造其他分析仪器。微小型光谱仪有可能取代传统的光谱仪, 它的发展也是十分迅速的。然而和传统光谱仪相比, 它也存在一些缺点和不足, 探索解决这些问题是微小型光谱仪研究的重要课题。

光栅色散型光谱仪的光谱分辨率在很大程度上和光谱仪光学系统的色散距离有关, 人们常说半米的光谱仪, 一米的光谱仪, 其实也是说光谱仪的光谱分辨率大致是多少。可见, 光谱仪要想有很高的光谱分辨率, 就要做得很大, 显然对于微小型光谱仪这是很难实现的。那么怎样提高微小型光谱仪的光谱分辨率呢?

本文首先简短的回顾了微小型光谱仪的发展过程, 特别是光谱仪在微小型化过程中所采用的技术。综述了光栅色散型微小型光谱仪, 也是目前实用的光谱分辨率最高的微小型光谱仪, 其典型光学系统的结构特点和提高微小型光谱仪光谱分辨率所采用的方法。

1 微小型光谱仪概述

随着现代科学技术的不断发展, 微机械技术的产生以及微小光学元器件的开发成功, 如微型全息光栅, 以及高像素的 CCD 探测器等, 使得光谱仪的微小型化成为可能。人们在设计微小型光谱仪时, 也采用了多种方法和多种思路。从制作方法和工艺上, 概括起来可以分为两大类, 一类是基于微机械技术和工艺的微型光谱仪^[1,2], 一类是采用微型元器件的小型化光谱仪。

微机械技术是在微电子的平面硅工艺基础上发展起来的, 主要包括体硅加工技术、表面硅加工技术、高深宽比加工技术以及键合封装技术等。利用微机械技术可以制作各种不同的三维微结构, 如微光栅、微透镜、反射镜及光电接收单元等, 同时因为集成电路也是在硅材料上制作的, 这样就可以在同一片硅衬底上实现完整的微型光谱仪器的制作。各国在开发新的微型光谱仪过程中, 几乎采用了所有大型光谱仪的原理、技术和方法, 主要有 Fabry-perot 干涉仪原理、光栅光谱仪、二元光学技术、微滤光片技术、傅里叶变换调制技术等。

传统的光谱仪器一般都包括入射狭缝、准直镜、色散元件、聚焦光学系统和探测器。在单色仪中还要加上出射狭缝, 让整个光谱中一个很窄的部分照射到单像元探测器上。单色仪中的入射和出射狭缝往往位置固定而宽度可调, 通过旋转光栅来对整个光谱进行扫描。随着新的光学器件和技术

收稿日期: 2006-05-10, 修订日期: 2006-08-20

基金项目: 总装备部项目(51417080104H T0140)资助

作者简介: 贾 辉, 1970 年生, 哈尔滨工业大学深圳研究生院博士后 e-mail: jiahuijiah@yahoo.com

不断地产生和发展,使光谱技术产生了一次飞跃^[3]:采用全息光栅,可以制作出微型平像场光谱仪;应用低噪声、高灵敏度的硅 CCD 线列阵接收器,在毫秒量级可以扫描一个相当宽的光谱区,而不必移动光栅;最后运用计算机处理和显示实验数据,更加快捷。通过采用这些先进的技术,就可以不用扫描机构和传统的光电倍增管及其高压电路,大大减小光谱仪的体积,同时还可使整个光谱仪固定在一起,使其坚固、耐冲击、便于携带,进而很方便地搭建起由光源、取样附件和光谱仪组成的测量系统。这种光谱仪是微型化了的的光谱仪,是微型光谱仪发展的一个主要方向。

2 典型的光栅色散型光学系统

基于微机械技术和工艺的微型光谱仪由于受到制作工艺和体积的限制,很少选用复杂的光学系统,通常采用简单光栅色散系统,或者稍微复杂的光学系统,如罗兰圆光学系统。采用微型元器件的微型化光谱仪,不像基于微机械技术和工艺的微型光谱仪那样受到工艺和体积的限制,能够选用较多的元器件,从而制作性能较好的光谱仪。因此基于微型元器件的微型化光谱仪没有采用简单的光栅色散光学系统,它的光学系统要相对复杂,有的采用罗兰圆光学系统,有的采用 Czerny-Turner 光学系统,设计思想和采用的光学系统各种各样,其性能也有差异。

2.1 简单光栅色散光学系统

利用微机械加工方法直接在 CCD 成像器件上制作透射衍射光栅研制微型光谱仪具有代表性的是, Gaylin^[4]等首先在石英衬底上利用电子束曝光刻出掩蔽层铬的光栅图形,然后使用反应离子刻蚀对石英衬底进行加工,得到深度为 0.63 μm 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 nm/像元,分辨率为 74.4。这种微型光谱仪由于色散后光束直接投射在 CCD 像元的表面,光程较短,为了增大色散率,要利用电子束光刻技术在石英衬底表面上制作周期为 0.8 μm 的光栅,同时由于没有经过成像物镜的聚焦,能量较为分散,分辨率不可能太高^[5]。

2.2 罗兰圆光学系统

罗兰圆光学系统,是最简单的凹面光栅成像系统,在这一系统中,凹面光栅既是分光元件,又是成像器件,也只有这一光学元件。传统光谱仪一般较少应用该光学系统,除了直读光谱仪和真空紫外摄谱仪由于其特有的无可替代的作用而被作为经典的应用之外,其他形式的结构并没有被普遍采用。但是,它在微型光谱仪的设计中有着很大的应用价值,将入射狭缝置于罗兰圆上,探测器置于谱面上,即构成最简单的光谱仪。当然,由于探测器是平面,而谱面是曲面,二者不能重合,因此分辨率不可能高。但是,为了微型化,牺牲了光谱分辨率,在微型光谱仪的设计中,基于微机械技术和工艺的微型光谱仪以及采用微型元器件的微型化光谱仪都有采用这一光学系统的,有些还进行了各种改进。

德国 Microparts 公司利用 LIGA 技术开发的 Microspec Vis2000 微型光谱仪^[6]采用了反射式凹面光栅,光学系统采

用了罗兰圆系统。输入光由光纤导入波导,用 LIGA 技术制作的凹面光栅将入射光色散并反射成像在入射光纤一侧,再反射 45° 向下到光电二极管阵列探测器上。该光谱仪在紫外和可见波段光谱分辨率可达 10 nm,光谱范围为 320~920 nm。该光谱仪没有把光学系统制作在芯片里,而是在芯片上的一个波导里,增加了色散光程,增加了入射光通量。

美国 StellarNet 公司开发的 EPP2000C UV-Vis^[7]和中国的普析通用公司开发的 PORS-15^[8]微型光谱仪采用的是罗兰圆光学系统。在这种光学系统中,采用了利用全息记录技术获得的变间距曲线槽凹面光栅^[9],它具有校正像差的能力,经过像差修正的平场凹面全息光栅其色散的谱面是一个平面,可与接收器平面吻合,保证全波段都有良好的分辨率。这种采用微型元器件的微型光谱仪结构简单,光谱分辨率也有所提高,可达 0.5 nm,是一种很实用的微型光谱仪。

重庆大学光电工程系的温志渝、陈刚等研制的混合集成微型光纤光谱仪^[10,11]也是一种变相的罗兰圆光学系统,它的光学部分仅由入射光纤、凹面光栅和平面反射镜组成。同样,合理的设计凹面光栅可以在不采用附加光学元件的情况下实现成像谱面的平直,减小系统像差,提高系统成像质量。由于谱面与光栅位于两个平行面上,通过使用平面反射镜,采用折叠光路,不但可以减小光谱仪的体积,而且可使光栅与谱面位于同一平面上,从而有利于采用微组装技术和集成电路技术,实现探测器与全息光栅的混合集成,特别是使色散距离加长,提高了光谱分辨率,在采用芯径为 9 μm 、数值孔径为 0.1 的单模光纤时,它的理论分辨率可达 1 nm,实验测得的实际分辨率约为 4 nm。这种微型光谱仪的光学系统具有结构简单紧凑、光学面少、体积小、光能利用率高等优点。

2.3 Czerny-Turner 光学系统

Czerny-Turner 光学系统^[12]是从 Ebert-Fastie 光栅光谱仪的基础上改进的,它采用平面光栅,用两块相同的小凹面反射镜分别作准直物镜和成像物镜, Czerny-Turner 光学系统分对称型和非对称型,在实际应用中也往往根据情况和要求做相应的改变。在高光谱分辨率微型光谱仪和微弱光谱探测中,多采用这种类型。

荷兰 Avantes 公司的 AvaSpec 系列微型光纤光谱仪^[13]采用对称式 Czerny-Turner 光学平台设计,焦距有 45 和 75 mm 两种。信号光由一个标准的 SMA905 接口进入光学平台,经一个球面镜准直,然后由一块平面光栅分光,经由第二块球面镜聚焦到一块一维线性探测器阵列上。该仪器可以达到的最大分辨率是 0.04 nm,最大分辨率时的测量光谱范围 75 nm。这种微型光谱仪是设计成功的较早采用微型元器件的微型光谱仪。

Jobin Yvon 公司开发的 Micro HR 微型光谱仪^[14]也是一种采用 Czerny-Turner 光学系统的光谱仪,它的光学系统紧凑,探测器采用了 CCD。和其他微型光谱仪相比,它保留了传统光谱仪的可以转动的光栅,这使它的测量光谱范围很宽,在 0.25 nm 的光谱分辨率下可达 0~1500 nm。它既可以做光谱仪,也可以做光栅扫描的单色仪。由于采用了手

动装置,所以存在一定的波长位置误差和重复误差。

在设计光谱仪的光学系统中,传统的光谱仪也采用折叠的光路设计,这样可以节省空间,使光谱仪更加结构紧凑小巧,但是对于有多个元器件的微型光谱仪,光路的折叠虽然能够压缩光谱仪的结构,然而还是不够。我们知道光的传播具有互不相干性,因此在设计光学系统时,光路可以交叉,这样就可以把许多光学元器件安装在一个很小的空间里,使光谱仪的体积进一步减小,仪器的精度和性能达到很高,可使这种很小的光谱仪达到那些很大的光谱仪的性能指标,如美国海洋公司的 HR4000^[15] 采用了交叉的 Czerny-Turner 光路设计,该仪器的光谱分辨率可达 0.02 nm,最高光谱分辨率时光谱范围 40 nm。

对于固定光栅的微型光谱仪,光谱分辨率提高了,但是测量光谱范围变窄了。复旦大学光学科学与工程系的陈良尧教授领导的课题组研制出一种兼顾光谱范围、分辨率和速度的折叠式光谱仪^[16],该光谱仪的光学系统也是一种 Czerny-Turner 光学系统。光辐射从入射狭缝进入,经平面镜反射后方向改变 90°,再由凹面反射镜准直成平行光束,并经滤光片滤光,光束由光栅色散后,由超环面反射镜成像到探测器上。该系统的特点是它有一个由 10 个子光栅组成的复合光栅,能够产生 10 个分立的光谱区。每个子光栅的槽密度均为每毫米 1 200 线,并按不同的入射角排列,在具有 1 340 × 1 300 像素的 CCD 上产生了 10 个沿水平方向分布的波长通道,每个子波长区的范围为 80 nm,覆盖了从 200 ~ 280 nm 到 920 ~ 1 200 nm 的波长窗口。通过各光栅的闪耀角与中心波长相匹配,使得每一个子波长区都具有相同的一级色散特性,从而在探测器上形成均匀的光谱分辨率。这种微型光谱仪独特的光栅排列使得无需任何位移部件就能将 268 mm 的光谱色散长度有效折叠成 10 个 26.8 mm 长的子色散区。由于无任何机械位移部件,使得最小的光谱获取时间仅受限制于将光谱从 CCD 传输到数据存储器件所需要的时间。该系统能在 200 ~ 1 000 nm 波长范围内具有 0.07 nm 光谱分辨率和 100 ms 获取时间。

3 总 结

在光栅色散型微型光谱仪的设计中,基于微机械技术

和工艺的微型光谱仪虽然体积很小,但是它的光学系统较简单,光谱分辨率不高。采用微型元器件的微型化光谱仪,光学系统相对复杂,它主要是从传统光谱仪演化而来。从传统光谱仪到微型光谱仪的关键一步是采用了阵列探测器,省去了光电倍增管及其高压电源和扫描机构,使光谱仪真正实现了微型化。应用多功能的光学元件代替其他多个光学元件或光学过程,是使微型光谱仪进一步小型化的一种方法。罗兰圆光学系统早已存在,只是由于它的缺点没有广泛应用,但是它符合微型光谱仪的设计思想,在这一光学系统中,只有一个光学元件凹面光栅同时进行分光 and 成像,可以使光学系统最大限度的小型化。而光谱面弯曲不适合平面探测器探测,也可以通过采用经过设计的全息凹面光栅使光谱色散在平面上解决这个问题。可以说,在微型光谱仪发展的早期阶段,更多的是考虑如何使微型光谱仪做得更小,以后随着微型光谱仪的越来越微型化,考虑更多的是光谱仪的光谱分辨率和测量光谱范围等微型光谱仪的性能。使光路折叠或者交叉,可以使光谱仪小型化的同时,增加色散距离,提高微型光谱仪的光谱分辨率。这一思想突出的体现在混合集成微型光纤光谱仪的设计中,如果把罗兰圆光学系统简单集成在仪器大小的装置里,分辨率只能达到 10 nm 左右,然而增加色散距离并使光路折叠,仪器体积变化很小,但其理论分辨率可达 1 nm,实际分辨率也有 4 nm。微型光谱仪的光谱分辨率提高了,但是它的测量光谱范围也变窄了。使光谱折叠可以拓宽测量光谱范围,陈良尧教授设计的光谱仪实质上是把一维的光谱折叠在二维的 CCD 探测器上。这样,同时保证了光谱仪的光谱测量范围和光谱分辨率。

微型光谱仪的发展已逐渐走向成熟^[17],各项性能也不断地得到完善,正广泛地应用到各个领域^[18,19];同时,微型光谱技术仍在不断地发展。本文总结微型光谱仪的发展过程和应用的方法、技术,为研制新型高光谱分辨率微型光谱仪提供经验和借鉴。

参 考 文 献

- [1] SHI Jun-feng, HUI Mei, WANG Dong-sheng, et al (史俊锋, 惠梅, 王东生, 等). Optical Technique (光学技术), 2003, 29(1): 13.
- [2] CHEN Fei-fan, YIN Ling, LI Yun-long (陈非凡, 殷玲, 李云龙). Microfabrication Technology (微细加工技术), 2002, (3): 1.
- [3] ZHANG Zhi-wei (张志伟). OME Information (光机电信息), 2004, (8): 14.
- [4] Yee Gaylin M, Maluf N I, Hing P A, et al. Sensor and Actuators, 1997, 58(1): 61.
- [5] JU Hui, WU Yi-hui (鞠挥, 吴一辉). Micronanoelectronic Technology (微纳电子技术), 2003, 40(1): 30.
- [6] UV/ Vis Microspectrometer Module. Boehringer Ingelheim Microparts Company, 2005. 1.
- [7] EPP2000C Concave Grating Spectrometer for UV-Vis Applications. Stellarnet, inc., 2006. 1.
- [8] PORS-15 Spectrophotometer (系列便携式光谱测定仪). Beijing: Beijing Purkinje General Instrument Co., Ltd. (北京普析通用仪器有限责任公司). 2004. 3.
- [9] Chen Yue-Rui, Sun Bin, Han Tao, et al. Optics Express, 2005, 13(25): 10049.
- [10] WEN Zhi-yu, CHEN Gang, WEN Zhong-quan, et al (温志渝, 陈刚, 温中泉, 等). Acta Optica Sinica (光学学报), 2003, 23(6): 740.

- [11] CHEN Gang, WEN Zhi-yu, WEN Zhong-quan, et al(陈 刚, 温志渝, 温中泉, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(6): 1232.
- [12] LI Nian-zeng, YAN Da-yuan(李念曾, 闫达远). Radiometry and Photometry(辐射度学和光度学). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京: 北京理工大学出版社), 1990. 129.
- [13] Product Catalog. Spectrometers. Avantes Company, 2006. 6.
- [14] Spectrometers & Monochromators, MicroHR. Jobin Yvon Company, 2006. 1.
- [15] Product Catalog. Spectrometers and Accessories. Ocean Optics, Inc., 2004. 29.
- [16] LI Chao-ming, WU Jian-hong, TANG Min-xue(李朝明, 吴建宏, 唐敏学). Laser Journal(激光杂志), 2005, 26(2): 57.
- [17] YU Tian(雨 田). OME Information(光机电信息), 2004, (5): 18.
- [18] CHEN Gang, WEN Zhi-yu, WEN Zhong-quan, et al(陈 刚, 温志渝, 温中泉, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(3): 439.
- [19] LI Feng, WU Yi-hui, ZHAO Hua-bing, et al(李 锋, 吴一辉, 赵华兵, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(4): 633.

Characteristics of Typical Optical Systems with Diffractive Gratings of Micro-Spectrometers and Improvement of Spectrometer's Resolution

JIA Hui, YAO Yong

Laser Information Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China

Abstract Many ways have been practiced in designing and fabricating micro spectrometer, each has its own characteristics distinguished by different spectral resolution and other performances. Micro spectrometers applied presently with high spectral resolution usually adopt optical systems with dispersive components being diffractive gratings. The development of micro spectrometer is reviewed briefly, and typical optical systems are analyzed and discussed, such as optical system based on Roland circle and that based on Czerny-Turner structure. The techniques and methods as well as the experiences of improving micro spectrometer's spectral resolution are summarized, especially the tradeoff between miniaturization and spectral resolution, and the balance between spectral range and spectral resolution are considered. This summary gives a outline of the optical systems' characteristic of dispersive micro-spectrometer, and it can be a reference for new micro spectrometer's designing.

Keywords Micro spectrometer; Spectral resolution; Roland circle; Czerny-Turner optical system

(Received May 10, 2006; accepted Aug. 20, 2006)