

doi:10.3788/gzxb20134209.1102

阿达玛变换光谱仪中微镜衍射现象的研究

李凯, 石磊, 高志帆, 郑信文, 曾立波, 吴琼水

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079)

摘要:提出了一种光机电一体化元件中数字微镜衍射的分析模型,并用 LightTools 对该模型进行模拟仿真得到了数字微镜理论上的衍射角.随后用两种不同波长的激光照射到数字微镜表面并用坐标纸测量出了数字微镜实际的衍射角,仿真结果与实验结果十分吻合.利用该衍射模型设计出了一种数字微镜控制的阿达玛变换光谱仪,采用激光光源和卤素灯光源对仪器的性能进行了测试.结果显示:光谱仪的分辨率可以达到 8 nm,信噪比为 1 366,采集 20 次光谱的中心波长偏移仅为 0.408 nm,且仪器单次采集光谱时间为 0.8 s.测量结果表明该光谱仪具有较高的分辨率和信噪比,以及很好的重复性、稳定性和实时性.

关键词:阿达玛变换;数字微镜;衍射模型;光谱仪

中图分类号:TH744.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)09-1102-5

Micro Mirror Diffraction Phenomenon Research on Hadamard Transform Spectrometer

LI Kai, SHI Lei, GAO Zhi-fan, ZHEN Xin-wen, ZENG Li-bo, WU Qiong-shui

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: An analysis model for Digital Micromirror Device (DMD) of optomechanics integration element is proposed, and the theoretic angle of diffraction is obtained by using LightTools to simulate optimization of the analysis models. and then comparing the theory angle with the result of the experiment. The results of the experiment and the simulation conclusion are consistent with each other very well. We have designed a Hadamard transform spectrometer which based on this diffraction model. And then we test the spectrometer by Halogen lamp source; the resolution ratio of the spectrometer can achieve 8 nm, signal-to-noise ratio can achieve 1 366, the center wavelength drift is only 0.408 nm, and the single acquisition time is only 0.8 second, these results show that the spectrometer has good resolution ratio, good signal-to-noise ratio, good stability, good repeatability and good real-time ability. The spectrometer is very good to overcome the traditional Adama spectrometer poor shock resistance, acquisition speed, low precision, has the very high market potential.

Key words: Hadamard transform; Digital Micromirror Device (DMD); Diffraction model; Spectrometer

0 引言

近红外光谱仪,在石油、食品安全、国防等领域有着极为广泛的应用^[1-3].根据其工作原理,可分为经典光谱仪和调制式光谱仪两大类.

典型的经典光谱仪有棱镜光谱仪、光栅光谱仪和声光可调谐滤光器等.棱镜分光光谱仪结构简单、成本低,不足之处是其获得的光谱为“非匀排光谱”;光栅光谱仪具有分辨率高的特点,缺点是存在机械转动部件、抗振性差,且扫描速度慢.声光调谐滤光

基金项目:国家科技支撑计划课题(No. 2011BAF02B02)和中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2012212020209)资助

第一作者:李凯(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为 DMD 与阿达玛变换光谱仪. Email:kaili1987fish@126.com

导师(通讯作者):吴琼水(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为光谱与成像分析仪器开发. Email:qswu@whu.edu.cn

收稿日期:2013-02-05;录用日期:2013-04-10

器光谱扫描速度极快,且准确度高^[4-5],但成本昂贵,单个滤光器工作波段范围较窄。

调制式光谱仪是高性能光谱仪器,傅里叶变换红外光谱仪^[6]是最典型的调制式光谱仪.采用傅里叶变换光调制方法,能够获得极高的信噪比和光谱分辨率,但缺点是成本较高、抗振和防潮能力差,无法适应一些工业现场等恶劣环境应用.阿达玛变换(Hadamard Transform, HT)光谱仪是近年来兴起的另一种高性能调制式光谱仪,其采用阿达玛变换光调制方法^[7-8],具有信噪比高、体积小、解码速度快等优点.但传统的阿达玛变换编码模板采用机械式模板,通过机械移动方法来变换模板,测量速度慢、故障率高,模板的机械偏移将会导致谱图产生波长漂移。

本项目组从 20 世纪 80 年代即开始阿达玛变换仪器的研究,90 年代即研制出了世界上第一个高分辨 HTMI 型阿达玛变换显微荧光图像分析仪,1999 年参加了匹兹堡展览,受到了国际同行以及国家科委的充分肯定.在国家九五、十五科技攻关等项目的持续资助下,尝试将阿达玛变换和数字微镜(Digital Micromirror Device, DMD)技术相结合,利用 DMD 的光栅衍射模型,成功研制出了一种新型的阿达玛变换光谱仪.其采用高准确度的高速数字微镜代替了传统的机械式模板,成功克服了传统阿达玛光谱仪抗振能力差、测量时间长、准确度低等问题,实现了高速、高分辨率、高信噪比以及极强的环境适应性性能的完美结合.大量的测试以及现场应用结果表明,本系统性能优异,能够满足常规应用测试需求。

1 现象及原因

DMD 是现代阿达玛变换光谱仪中的核心部件,它是一种基于微电子机械(Micro Electromechanical System, MEMS)技术的光机电一体化微小器件组成的矩阵阵列.以美国 TI 公司生产的 0.55XGA Discovery 4000 型 $1\,024 \times 768$ 单元的数字微镜为例.单个微镜单元尺寸仅 $10.8 \times 10.8 \mu\text{m}^2$,其光学部分表面由一系列高反射表面镀铝的微小镜片按照面阵排列而成,每个单元均能在数字电信号的控制下以高于 $1\,000 \text{ Hz}$ 的频率以其对角线为轴进行 $\pm 12^\circ$ 的偏转^[9-11],如图 1.通过每个微小镜片的翻转,可以控制每个单元光信号的反射方向,从而控制该单元反射光是否进入后续探测器收集光路,达到光学调制的目的。

在最初的阿达玛变换光谱仪中使用的 DMD 只有 100 个单元,为了提高仪器的分辨率,必须不断地增加微镜单元数量,因此缩小微镜单元的体积是现

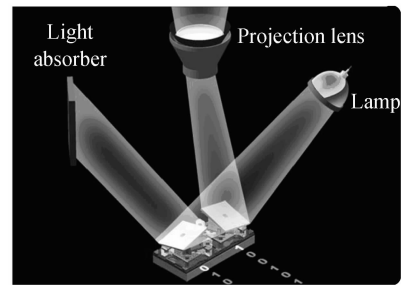


图 1 相元的状态“1”和状态“0”

Fig. 1 Pixels in “on” and “off” state

代阿达玛变换光谱仪必须面对的课题.本文使用的微镜阵列的尺寸非常的小(仅 $10.8 \times 10.8 \mu\text{m}^2$),当光信号入射到 DMD 表面时,会发生衍射现象,因此,必须研究其反射和衍射现象及其能量分布,才能利用该现象设计高效的光学系统。

一般来讲,DMD 应用在工作波段小于微镜阵列间隙尺寸(约 $1 \mu\text{m}$)的光学系统中时,衍射现象并不明显,但是当工作波段大于微镜阵列间隙尺寸时,不管是单色光还是连续光谱,衍射现象都不能忽视,微镜将类似于一个光栅.尤其是对于单色光,相干性较好,其衍射光强极大方向与微镜反射角有关,绝大部分衍射光能量也集中在闪耀角附近.在绝大部分光学系统中,采用大面积的聚焦镜,例如球面镜或者抛物镜等等,可以收集到绝大部分衍射光能量,但是在某些近红外光纤光学系统中,限于聚焦镜的体积不能太大,只能收集大约 50% 的衍射光能量.对此 TI 公司生产了一种偏转 $\pm 9.2^\circ$ 的微镜,使其在闪耀级次光能量可以达到 88%^[12-13].因此,对于微镜衍射现象必须深入研究,才能在光学应用中,尤其是红外波段,构建良好的光学系统。

2 理论分析

由于实验使用的 DMD 是沿着对角线产生 $\pm 12^\circ$ 的偏转,不能把它等效成一个简单的光栅模型,将微镜看作光栅时,应该将微镜的偏转轴方向也就是对角线方向等效为光栅方向,如图 2。

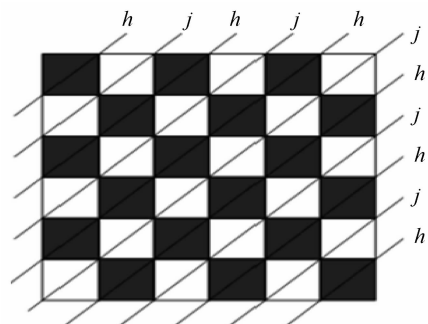


图 2 微镜的等效光栅模型

Fig. 2 Grating model of DMD

既然将微镜等效成光栅,那么就确定该

光栅的光栅方程.至少需要知道衍射级次 m 和光栅常量 d 其中的一个,才能确定整个光栅方程.但由于实验中微镜衍射能量极大值集中在某一级上,其他级次的光强度很弱,不能仅凭肉眼判断衍射级次 m ,此时应通过确定 d 值的方法完成光栅方程.由光栅方程可知

$$m\lambda = d(\sin i + \sin \theta) \quad (1)$$

自准直系统,入射角 $i = 0^{[14-15]}$,故式(1)简化为

$$m\lambda = d\sin \theta \quad (2)$$

从图2中可以看出,每两条相邻偏转轴之间的距离 h_j 为 $\sqrt{2}/2 \times 10.8 \mu\text{m}$,但是观察其完全对称的偏转轴之间距离 hh 或 jj 为 $\sqrt{2} \times 10.8 \mu\text{m}$.根据微镜表面镜片形状和排列方式,光栅常量 d 存在两种可能性:1) $d = \sqrt{2}/2 \times 10.8 \mu\text{m}$,即微镜对角线长度的一半.;2) $d = \sqrt{2} \times 10.8 \mu\text{m}$,即与微镜对角线等长.

将两种取值分别代入光栅方程(2)后发现:对于同一个波长,它们的衍射极大值角度相同, d 相差一倍,故衍射级次 m 也是相差一倍的关系.相应地,以任意相同角度入射的某一波长,经过微镜衍射之后,其衍射极大值方向也相同,只是理论级次不同.对于光学设计来讲, d 的取值不会影响整个光路.当使用光学软件进行模拟时,可根据波长来选择合适的 d 值进行仿真.通常仿真时设定的 d 值越大,要达到相同衍射角时的衍射级次就越高,可供观察的级次也越多,更适合光学设计的需要.本文的模拟中取 $d = \sqrt{2} \times 10.8 \mu\text{m}$.

3 模拟仿真

为利用DMD设计良好的阿达玛变换调制光学系统,必须对其进行光学分析和模拟,才能获得最佳光路方案.本文使用光路追迹软件LightTools对其进行光学模拟:在画出和微镜表面同样大小的平面之后,调整该面的 optical properties,选择为 grating,方式为 linear,然后将 grating period 设置成光栅常量 $d = \sqrt{2} \times 10.8 = 0.01527 \text{ mm}$,由于是对角线方向的衍射,所以衍射方向在 x 、 y 方向权值设置成相等的 0.5.

为了得到任意波长的光线以某一角度入射,经过微镜表面时衍射的极大值的方向,需要在LightTools里不停改变相关参量.为能快捷直观地获得这些数据,将微镜的模拟方法用C++软件编程封装,得到光能量分布如图3.

图3对波长为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的光线入射后的衍射情况进行了图像化的统计.图中横坐标表示角

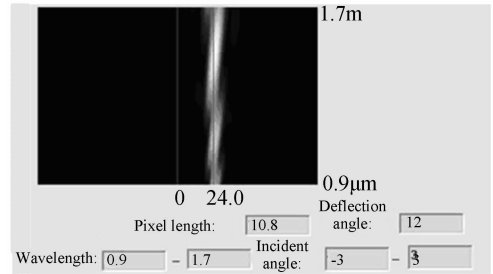


图3 微镜的衍射角仿真结果

Fig. 3 DMD's diffraction angle simulation result 度,单位为度($^{\circ}$);纵坐标表示光的波长,单位为微米(μm).由图3可知, $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长的光线经过微镜衍射后,极大值基本都在 24° 方向左右.结果表明:DMD衍射后的闪耀角基本上集中在 24° 附近, 24° 的闪耀角与微镜 $\pm 12^{\circ}$ 的偏转角有着重要的联系.衍射光栅的闪耀角与光栅刻痕的倾斜角有关,如图4.

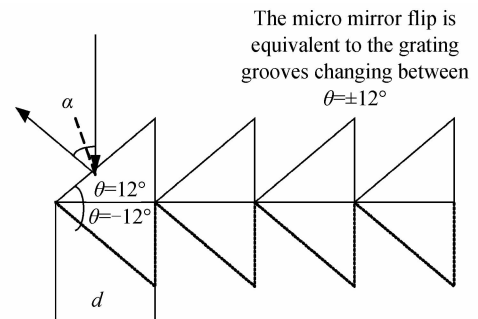


图4 微镜的翻转角 θ 与衍射角 α

Fig. 4 Blazing angle and DMD's deflection angle

图中 α 即为光栅闪耀角,由于微镜在 $\pm 12^{\circ}$ 之间翻转,那么可以将其等效成刻痕倾斜角为 $\pm 12^{\circ}$ 的2个光栅,闪耀角 $\alpha = 2 \times \theta = \pm 24^{\circ}$,本文只研究微镜翻转为 $+12^{\circ}$ 的状态(微镜翻转为 -12° 时,光强并未被后续的检测电路收集),所以光栅的衍射角为 $\alpha = 2 \times \theta = 24^{\circ}$,这与实验测试所得的结果吻合.

4 实验验证

为理论结合实际建立DMD的衍射模型,本文设计了一套光路来测量其闪耀角的位置.

由于DMD是以其对角线为轴翻转,故其衍射方向是在空间范围内.使用可见光波段的 532 nm 和 632 nm 的激光分别自准直入射到微镜表面,在垂直于入射方向,距离微镜表面一段距离设置坐标纸标记衍射极大值方向,以测量闪耀方向,如图5.

要测得衍射角数值,则只需测量图中 a 、 b 、 c 的长度,即可通过计算得出衍射角的正弦值为

$$\sin \theta = \left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 + c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

分别测量两种激光经微镜的衍射角如表1.

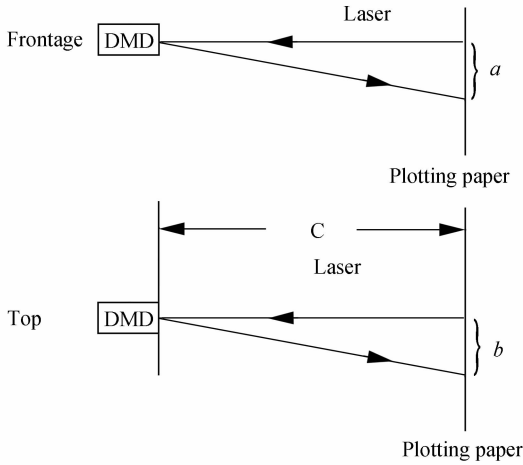


图 5 微镜衍射角的测量方法

Fig. 5 Micro mirror diffraction measurement

表 1 2 种波长激光的衍射角

Table 1 Diffraction angle of two type laser

Wavelength/nm	a/mm	b/mm	c/mm	Diffraction angle/(°)
532	12.6	12.7	40	24.1
632	12.1	12.4	40	23.4

由表 1 可以看到以 532 nm 和 632 nm 激光入射后,衍射极大值方向分别为:24.1°和 23.4°。这与利用微镜的光栅等效模型模拟得到的结果十分吻合。

5 应用

在对 DMD 的衍射现象进行模拟建模之后,本文设计出了一种阿达玛变换光谱仪,如图 6。

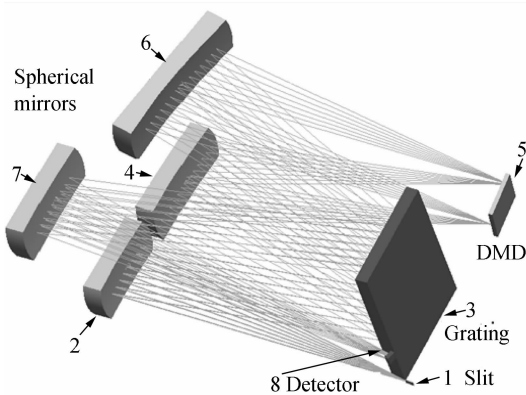


图 6 阿达玛变换光谱仪结构

Fig. 6 Hadamard transform spectrometer

待测光谱信号从狭缝 1 入射,首先经过 2 号准直镜变成平行光,之后在光栅 3 处发生衍射,衍射光通过球面镜 4 聚焦成像到 DMD 5 上,微镜上的每个微小像元分别与不同波长的光谱相对应,在本系统设计得电路控制下,按照阿达玛的编码方式,所有波长的光谱被 DMD 进行光学调制(多次称重原理)。调制后的光线被 6 号球面镜准直后再次经过光栅进行二次衍射,其目的是让第一次衍射后按波长发散的光重新混叠到一起,最后通过球面镜 7 进行聚焦

并在焦点处用检测器 8 采集结果。

分辨率测试:使用 Applied Harmonics Corporation 公司的 Dcrystal laser 1 064 nm 波长的激光作为标准波长,对本光谱仪的分辨率进行测试,所测得的结果如图 7。

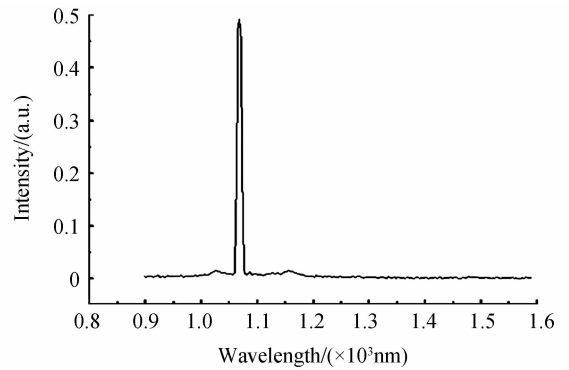


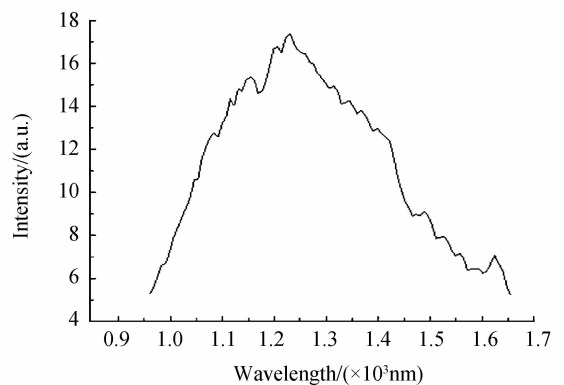
图 7 1 064 nm 激光光谱图

Fig. 7 Spectrogram of a 1 064 nm laser

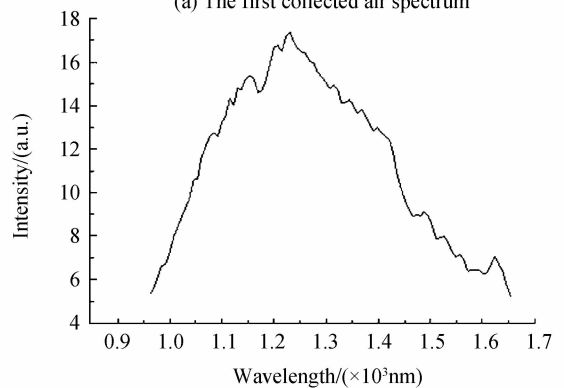
经计算光谱仪在 1 064 nm 处的分辨率(半高峰宽)为 8 nm,证明该模型能正确的应用到光谱仪中,并得到较高分辨率的测量结果。

卤素灯光源信噪比测试:对德国 Mikropack 公司生产的 DH-2000 型稳压卤素灯光源预热 15 min 后,连续采集两幅空气背景光谱如图 8(a)和(b),然后将相同波长对应的强度值相除,得到 100% 基线结果如图 8(c)。

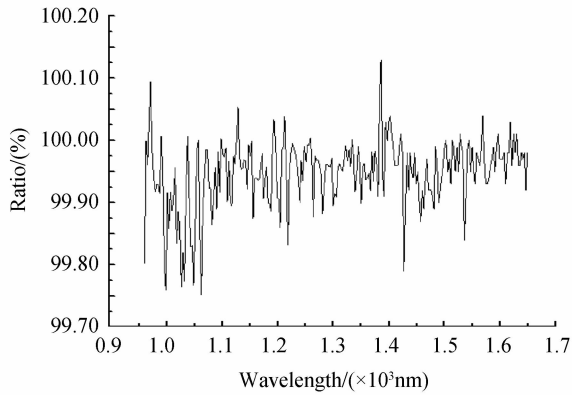
计算整个波长段的均方极值(Root-Mean



(a) The first collected air spectrum



(b) The second collected air spectrum



(c) The first spectrum divided by the second

图8 光谱仪器的性噪比

Fig. 8 SNR of the spectrometer

Square, RMS) 值为 7.318×10^{-4} , 其倒数作为信噪比值为 1366, 信噪比越高则定量分析的结果越精确, 可以通过光学系统的继续优化来实现信噪比的提高, 例如使用离轴抛物镜代替球面镜、采用衍射效率更高的光栅等方式增加光通量和信号强度。

卤素灯光源重复性测试: 对该卤素灯光源连续采集空气背景 20 次并将其高斯拟合求得光强最大的波长点位置, 然后计算其偏离中心值范围即偏移量表示重复性, 得到的结果如图 9。

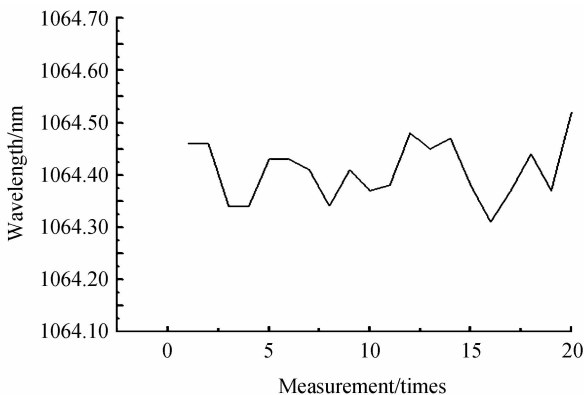


图9 20次空气背景采集的中心波长偏移量

Fig. 9 Center wavelength offset of 20 air spectrums

图 9 中数据通过拟合计算得出: 在多次测量中中心波长的偏移误差均值为 0.408 nm, 证明该光谱仪具有良好的重复性。

抗震性测试: 整个测量过程没有任何机械振动, 该仪器在抗振试验中从 1.2 m 高处落下 26 次后仍能正确地采样, 具有很高的抗震性。

实时性测试: 该光谱仪成功采谱一次的时间仅需 0.8 s, 大大提高了传统阿达玛变换光谱仪的转换速度。

6 结论

本文分析了 DMD 在光学应用中的衍射现象并对其进行了建模与模拟。随后用 2 种波长的激光对 DMD 进行了实际的衍射角测量, 测量结果与软件

模拟结果十分吻合。最后利用该衍射模型设计出了第一代的近红外阿达玛变换光谱仪, 并对仪器的性能进行了测试。结果表明, 仪器有较高的性噪比, 以及良好的重复性、稳定性和实时性(采集速度快)。

参考文献

- [1] ZHOU Jin-song, LÜ Qun-bo, XIANG-LI Bin. Spectra of Hadama transform spectral imager aliasing analysis and correction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1518-1521.
周锦松, 吕群波, 相里斌, 等. 阿达玛变换光谱成像仪光谱混叠分析及修正[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1518-1521.
- [2] XU Hao, TANG Hong-wu, LI Ying, *et al.* Study of Hadama transform microscopic spectral imaging system with high resolution [J]. *Journal of Analytical Science*, 2008, **24**(4): 385-388.
徐昊, 唐宏武, 李莹, 等. 高分辨阿达玛变换显微光谱成像系统研究[J]. *分析科学学报*, 2008, **24**(4): 385-388.
- [3] HANF M, KURTH S, BILLEP D, *et al.* Application of micro mirror arrays for Hadama transform optics [J]. *Microwave and Optical Technology*, 2003, **5445**: 128-131.
- [4] LEI Meng, FENG Xin-hu, ZHANG Xin-min, *et al.* Hadama transform infrared spectrometer [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2009, **4**(8): 44-46.
雷猛, 冯新沪, 张新民, 等. 阿达玛变换近红外光谱仪[J]. *现代科学仪器*, 2009, **4**(8): 44-46.
- [5] CHANG Ling-ying, ZHAO Bao-chang, QIU Yue-hong, *et al.* Design of AOTF imaging spectrometer optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(3): 345-349.
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光机系统设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(3): 345-349.
- [6] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, WANG Bo, *et al.* The investigation and simulation of a novel spatially modulated Micro-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] SMITH Z J, STROMBOM S, HOGIU S W. Multivariate optical computing using a digital micromirror device for fluorescence and Raman spectroscopy[J]. *Spectrometers and Spectroscopic Instrumentation*, 2011, **19**(18): 16950-16962.
- [8] TANG Hong-wu, ZHOU Jin-song, LI Tao, *et al.* Research progress and application of Hadama transform spectroscopy and imaging techniques[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2005, **33**(3): 417-422.
唐宏武, 周锦松, 李涛, 等. 阿达玛变换光谱和成像技术的应用和研究进展[J]. *分析化学评述与进展*, 2005, **33**(3): 417-422.
- [9] XESUS P B, CARLOS M O, HECTOR G N, *et al.* The offner imaging spectrometer in quadrature [J]. *Spectrometers and Spectroscopic Instrumentation*. 2010, **18**(12): 12765-12769.
- [10] FATELEY W G, HAMMAKER R M, DEVERSE R A. Modulations used to transmit information in spectrometry and imaging[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2000, **550**: 117-122.
- [11] HUDGENS J W, BERGERON D E. A Hadama transform electron ionization time-of-flight mass spectrometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**: 1-10.
- [12] DOUGLASS M R. DMD reliability: a MEMS success story [C]. *SPIE*. 2003, **4980**: 1-11.
- [13] DUDULEY D, DUNCAN W, SLAUGHTER J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [C]. *SPIE*, 2003, **4985**: 480761.
- [14] TANG Yu-guo, SONG Nan, BAYINHE Xi-ge, *et al.* Optical design of echelle spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(9): 89-95.
唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(9): 89-95.
- [15] BRENNAN D, ALDERMAN J, SATTTLER L, *et al.* Development of a micro-spectrometer system for process control application[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43**(2): 69-76.