

微型DMD哈达玛变换近红外光谱仪

王晓朵^{1,2} 刘 华^{1*} 党博石¹ 全向前^{1,2} 许家林¹ 熊 峥^{1,2} 李云鹏^{1,2} 卢振武¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出并设计了一个应用数字微镜(DMD)的哈达玛变换近红外光谱仪。以光栅为分光元件,用DMD代替传统的机械式哈达玛编码模板进行光学调制,用InGaAs单点光电二极管探测调制后的光谱信号。综合考虑分辨率、能量利用率、像差和体积等因素,合理选择狭缝长和宽、光栅入射角及透镜焦距,采用光路分段优化法进行光学设计,通过DMD面阵上的狭缝像和探测器上的点斑尺寸等分析设计结果。模拟分辨率优于4 nm,探测器上点斑尺寸小于3 mm,光学系统尺寸为75 mm×25 mm×85 mm。为提高光谱仪对弱光谱信号的探测能力,在系统前加入了一种集光结构,使从光纤出射的光能的利用率理论值提高24.2%。实验结果表明,该光谱仪的光谱分辨率优于6 nm,通过添加集光结构可以大大提高光谱仪的能量利用效率。该光谱仪具有分辨率高、能量利用率高、体积小、成本低等优点,有广阔的应用前景。

关键词 光谱学; 集光结构; 哈达玛变换; 数字微镜

中图分类号 TH744.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0530003

Miniature Digital Micro-Mirror Device Hadamard Transform Near-Infrared Spectrometer

Wang Xiaoduo^{1,2} Liu Hua¹ Dang Boshi¹ Quan Xiangqian^{1,2} Xu Jialin¹

Xiong Zheng^{1,2} Li Yunpeng^{1,2} Lu Zhenwu¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A Hadamard transform near-infrared spectrometer used digital micro-mirror device (DMD) is proposed and designed. A grating is used for light diffraction, a DMD is applied instead of the traditional mechanical Hadamard masks for optical modulation, and an InGaAs single point detector is used as the optical sensor. Suitable length and width of the slit, incident angle of the grating and the focal length of lens are selected by analyzing some key influential factors to the spectrometer's performance, such as resolution, utilization ratio of light energy, volume of the system and costs. Section optimization method is used during the design of the optical system, and then the images of slit on the DMD, the size of the spot on detector are analyzed. The simulation resolution is less than 4 nm, the spot size on InGaAs single point detector is smaller than 3 mm, and the size of the optical system is 75 mm×25 mm×85 mm. In order to improve the ability in detecting teeny light signal, a light collecting structure is proposed, which can improve the utilization ratio of light energy by 24.2% theoretically. The experiment results show that the spectral resolution of the system is better than 6 nm, and the light collecting structure can significantly improve the utilization ratio of light energy. It's obvious that the spectrometer is high-resolution, portable and low-cost, which has broad application prospects.

Key words spectroscopy; light collecting structure; Hadamard transform; digital micro-mirror device

OCIS codes 080.2740; 300.6190; 300.6320; 230.1950

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61137001)

作者简介: 王晓朵(1988—),女,博士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: wangxsxs@126.com

导师简介: 卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学中的应用基础方面的研究。

E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

*通信联系人。E-mail: liuhua_rain@yahoo.com.cn

1 引 言

近红外光谱分析技术作为一种有力的科学分析工具已广泛应用于农产品、石化产品、临床诊断、环境检测等领域。作为近红外光谱技术的重要组成部分,近红外光谱仪的研制也成为该领域广泛关注的热点^[1-3]。

随着研究和应用领域对光谱仪要求的提高,无接触、快速、低成本、性能稳定可靠的微小型光谱仪逐渐成为该领域的发展趋势^[4-7]。目前数字变换式微型近红外光谱仪主要有傅里叶变换式和哈达玛变换式两种。现代数字变换式光谱仪较传统光谱仪具有光通量大、信噪比高、所得光谱信息丰富和扫描速度快等优点。傅里叶变换光谱仪因存在可动部件,对环境要求较高,主要用于实验室分析。基于数字微镜(DMD)的哈达玛变换(HT)光谱仪无可动部件,运算和处理时间优于傅里叶变换光谱仪,可实现高速、高分辨率、高信噪比和极强的环境适应能力的完美结合^[8]。欧美等发达国家光谱仪发展迅速,已出现很多商品化的新型便携式哈达玛变换近红外光谱仪,在分辨率、稳定性和仪器间的高度一致性等方面具有明显优势。国内重庆大学、武汉大学等对哈达玛变换光谱仪进行了研究并取得一定的成果。但现有的光谱仪为提高系统分辨率则光能利用率较低,提高了光能利用率则分辨率下降,而且国内近红外光谱仪存在体积大、成本高等问题。要解决这些矛盾,必须对哈达玛变换光谱仪进行深入研究,为仪器的商品化进行有益探索。

本文通过分析入射狭缝和光栅这两个对系统光通量和分辨率影响较大的因素,合理选择系统参数,设计了一种应用DMD的哈达玛变换近红外光谱仪,并在光纤出射端添加了一种集光结构,大大提高了系统的光能利用率,提高了光谱仪对弱光谱信号的检测能力。以DMD为核心器件进行光谱选通,合理设计和优化光路结构使光谱仪具有高分辨率,单点探测器分时检测实现了光谱仪的低成本和小体积,DMD与哈达玛变换的结合使光谱仪可以快速、高信噪比地检测微弱光谱信号。实验证明微型DMD哈达玛变换近红外光谱仪是可行的,有广阔的应用前景。

2 哈达玛变换光谱仪原理

基于DMD的哈达玛变换光谱仪^[9-11]由光源、分光系统、成像系统、探测系统以及光谱信息采集处理系统五部分组成,整个光学系统的基本结构如图1所示。待测光经狭缝入射到分光成像系统,经准直镜准直为复色平行光,在平面反射光栅表面色散为光谱带,经成像透镜会聚,按波长顺序依次入射到DMD的不同位置进行波长选通,之后由透镜聚焦在单点探测器上进行光谱采集。检测出经所有哈达玛变换模板调制后的相应的光谱信号,借助计算机进行哈达玛逆变换解码^[12,13],便可以得到原始光谱信号的信息。

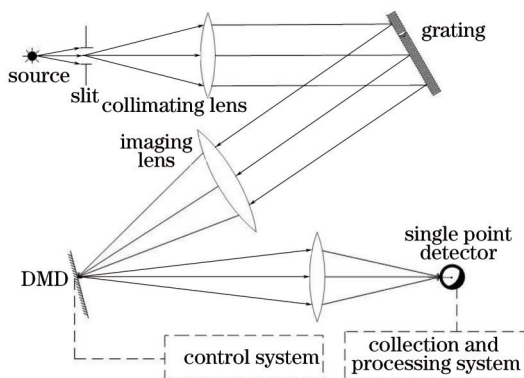


图1 哈达玛变换光谱仪的光学系统基本结构

Fig.1 Basic structure of the HT spectrometer's optical system

3 光学系统设计

3.1 设计指标

参考国内外商品化微型近红外光谱仪性能指标,考虑到自身设计和研发能力,提出如下指标。光谱范围:950~1600 nm;光谱分辨率:优于6 nm;光谱仪尺寸:小于100 mm×50 mm×100 mm。

3.2 光学系统参数设计

光谱仪光学系统设计过程中,需综合考虑工作谱段、分辨率、光通量、体积及其与探测器的配合^[14-15]。

系统采用的DMD由1024×768个微镜组成,每个微镜尺寸为13.68 μm×13.68 μm,静电驱动下可以翻转±12°,对950 nm~1600 nm光波的反射率大于95%。

实际光学系统中,入射狭缝宽度往往不能忽略,从而在DMD面阵上造成一定的光谱增宽现象^[16]。当入射缝宽为W时,系统分辨率为:

$$R = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)/2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{4\bar{\lambda} + W/(d/d\lambda)}{4\Delta\lambda + 2W/(d/d\lambda)}, \quad (1)$$

式中 $d/d\lambda$ 为光栅的线色散率, λ_1 、 λ_2 为根据瑞利判据恰好可分辨的两波长。 $dR/dW < 0$, 减小入射狭缝宽度可提高分辨率,但入射光通量减小,信号强度降低。由图2可知,当狭缝宽度小于25 μm时,分辨率随缝宽变化已不显著,但此时光能利用率较低。当狭缝宽度为50 μm时,系统分辨率及光强均可以满足系统要求,所以入射缝宽设为50 μm。当入射光经光纤进入狭缝时,狭缝越长进入狭缝的光通量越少;同时狭缝越长DMD面上的谱线弯曲现象越明显,不利于光谱探测。参考目前市场已有微型光谱仪的入射狭缝长度,选取狭缝长度为1 mm。

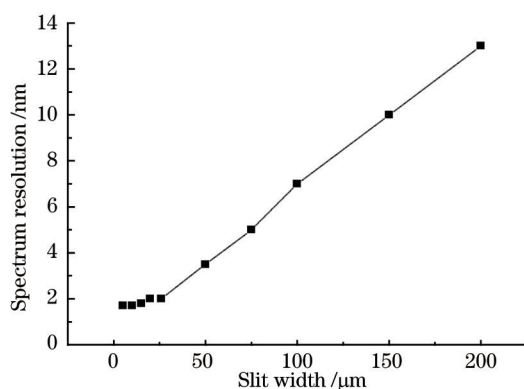


图2 分辨率随缝宽变化曲线

Fig.2 Variation of resolution as a function of slit width

由(1)式得, $dR/d(d/d\lambda) > 0$, 减小光栅常数 d 和采用高光谱级次 m 均可有效提高光谱分辨率。然而,减小 d 会使成像物镜的轴外像差增大; m 取值也受光栅方程限制。根据衍射光栅理论^[17]取 $m=1$, $d=300 \text{ g/mm}$ 。根据空气中平面光栅衍射效率公式:

$$\eta_m = \sin^2 \left\{ m - \frac{h}{\lambda} \left[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 i} - \cos i \right] \right\}, \quad (2)$$

可得不同波长衍射效率随入射角的变化曲线(图3)。 h 为光栅最大高度, $n(\lambda)$ 为光栅在波长 λ 时的基底折射率, i 为入射角度。由图可得,入射角为某一定值时,不同波长可同时达到最大衍射效率。本系统中准直光以 12.6° 入射到光栅,保证不同波长的衍射效率都取得最大值,充分利用入射光能量^[18]。

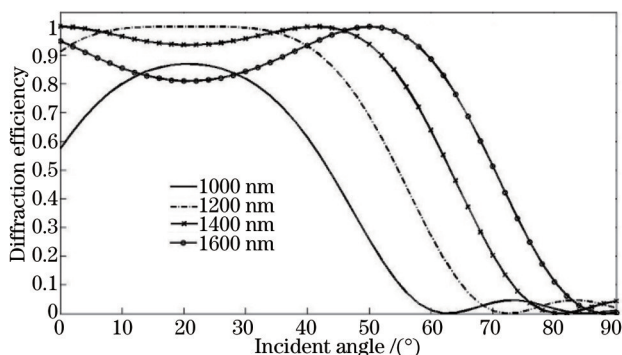


图3 衍射效率与入射角、入射波长关系曲线

Fig.3 Diffraction efficiency changes with incident angle and wavelength

准直透镜焦距越大,准直光线平行度越好;但在数值孔径不变的情况下,增大焦距会使系统像差增大、杂散光增加,降低光谱分辨率,同时使光谱仪体积增大、成本增加,需权衡两方面矛盾选择合适的准直焦

距。成像透镜的焦距则可根据

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda \cos \sigma} = \frac{m}{d \cos \theta} \frac{f_2}{\cos \sigma} \quad (3)$$

来确定, σ 为成像透镜中心轴与焦平面法线的夹角。为使 DMD 工作在最佳状态, 光线应与“on”态的 DMD 表面法线成 12° 角入射, 此处取 $\sigma=12^\circ$ 。由此可得 $f_2=53.5$ mm。本系统中, 准直透镜焦距取 25 mm, 成像透镜焦距取 50 mm。

光谱仪相对孔径较小, 高级像差很小, 所以只需考虑初级像差。球差会严重影响平行光束的收缩或发散, 轴向色差和色球差会导致不同波长的光束产生不同程度的收缩和发散。必须对透镜的球差和色差进行校正。系统采用双胶合透镜校正像差, 采用光路分段优化法, 先设计优化单个透镜, 最后对整个系统综合优化, 达到最佳效果。

3.3 光学系统设计结果

根据各光学元件的参数, 用 Zemax 光学设计软件对光学系统结构进行模拟, 结果如图 4 所示, 整个光学系统的尺寸为 75 mm×25 mm×85 mm。

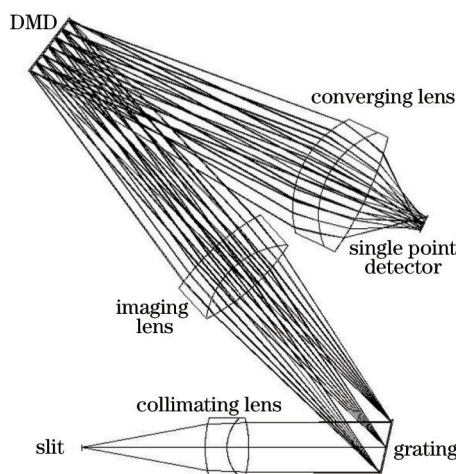


图 4 光学系统结构

Fig.4 Structure of optical system

该光学系统中 DMD 表面为系统的理论焦面, 系统的理论光谱分辨率 $\delta\lambda=0.67$ nm。根据采样定理, 光谱仪的理论像元分辨率 $\delta\lambda'=1.34$ nm。 $\delta\lambda'>\delta\lambda$, 系统分辨率受像元分辨率的限制。不考虑狭缝宽度影响时, 系统的分辨率为 $\Delta\lambda=2$ nm, 大于理论值, 这是由于准直透镜和成像透镜的像差所致。考虑狭缝宽度导致 DMD 面上的谱线展宽后, 系统的光谱分辨率应为: $\Delta\lambda'=\Delta\lambda+W/2(dl/d\lambda)=3.22$ nm。通过观察狭缝在 DMD 面上所成像得出的系统光学分辨率约为 4 nm, 如图 5 所示, 其原因是狭缝宽度引起一定量的轴外像差, 且不同波长的光经成像透镜后的焦点并不在一个平面上。结果表明, 系统分辨率满足设计要求。

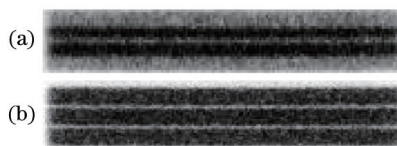


图 5 DMD 接收面上狭缝像。(a) 波长分别为 1300 nm、1304 nm、1308 nm; (b) 波长分别为 1300 nm、1307 nm、1314 nm

Fig.5 Images of incident slit on DMD. (a) $\lambda=1300$ nm, 1304 nm, 1308 nm; (b) $\lambda=1300$ nm, 1307 nm, 1314 nm

为满足光谱仪微型化及低成本的要求, 系统使用单点探测器^[9]进行光谱信号探测。探测器接收面上点斑直径小于 3 mm, 可有效减小光谱仪体积、降低成本, 同时提高探测器的灵敏度和信噪比。

系统中光纤直径为 105 μm , 数值孔径为 0.22。当光线从光纤直接入射到狭缝时, 进入狭缝的能量, $\Phi_1 \approx 6.4\% \Phi_0$, Φ_0 为光纤出射的光能量。由于近红外光通常为弱光谱信号, 为提高系统的光能利用率, 对待测光的入射方式进行如图 6 所示的改进, 在入射狭缝前添加集光结构。从光纤出射的待测光经透镜准直为复色平行光, 然后由

柱面镜聚焦在狭缝处,圆形光束变为平行于狭缝的带状光,带状光的长度与狭缝接近,宽度 $W'=143\text{ nm}$,出射光束的数值孔径与狭缝后面的光学系统的数值孔径相匹配,数值为 0.18。添加集光结构后,进入狭缝的光能 $\Phi_2=W(\tau_1)^2\tau_2\Phi_0/W'=(50/143)(0.96)^20.95\Phi_0=30.6\%\Phi_0$, τ_1 、 τ_2 为玻璃的透射率。利用 TracePro 软件对通过狭缝的能量进行模拟,未添加集光结构和添加集光结构进入狭缝的能量分别为 $\Phi_1=6.3\%$, $\Phi_2=29.7\%$,与计算结果一致。 $\Phi_2>\Phi_1$,表明相同条件下该集光结构可以大大增加进入狭缝的光通量,提高待测光的能量利用率和光谱信噪比,改善光谱仪性能。集光结构的总长度为 18 mm。



图 6 集光结构

Fig.6 Structure of gathering incident light

4 实验结果与分析

该微型光谱仪系统中,DMD代替传统光谱仪中的阵列探测器位于成像透镜的焦平面,所以DMD的标定是光谱仪标定的关键。图7为系统实验装置,其中集光结构、狭缝和准直透镜均安装在图中白色矩形框中的圆筒中,白色箭头代表光的传播方向。图8为分别在光栅前使用990 nm和1060 nm滤光片后,由单点探测器测量得到的光谱曲线,横坐标为DMD上对应的微镜序号(假设波长较小的谱线对应的微镜序号也较小)。该样机测得的光谱曲线与由AvaSpec光谱仪测得的光谱曲线一致。通过这种方式可以在测量光谱谱线的同时,对DMD的微镜进行简略标定。由图8(a)和(b)可以看出,990 nm谱线对应第25个微镜,1060 nm谱线对应第54个微镜。由此可以计算出每个微镜对应的光谱宽度约为2.4 nm。由图8可以看出每条谱线的半峰全宽对应约2.5个微镜,则每条谱线的半峰全宽约为6 nm。考虑到由成像透镜聚焦在DMD上光谱面弯曲问题,在设计过程中让中心波长1300 nm出的分辨率最高,离中心波长越远的波长(如950 nm和1600 nm)分辨率越低。因此可以得出,该光谱仪的光谱分辨率约为6 nm。实验得到的分辨率值略高于模拟值,这是由于实验过程中很难将DMD的放置角度精确的调到理想的位置,光学部件之间的相对位置的误差,以及狭缝宽度和透镜曲率的加工误差对实验结果也有一定的影响。

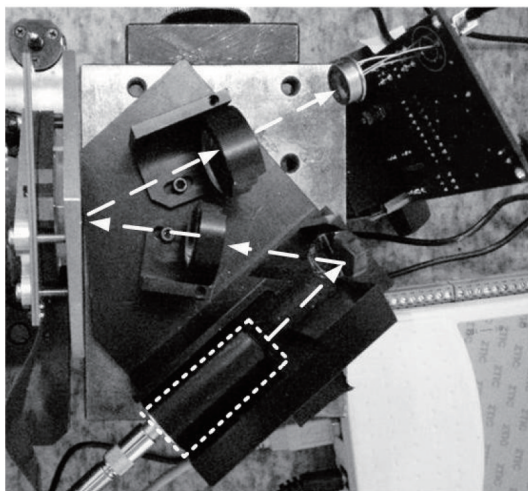


图 7 样机实验系统图

Fig.7 Spectrometer experiment system

用 OPHIR Nova II 光功率计对未添加和添加集光结构时通过狭缝的能量分别进行测试,反复测试结果的平均值为 $\Phi_1=6.1\%\Phi_0$, $\Phi_2=21.3\%\Phi_0$ 。实验结果表明,该集光结构可以大大提高光谱仪的能量利用率。 Φ_2 与理论计算结果相差较大的主要原因为,实验中使用的光源为海洋光学 LS-1 卤钨灯,其光谱范围为 360~2000 nm,光谱仪测量波长外的光会增大集光结构形成的带状光束的宽度,使得进入狭缝的能量百分比下降。

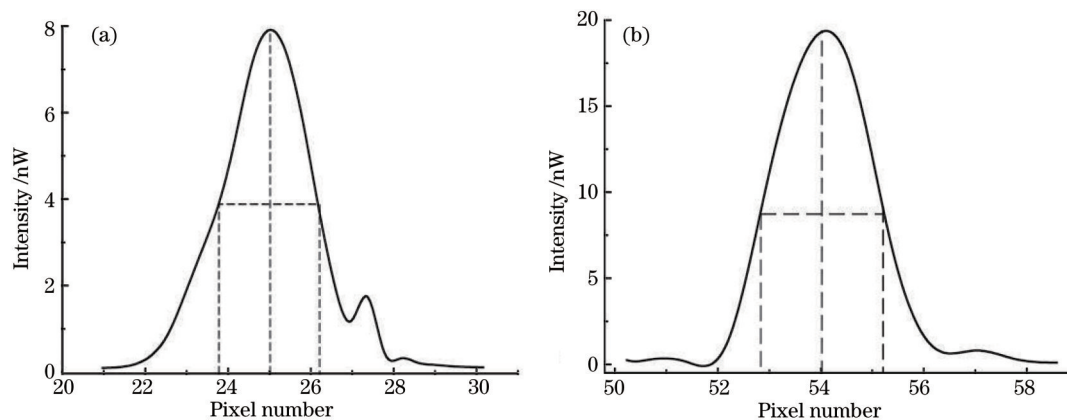


图8 光谱测量结果。(a) 990 nm的测量谱线;(b) 1060 nm的测量谱线

Fig.8 Spectra measurement result. (a) Spectrum of 990 nm; (b) spectrum of 1060 nm

5 结 论

传统近红外光谱仪器的庞大体积、昂贵价格和较低的能量利用率在一定程度上限制了光谱仪器的发展。近年来微型化近红外光谱仪体积小、性价比高且使用方便,大大推动了光谱仪在各领域的应用。本文在光谱仪分辨率较高的情况下,合理设置狭缝和光栅参数提高光谱仪的能量利用率。设计的基于DMD的哈达玛变换近红外光谱仪工作波段为950~1600 nm;InGaAs单点探测器上接收的光斑尺寸小于3 mm,有效减小了光谱仪的体积,降低了成本,同时提高了灵敏度和集成度。原理样机实验结果表明,光谱仪的分辨率为6 nm,通过在光纤后添加一种集光结构可以将光谱仪的能量利用率提高至少15.3%,有利于微弱信号的检测。将光谱仪的光学系统集成成为一个独立的模块,可以增加光谱仪的灵活性,使该光谱仪能够应用于多种领域。

参 考 文 献

- 1 Lu Wanzhen, Yuan Hongfu, Zhu Xiaoli, *et al.*. Near-Infrared Spectroscopy of China[M]. Beijing: Sinopec Press, 2006: 634-641.
陆婉珍,袁洪福,褚小立,等.中国近红外光谱技术[M].北京:中国石化出版社,2006:634-641.
- 2 M Blanco, I Villarroya. NIR spectroscopy: a rapid response analytical tool[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2002, 21(4): 240-250.
- 3 Chen Xingdan. Possibility of noninvasive clinical biochemical examination by near Infrared spectroscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(5): 759-763.
陈星旦.近红外光谱生化无创检验的可能性[J].光学精密工程,2008,16(5):759-763.
- 4 An Yan, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design and development of optical system for portable Raman spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0330001.
安岩,刘英,孙强,等.便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制[J].光学学报,2013,33(3):0330001.
- 5 Shi Manman, Huang Meizhen. Design of a small rapid scanning near infrared spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(4): 591-595.
施漫漫,黄梅珍.小型快速扫描近红外光谱仪的研制[J].光子学报,2011,40(4):591-595.
- 6 Cheng Liang. Study and Application of A micro Spectrometer System[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008: 1-11.
程梁.微型光谱仪系统的研究及其应用[D].浙江:浙江大学,2008:1-11.
- 7 Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayinheshig, *et al.*. Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 52-57.
刘玉娟,崔继承,巴音贺西格,等.凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J].光学精密工程,2012,20(1):52-57.
- 8 Li Yang, Zhu Yong, Chen Jianjun, *et al.*. Novel Fourier transform infrared spectroscopy detection system based on Hadamard transform[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s130003.
李阳,朱永,陈建君,等.基于哈达玛变换的新型傅里叶变换红外光谱探测系统[J].光学学报,2014,34(s1):s130003.
- 9 Fan Yu, Wu Yihui, Xuan Ming, *et al.*. Hadamard mini-spectrometer based on 2D multi-micro-silicon-slit matrices[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2724-2729.

- 范 玉, 吴一辉, 宣 明, 等. 应用二维微硅片狭缝阵列的阿达玛光谱仪[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2724-2729.
- 10 Robert M Hammaker, Richard A DeVerse, Daniel J Asunskis, *et al.*. Hadamard Transform Near-infrared Spectrometers[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006: 453-460.
- 11 David C Tilotta, Zhou Zhou. Design and performance of a Hadamard transform infrared spectrometer with no moving parts[J]. Applied Spectroscopy, 1995, 49(5): 1338-1346.
- 12 Zhang Panbo. Research on encoding mask in Hadamard transform spectrometer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009, 2: 16-24.
张攀博. 哈达玛变换光谱仪中编码模板的研究[D]. 长春: 理工大学, 2009, 2: 16-24.
- 13 Zhang Bingquan. Method of decode in Hadamard transform spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 1984, 4(3): 229-234.
张炳泉. 阿达玛变换光谱的解码方法[J]. 光学学报, 1984, 4(3): 229-234.
- 14 Tian Gaoyou, Chu Xiaoli, Yuan Hongfu, *et al.*. Main performance indexes and evaluation methods summarization of near infrared spectrometer[J]. Modern Scientific Instruments, 2005, (4): 17-20.
田高友, 褚小立, 袁洪福, 等. 近红外光谱仪器主要技术指标与评价方法概述[J]. 现代科学仪器, 2005, (4): 17-20.
- 15 Sun Jiayin, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Comparative study on performances of long-wave infrared imaging spectrometers based on Offner form and Dyson form[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 130003.
孙佳音, 刘 英, 孙 强, 等. Offner型与Dyson型长波红外成像光谱仪性能对比研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 130003.
- 16 Wang Xingquan, Feng Kecheng, Zhu Guoxian, *et al.*. Calculating equations for resolution and wavelength range of grating spectrograph[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1167-1170.
王兴权, 冯克诚, 朱国贤, 等. 光栅光谱仪分辨率及波长范围计算公式的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1167-1170.
- 17 Xie Jinghui, Zhao Dazun, Yan Jixiang. Tutorial of Physical Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 188-207.
谢敬辉, 赵达尊, 阎吉祥. 物理光学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 188-207.
- 18 Sun Quanshe, Wang Shaoshui, Zhu Xingbang, *et al.*. Research on the test for relative spectral power of grating spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s212003.
孙权社, 王少水, 朱兴邦, 等. 光栅型光谱仪光辐射测试能力研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s212003.
- 19 M Kraft, A Kendam, A Frank, *et al.*. Single-detector micro-electro-mechanical scanning grating spectrometer[J]. Anal Bioanal Chem, 2006, 386(5): 1259-1266.

栏目编辑: 韩 峰