

doi:10.3788/gzxb20134208.0902

新型阿达玛变换光谱仪

党博石¹, 刘华¹, 王晓朵^{1,2}, 许家林¹, 卢振武¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了克服经典光谱仪中由于入射狭缝的遮挡导致的系统内光通量很小的缺点, 提出了一种新型阿达玛变换光谱仪的设计理念. 给出了以柱面镜来整形光束的方法, 利用理论计算得出含有数字微镜阵列光谱仪的光谱分辨能力和像元分辨能力, 确定了该类光谱仪的极限分辨率. 根据几何光学成像理论, 提出一种增大成像透镜焦距的优化方案, 可以提高光谱分辨率, 并且更有益于机械装调. 实验结果表明, 该阿达玛变换光谱仪具有高光通量、提高 5 倍的信噪比、较小的光谱带宽 (3.5 nm) 等特点, 可为微弱光谱信号的检测提供便利条件; 光谱仪选择的近红外探测器无需制冷, 降低了阿达玛变换光谱仪的制作成本, 具有更强的市场竞争力.

关键词: 近红外光谱仪; 阿达玛变换; 柱面镜; 光谱带宽

中图分类号: O433.1; TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0902-6

A New Kind of Hadamard Transform Spectrometer

DANG Bo-shi¹, LIU Hua¹, WANG Xiao-duo^{1,2}, XU Jia-lin¹, LU Zhen-wu¹

(1 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to overcome the shortcoming that the luminous flux of the classical spectrometer is small due to the occlusion of the entrance slit, a design concept of the new kind of Hadamard transform spectrometer is proposed. A method of shaping the beam by a cylindrical lens is given. Using theoretical calculations of the spectral resolution ability and the pixel resolution ability of the spectrometer, containing a digital micromirror array, the limit class of the spectrometer resolution can be determined. Based on the geometric theory of optical imaging, an optimization program of the more focal length of the imaging lens is proposed, which is able to obtain the higher spectral resolution and the more beneficial to the mechanical alignment. The advantages of the new Hadamard transform spectrometer are that it has a high luminous flux, the signal-to-noise ratio is 5 times more than that of traditions, and the smaller spectral bandwidth is 3.5 nm, providing convenient conditions for the detection of weak spectral signal. In addition, the near-infrared detector selected by the spectrometer needs no refrigeration, which will cut the production costs of the Hadamard transform spectrometer, with a stronger market competitiveness.

Key words: Near-infrared spectrometer; Hadamard transform; Cylindrical lens; Spectral bandwidth

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 61137001) 资助

第一作者: 党博石 (1985-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要研究方向为非成像及光谱仪的设计. Email: dangboshi@163.com

导师 (通讯作者): 刘华 (1976-), 女, 副研究员, 博士后, 主要研究方向为非成像光学、光学设计等. Email: liuhua_rain@yahoo.com.cn

收稿日期: 2013-01-06; 录用日期: 2013-02-07

0 引言

光谱仪器是一种对物质精细结构进行光谱特征分析的重要装置,按其应用的光谱范围可分为真空紫外光谱仪,近紫外和可见、近红外光谱仪,红外和远红外光谱仪. 其中的近红外光谱仪主要用于化学计量学中的物质成分等测量,包括医学、药理学、环境学以及生产流程的质检等^[1-4].

光谱仪根据工作原理可分成两大类:经典光谱仪和调制式光谱仪^[5-8]. 在经典光谱仪中,入射狭缝的宽度越窄,进入光谱仪中的光通量就越小. 为了解决这一问题,提出了阿达玛变换光谱仪(Hadamard Transform Spectrometer, HTS)的基本概念. 阿达玛变换光谱仪^[9-11]是继傅里叶变换光谱仪之后的又一种调制式光谱仪. 基于 HTS 可以实现高光通量、高分辨能力等目标,其在科学研究领域引起了极大的关注.

数字微镜阵列(Digital Micro-mirror Device, DMD)是一种由若干微反射镜组成的光电器件,将其作为阿达玛变换光谱仪中的 HT 模板,可解决传统的 HT 模板制作工艺复杂等问题,实现多通道同时测量技术,降低了传统 HT 模板移动所带来的误差,增加了系统的稳定性. 当待测光信号进入阿达玛变换光谱仪时,由于入射狭缝的遮挡,使得系统中的光通量很小. 为了克服这一缺点,本文提出了以柱面镜来整形光束的方法. 在成像焦面上仍然可以形成线光斑,并利用光纤取代入射狭缝. 利用理论计算得出含有数字微镜阵列的光谱仪的光谱分辨能力和像元分辨能力,确定了该类光谱仪的极限分辨率. 最后,根据几何光学成像理论,提出一种优化方案:增大成像透镜的焦距,可以提高光谱分辨率,并且更有益于机械装调. 这种新型阿达玛变换光谱仪具有高光通量、高信噪比、以及甚高的光谱分辨能力等特点,为微弱光谱信号的检测提供了便利条件. 除此之外,该光谱仪利用光栅的二次衍射技术,减小了聚焦光斑的尺寸,选择的近红外探测器无需制冷,降低了光谱仪的制作成本,使之具有更强的市场竞争力.

1 理论依据

1.1 结构方案

图 1 为本文面镜阿达玛变换光谱仪光学系统,光源经光纤耦合后,利用胶合透镜 1 将发散光束变成复色平行光,入射到光栅 1 的表面,由于衍射作用,光栅将复色光色散为光谱带. 光谱带经过柱面镜 1 按光谱顺序汇聚在 DMD 表面. DMD 对光谱

进行单波长选通,反射光通过柱面镜 2 在光栅 2 上发生二次衍射. 光束最终经过胶合透镜 2 聚焦到单点光电探测器上.

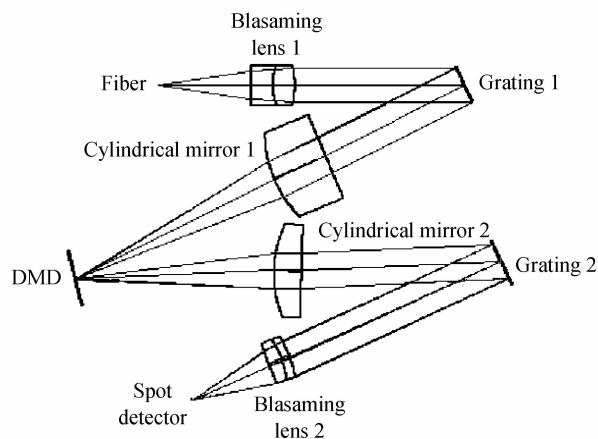


图 1 柱面镜阿达玛变换光谱仪的光学系统

Fig. 1 The optical system of HTS with cylindrical mirror

图 1 的光学系统中光源经聚光器件耦合光纤取代入射狭缝. 为了比较两种方法进入系统中的光通量,假设光源光斑直径为 3 mm,狭缝宽度和光纤芯径都为 $50 \mu\text{m}$. 光源经过聚光器件将光斑聚焦到小于 $50 \mu\text{m}$,所以光通量全部进入光纤中,第一种方法的光损失全部由光纤传输损耗决定,因此进入系统的光通量约是光源总量的 97%;而第二种方法的光损失是由狭缝对光源光斑的遮挡造成的,所以进入系统的光通量只有光源总量的 $50 \mu\text{m}/3 \text{ mm} = 1.7\%$. 明显地,第一种方法要优于第二种方法.

同时,该光谱仪中以 DMD 的阿达玛变换算法进行调制,实现波长选通等功能. 其中的阿达玛变换算法为:采用多通道检测技术,先利用 n 个阿达玛变换模板对 n 个待测光谱信号调制并记录 n 个调制信号,之后再根据阿达玛逆变换将 n 个调制信号还原成 n 个待测信号,以计算机输出结果.

1.2 系统设计

1.2.1 设计指标

参考国内外已商品化的阿达玛变换近红外光谱仪器的性能指标,并综合自身设计和研发能力,提出了如下指标,波长范围:1 000~1 600 nm;光谱带宽:优于 7 nm;整体尺寸尽量小.

1.2.2 元件参量的选择

1) DMD

实验所用 DMD 由美国德州公司研制开发,由 $1 024 \times 768$ 个微镜阵列组成,微镜尺寸为 $13.68 \times 13.68 \mu\text{m}^2$,两个微镜之间的距离小于 $1 \mu\text{m}$,DMD 芯片的整体尺寸为 $14 \times 10 \text{ mm}^2$. 根据光谱带宽的定义,DMD 上成像光斑的覆盖面要大于或等于 2 个微镜. 同时,设计波长光谱范围内的所有光线在

DMD的光谱展开要小于14 mm. 阿达玛变换的优势在于采用多通道检测技术. 根据误差理论, 多次测量可以降低噪声等的影响, 信噪比提高了 $(n+1)/2\sqrt{n}$ 倍^[11].

2) 胶合透镜

在该光学系统中, 加入胶合透镜的目的是在消色差的基础上, 实现聚焦光束和平行光束之间的转换. 所以选取的两个胶合透镜的焦距为 $f_1 = 20$ mm, $f_2 = 38$ mm.

3) 光栅

根据闪耀光栅方程 $2d\sin\theta_0 = \lambda_b$, 当光栅常量 $d = 1/300$ mm, 选择光栅的闪耀波长在设计波长范围内时, 对应的闪耀角为 $8.63^\circ \sim 13.89^\circ$.

4) 柱面镜

柱面镜主要用于光束的整形. 由柱面镜的特殊外形设计, 使入射光束只在一个方向上发生压缩、聚焦. 这样可使一个圆形光斑经过柱面镜在DMD面上汇聚成一线形光斑, 满足DMD波长选通功能对光斑形状的要求. 之后, 光束在DMD的反射光又通过一柱面镜, 实现了线形光斑在另一方向上的压缩, 使之重新整形成圆形光斑, 经过光栅2和胶合透镜2聚焦在单点探测器上.

5) 探测器

常见的近红外探测器类型有锗、铟镓砷、砷化铟、硫化铅、硒化铅、铋化铟、碲镉汞等. 根据设计波长为1 000~1 600 nm, 属于近红外光谱范畴, 所以选择InGaAs探测器, 而原因是其在设计波长范围内响应效率高且性能稳定.

1.2.3 主要性能参量

利用DMD与单点光电探测器相结合取代了传统光谱仪中的光电阵列探测器, 因此, 对设计光谱仪的主要性能的研究就集中在DMD表面处的光谱分辨能力和像元分辨能力这两个方面.

1) 光谱带宽

DMD表面的线光谱是由圆形光束经过柱面镜整形后获取的, 它的空间宽度 ΔL (线色散)所对应的光谱宽度为 $\Delta\lambda$ (即光谱带宽). 光谱带宽表示了光谱仪分辨光谱的能力, 光谱带宽越窄, 则意味着仪器的分辨能力高.

光谱带宽 $\Delta\lambda$ 与其空间宽度 ΔL 的关系^[12]为

$$\Delta L = \frac{dl}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (1)$$

式中: $\frac{dl}{d\lambda}$ 为光谱仪的线色散率, 且有 $\frac{dl}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\varphi} \cdot \frac{f_2}{\cos\sigma}$, m 为光谱级次, d 为光栅常量, φ 为与某一波

长对应的衍射角, σ 为焦面与垂直平面间的夹角, f_2 是成像物镜的焦距.

因此, 光谱带宽 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{m}{d\cos\varphi} \cdot \frac{f_2}{\cos\sigma} \cdot \Delta L \quad (2)$$

2) 像元分辨力

DMD是一种离散系统, 它对光谱信号的获取是通过光谱信号的抽样来得到的. 由于实际DMD对光谱信号的抽样点是有限大小的微镜像元, 每个抽样点的值是微镜像元内光能量的积分, 因此实际的抽样过程是积分抽样过程. DMD对光谱的分辨能力取决于一个微镜像元所占的光谱宽度, 定义 $\Delta\lambda'$ 为像元分辨力, 即

$$\Delta\lambda' = \frac{\Delta\lambda}{n} = \frac{dp\cos\varphi\cos\sigma}{mf_2} \quad (3)$$

式中 n 为一个光谱带宽所占的微镜像元个数, p 为像元中心距.

3) 系统分辨能力

如图1所示的光学系统, 根据1.2.2节中确定的元件参量, 成像透镜的焦距为 $f_2 = 38.00$ mm, 第一个光栅的光栅常量为 $d = 1/300$ mm, DMD的微镜像元间距为 $p = 14.68$ μm , 可以得到第一个光栅的 $m = 1$ 级衍射角为 $\varphi = 1.87^\circ \sim 7.04^\circ$, DMD与垂直平面的夹角为 $\sigma = 14.44^\circ$, 代入式(2)和(3)中, 根据光谱的空间宽度要大于或等于2个微镜像元, 即 $\Delta L \geq 2p$, 所以有光谱带宽 $\Delta\lambda \geq 2.475 \sim 2.493$ nm. 同时像元分辨力 $\Delta\lambda' \geq 1.238 \sim 1.246$ nm. 基本满足光谱带宽是像元分辨力的2倍这一要求.

2 系统模拟及结果分析

2.1 参量模拟

取光纤芯径为50 μm , 数值孔径为0.15, 设计波长为1 000~1 600 nm, 将各参量输入Zemax中进行模拟.

在优化该系统时, 为了使系统在整个光谱范围内都有好的性能, 所以采用以波长为多重结构参量来优化该系统, 波长分别取1 000、1 100、1 200、1 300、1 400、1 500和1 600 nm, 其中以柱面镜半径, 元件之间的距离以及元件的倾斜角为变量, 以RMS为优化函数, 使焦距、倾斜等变量适当地改变来优化系统, 系统性能达到最优, 如图1. 因为在较宽的入射波段里, 各个波长的点列图都较集中且能分辨开才能真正说明整个系统设计结果满足要求. 所以, 近红外光谱仪的光学系统应该根据取一系列点列图去评价系统的性能.

2.2 结果分析

从 Zemax 软件模拟结果可知,系统的光谱范围为 1 000~1 600 nm,系统 F 数约为 2.37,系统尺寸约为 $80 \times 60 \text{ mm}^2$,符合系统微型化的要求.

分析 DMD 表面上的光谱分布情况. 当入射复色光波长为 1 000~1 600 nm 时,所有波长在 DMD 表面上的光谱展开为 7.83 mm,小于选用的 DMD 的尺寸($14 \times 10 \text{ mm}^2$),满足设计要求. 同时由于 DMD 微镜都有 $\pm 12^\circ$ 的偏转角,所以在光路设计时,DMD 入射角要在 12° 左右,且误差越小,衍射效率越高,装调越容易. 研究本系统的在 DMD 处的光路设计,不同入射波长对应的 DMD 面上入射角如表 1,基本满足 DMD 的设计要求.

表 1 光谱仪中不同光波在 DMD 上的入射角

Table 1 The angle of incidence on the DMD's surface of the spectrometer

Wavelength/nm	The angle of incidence on the DMD's surface/($^\circ$)
1 000	12.697
1 100	12.427
1 200	12.257
1 300	12.046
1 400	11.832
1 500	11.607
1 600	11.362

分析可知,光谱仪的主要性能参量是系统的光谱带宽,由 DMD 表面上的光谱分布情况给出.

当波长是 1 600 nm 时,DMD 上的光谱宽度最大,为 $133.839 \mu\text{m}$. DMD 微镜尺寸为 $13.68 \times 13.68 \mu\text{m}^2$,则这一波长的光谱至少覆盖了 10 个微镜阵列,由于选用的 DMD 微镜阵列是 1024×768 个,则可以将设计的光谱波段分成 $n = 1024/10 = 102$ 个波段. 根据信噪比定义,信噪比提高了 $(n+1)/2\sqrt{n} = (102+1)/2\sqrt{102} \approx 5.1$ 倍.

图 2 描述了波长分别为 1 600、1 606 和 1 612 nm 时 DMD 的光谱分布情况,由瑞利判据可知,该光学系统的最小光谱带宽是 6 nm.

图 2 DMD 表面上的光谱分布

Fig. 2 The spectral distribution on the DMD's surface

文中的光谱仪结构使用两个光栅对光束进行二次衍射,可以将最终聚焦到探测器上的光斑达到最小. 如图 3,点斑半径最大为 $88.281 \mu\text{m}$,只需单点探测器有效面积大于 $200 \mu\text{m}$ 即可. 由于单点探测器有效面积与器件本身的暗电流成正比,与器件的稳定性成反比,所以选择小面积单点探测器可以提高系统的信噪比和稳定性. 选择的近红外探测器无需制冷,降低了光谱仪的制作成本.

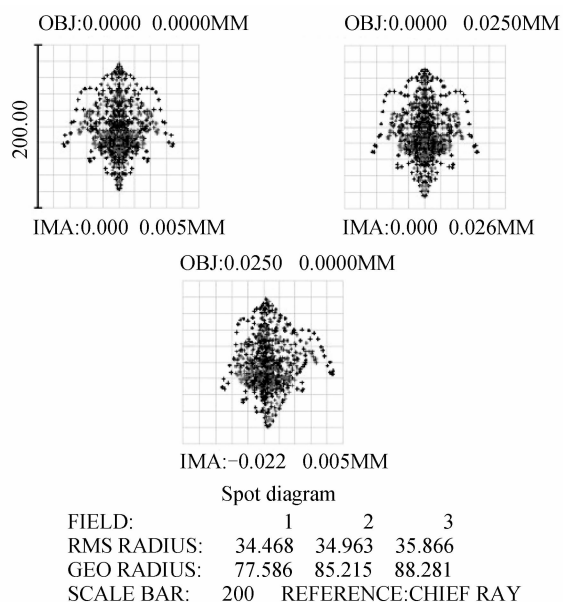


图 3 探测器上的点斑分布

Fig. 3 Spot distribution on the detector

2.3 优化

因为增大成像柱面镜的焦距,可以使 DMD 面上的聚焦光谱分得更开,光谱带宽会更小,为此,设计的光学系统重新进行优化,结果如图 4.

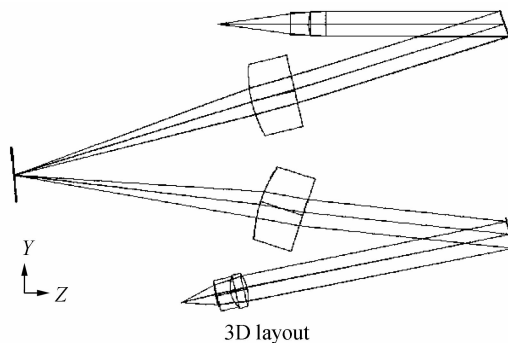


图 4 优化后的光谱仪光学系统

Fig. 4 The optical system of the optimized spectrometer

系统的光谱范围同为 1 000~1 600 nm,系统 F 数约为 1.84,系统尺寸约为 $115 \times 70 \text{ mm}^2$,比优化前系统的尺寸大. 同时在 DMD 面上的整个光谱展开为 12.1 mm,是优化前的 1.5 倍. 但是,分析不同波长的衍射光在 DMD 面的入射角,如表 2,发现优

表 2 优化后的光谱仪中不同光波在 DMD 上的入射角

Table 2 The angle of incidence on the DMD's surface of the optimized spectrometer

Wavelength/nm	The angle of incidence on the DMD's surface/($^\circ$)
1 000	12.007
1 100	11.995
1 200	11.998
1 300	12.008
1 400	12.015
1 500	12.009
1 600	11.978

化后的系统在 DMD 的装调方面有着绝对的优势。

图 5 描述了波长分别为 1 600、1 603.5 和 1 607 nm 时优化后系统中 DMD 的光谱分布情况。由瑞利判据可知,该光学系统的最小光谱带宽是 3.5 nm,是优化前系统的 1.71 倍,更接近设计的理论光谱带宽。

图 5 优化系统 DMD 表面上的光谱分布

Fig. 5 The spectral distribution on the DMD's surface of the optimized system

根据系统设计可知,当波长是 1 600 nm 时, DMD 上的光谱宽度最大,为 126.946 μm 。DMD 微镜尺寸为 13.68 \times 13.68 μm^2 ,则这一波长的光谱至少覆盖了 9 个微镜阵列,由于选用的 DMD 微镜阵列是 1 024 \times 768 个,则可以将设计的光谱波段分成 $n=1024/9=113$ 个波段。根据信噪比定义,信噪比提高了 $(n+1)/2\sqrt{n}=(113+1)/2\sqrt{113}\approx 5.4$ 倍,是优化前系统的 1.06 倍。

如图 6,点斑半径最大为 79.926 μm ,较优化前减小了 12.5%。由论证可以看出,增大成像柱面镜的焦距,可以减小光谱带宽,光谱仪具有聚焦光斑小、信噪比高、DMD 的装调容易等优点。但是,在 DMD 面上的光谱展开宽度和系统整体尺寸会增大。所以,在选择系统设计的时候,需做到光谱带宽、DMD 芯片和系统尺寸等因素的平衡。

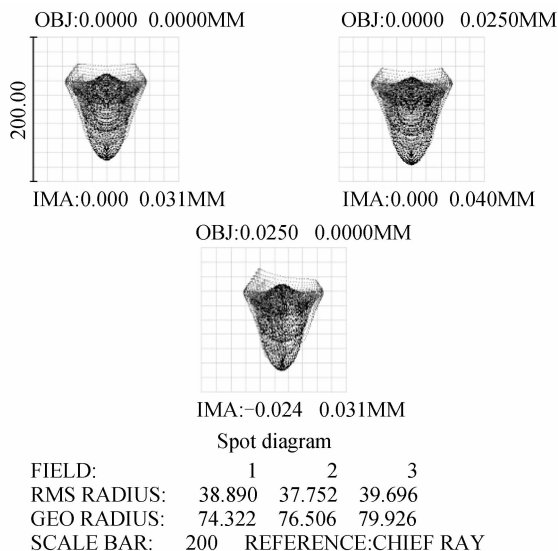


图 6 优化系统的探测器上的点斑分布

Fig. 6 Spot distribution on the detector of the optimized system

3 结论

为了解决目前光谱仪光通量小的问题,提出了一种新型阿达玛变换光谱仪。首先,给出了以柱面

镜来整形光束的方法。在成像焦面上仍然可以形成线光斑,并利用光纤取代入射狭缝。进而,利用理论计算得出含有数字微镜阵列的光谱仪的光谱分辨率和像元分辨能力,确定了该类光谱仪的极限分辨率。这种基于 DMD 应用的新型阿达玛变换光谱仪具有高光通量、高信噪比、甚高光谱分辨率等特点,为微弱光谱信号的检测提供了便利条件。利用光栅的二次衍射技术,减小了聚焦光斑的尺寸,选择的近红外探测器无需制冷,降低了光谱仪的制作成本,具有更强的市场竞争力。接着,充分考虑到光谱带宽、DMD 芯片与系统尺寸等因素间的关系,根据几何光学成像理论,提出一种优化方案:增大成像透镜的焦距,可以提高光谱分辨率,并且更有益于机械装调。可以获得更高分辨能力的微型阿达玛变换光谱仪,这对今后近红外光谱仪的发展有着重要意义。

参考文献

- [1] CHU Xiao-li, WANG Yan-bin, LU Wan-zhen. Present situation and prospect of near infrared spectrometer in china and abroad[J]. *Analysis Instruments*, 2007(4): 1-4. 褚小立,王艳斌,陆婉珍. 近红外光谱仪国内外现状与展望[J]. *分析仪器*, 2007(4): 1-4.
- [2] ZHANG Jun, CHEN Xing-dan, PIAO Ren-guan, et al. Near infrared spectrometer with double detectors for food component analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 986-991. 张军,陈星旦,朴仁官,等. 用于食品成分分析的双探测器近红外光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 986-991.
- [3] SU Lei-long,JIANG Shu-bo,CHENG Ming-xiao,et al. Design on NIR spectrometer based on MEMS technology for gas detecting[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(10): 120-122. 苏雷龙,蒋书波,程明霄,等. 气体检测中基于 MEMS 技术的近红外光谱仪设计[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(10): 120-122.
- [4] WANG Zhi-hong, LIN Jun, WU Zi-yu, et al. Development of spectrometric system of the portable mineral NIR spectrometer[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2005, 24(1): 59-61. 王智宏,林君,武子玉,等. 便携式近红外光谱矿物分析仪分光系统研制[J]. *岩矿测试*, 2005, 24(1): 59-61.
- [5] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu, et al. Developments of the micro modulating spectrometers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(1): 1-5. 孔延梅,梁静秋,梁中翥,等. 调制光谱仪的微型化研究进展[J]. *半导体光电*, 2008, 29(1): 1-5.
- [6] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, WANG Bo, et al. The investigation and simulation of a novel spatially modulated spectral-fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 1142-1146. 孔延梅,梁静秋,王波,等. 新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪的设计与仿真[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 1142-1146.
- [7] JIN Yu-xi, HUANG Mei-zhen, SHI Man-man. Fourier transform spectrometer status and its progress in miniaturization[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2010(3): 131-137. 金玉希,黄梅珍,施曼曼. 傅立叶变换光谱仪现状及其微型化进展[J]. *现代科学仪器*, 2010(3):131-137.

- [8] XUE Qing-sheng, CHEN Wei. Design of modified Czerny-turner spectral imaging system with wide spectral region[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(2): 233-240.
薛庆生, 陈伟. 改进的宽波段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(2): 233-240.
- [9] ZHANG Zhi-hai, MUO Xiang-xia, GUO Yuan-jun, *et al.* Micro Hadamard transform near-infrared spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(7): 1975-1979.
张智海, 莫祥霞, 郭媛君, 等. 微型 MOEMS 阿达玛变换近红外光谱仪[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(7): 1975-1979.
- [10] MO Xiang-xia, WEN Zhi-yu, ZHANG Zhi-hai, *et al.* Design and experiment of digital micro-mirror spectrometer optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1356-1360.
- [11] LIU Jia, CHEN Fen-fei, LIAO Cheng-sheng, *et al.* A digital micromirror device-based Hadamard transform near infrared spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(10): 2874-2878.
刘佳, 陈奋飞, 廖乘胜, 等. 基于数字微镜技术的阿达玛变换近红外光谱仪[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(10): 2874-2878.
- [12] CHEN Wei-min, HU Song, WEN Zhi-yu, *et al.* The theoretical study on the spectral width and resolution of the mini-spectrometer [J]. *Piezoelectrics & Acousto Optics*, 2000, **22**(3): 149-151.
陈伟民, 胡松, 温志渝, 等. 微小型光谱仪光谱带宽及象元分辨力的讨论[J]. *压电与声光*, 2000, **22**(3): 149-151.