

## MOEMS 微镜面阵光谱仪的优化设计与实验

莫祥霞, 温志渝, 张智海, 郭媛君

重庆大学新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

**摘要** MOEMS(micro optical electronic mechanical system)微镜面阵光谱仪主要利用微镜面阵分时选通实现单个探测器光谱测量, 具有无需斩波器实现脉冲信号输出, 无需机械模板实现哈达吗调制, 象元分辨率高, 体积小, 成本低等优点。针对 MOEMS 微镜面阵光谱仪设计中, 狭缝尺寸与光通量之间的矛盾, 本文系统深入的分析该光谱仪微型结构引入的新影响因素, 获取最优值, 实现光谱分辨率改进。首先, 提出了衍射限制, 空间采样率和谱面内弯曲对分辨率的影响, 模拟仿真, 获取最优参数。最后, 搭建实验, 进行测试。结果表明: 微型光谱仪中, 谱面内弯曲影响较小; 衍射受限导致光谱分辨率无法进一步改善; 空间采样率要求光谱光学分辨力至少是象元分辨力的两倍; 综合评价的狭缝最优值为  $1.818 \mu\text{m}$ , 象元分辨力为  $2.2786 \text{ nm}$ 。

**关键词** 分辨率; 微镜; 光谱仪; MOEMS

**中图分类号:** TH744.1; TH741 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)12-3412-05

### 引言

微型近红外光谱仪主要测量物质共振倍频光谱吸收, 以其体积小, 无损检测等特点广泛应用于各种光学检测、生物化学分析、天文研究等领域<sup>[1]</sup>。近红外光谱技术针对微弱光谱信号, 需要检测仪器有较高的灵敏度, 而微型光谱仪设计中主要是牺牲光谱仪性能精度以达到仪器耗能小, 体积小等设计指标, 因此光谱仪光通量和光谱仪分辨率是制约微型近红外光谱仪发展的瓶颈。近年来, 国内微型光谱仪有了较大的发展。2007年重庆大学杜晓晴等人提出脉冲折叠近红外光谱仪, 利用脉冲光源取代了斩波器的使用; 同年, 张波等提出微型光纤光谱仪, 采用2030个CCD象元进行探测达到较高象元分辨率; 2009年重庆大学向贤毅等提出微型近红外光谱仪, 结构中采用凹面光栅作为色散元件, 光路简洁, 减低了装调难度; 同年, 长春光学精密机械研究所郝鹏等人提出一种基于MEMS微硅多狭缝分光光度计, 结构中采用微硅狭缝进行象元分割, 减小仪器体积<sup>[2,3]</sup>。这一系列结构都是采用光栅作为色散元件, 分别利用光源口径, 入射光纤芯径, 狭缝, 象元面积等方法获得高分辨率。

MOEMS微镜面阵光谱仪<sup>[4,5]</sup>主要利用微镜面阵分时选通实现单个探测器光谱测量, 具有无需斩波器实现脉冲信号输出, 无需机械模板实现哈达吗调制, 象元分辨率高, 体

小, 成本低等优点。MOEMS微镜面阵避免了大型光谱仪中存在的问题, 而其微型结构又引入新的影响因素, 需要对其进行分析优化。

本文提出以狭缝像作为研究对象, 在传统几何成像对分辨率影响要素的基础上, 深入的、系统的分析了MOEMS微镜面阵光谱仪分辨率的影响要素。根据信息光学理论, 建立系统衍射受限模型, 讨论狭缝衍射影响; 从空间采样率的角度对光谱仪分辨率进行分析; 讨论平行栅条光栅对狭缝像面弯曲的影响。保持其他条件不变的情况下分别改变各个影响因素, 对MOEMS微镜面阵光谱仪样机进行测试。综合评价影响因素, 优化光谱仪分辨率。

### 1 微镜光谱仪基本结构

MOEMS微镜面阵光谱仪基本结构如图1所示: 宽波段

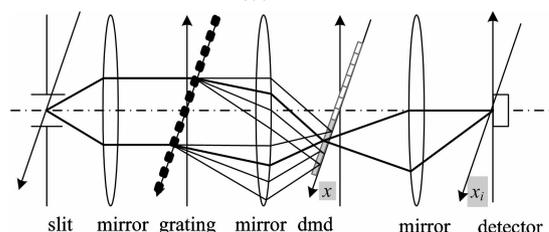


Fig. 1 Structure of micro mirror

收稿日期: 2010-12-25, 修订日期: 2011-03-12

基金项目: 三峡库区环境监测微系统国际科技合作项目(2007DFC00040), 国家中央高校基本科研业务专项资金项目(CDJXS 10 12 11 46), 重庆市院士基金项目(CSTC2008BC3002)和国家自然科学基金项目(60708017)资助

作者简介: 莫祥霞, 女, 1984年生, 重庆大学硕士研究生 e-mail: yiyang.xx@hotmail.com; yiyang\_3@163.com

光源出射光经过狭缝进入系统,由色散器件光栅分光,再由透镜将多个分离狭缝像成在微镜面阵上。微镜对光谱进行抽样,最后成像到单探测器上。单探测器分时测出各个波长对应的光强,数据采集处理后得到含样品信息的光谱图。系统

中采用的微镜是由  $1\ 024 \times 768$  个小镜子(镜子边长为  $10.8\ \mu\text{m}$ )组成的,在静电驱动下每个镜子会发生  $\pm 10^\circ$  的偏转,即对光的调制有开关两种状态。通过控制其开关态实现光的选通,也就是光谱抽样功能。

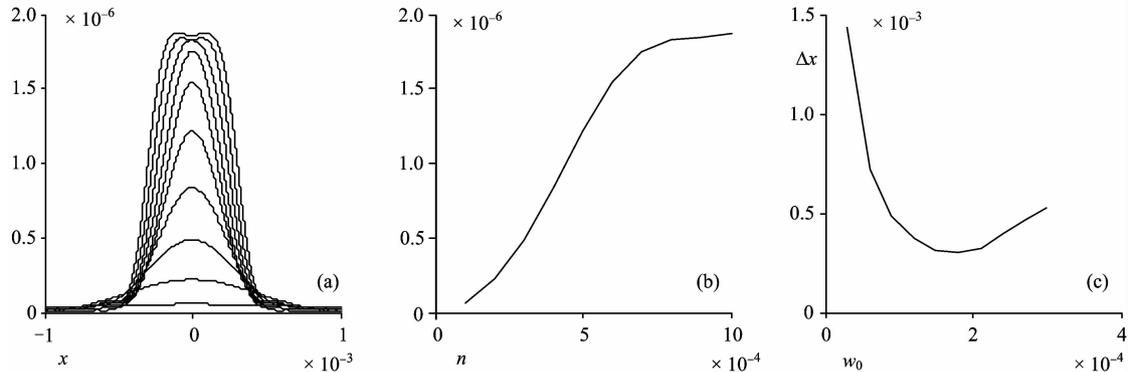


Fig. 2 Slit image of diffraction limited system which uses different slits with different widths (a) the distribution of energy (b) the variation trend of maximum energy (c) the variation trend of half power bandwidth

## 2 系统分辨率优化设计

### 2.1 几何成像对分辨率的影响

光谱仪仪器分辨率包括光学分辨率和象元分辨率。忽略像差,衍射受限等影响,仅考虑光栅色散率和狭缝成像倍率的条件下得到光学分辨力和象元分辨力如下<sup>[6]</sup>

$$\delta\lambda = \frac{a_1 d}{m f_1} \cdot \cos i \quad (1)$$

$$\delta\lambda' = \frac{d p \cos \varphi}{m f_2} \quad (2)$$

其中  $a_1$  为狭缝色散面宽度,  $d$  为光栅常数,  $i$  为入射角,  $\varphi$  为衍射角,  $f_1$  为准直镜焦距,  $f_2$  为第一成像镜焦距,  $m$  为级次。从公式中可以看出通过减小狭缝尺寸,光栅常数,增大前透镜焦距的大小,改善光学分辨率,通过减小光栅常数,减小象元中心距,增大后透镜焦距可以改善象元分辨率。

### 2.2 衍射限制对分辨率的影响

从几何成像关系可以知道减小狭缝色散方向上的宽度可以改善光学分辨率,但是狭缝小到一定程度时,减小狭缝并不能得到较高的分辨率了。因为光源通过狭缝后受到狭缝孔径的限制,使得整个系统变为衍射受限系统,狭缝像在限制下增宽,其点扩展函数为<sup>[7]</sup>

$$h_a(x) = \tilde{F} \left\{ \text{rect} \left( \frac{x}{a_1} \right) \right\} = a_1 \text{sinc} \left( \frac{a_1 x}{\lambda \sqrt{x^2 + f_1^2}} \right) \quad (3)$$

其中,  $\lambda$  为波长,  $f_1$  为成像到微镜上的透镜焦距。  $I_0(x)$  为狭缝入射光,仅考虑狭缝的衍射限制时,单色像能量分布为

$$I_1(x) = I_0(x) \cdot h_a(x) \quad (4)$$

利用 MATLAB 软件对式(4)进行仿真得到结果如下:入射光通过孔径后发生衍射调制,实际为一系列冲击函数加权叠加的过程。狭缝像在衍射的作用下增宽了。图 2(a)横坐标为微镜面上色散方向上的尺寸,纵坐标是微镜上的能量

值,图 2(a)中曲线由上至下为狭缝宽度递减(狭缝最大宽度为  $300\ \mu\text{m}$ ,每减小  $30\ \mu\text{m}$  得到一条仿真曲线,共 10 条仿真曲线,波长为  $1\ 350\ \text{nm}$ ,微镜前焦距为  $50\ \text{mm}$  时)对应的狭缝像的能量分布。从图中可知狭缝越小衍射效果越明显。

图 2(b)为图 2(a)中 10 根曲线对应的最大能量值,可以看到随着狭缝的减小,光能量逐渐减小,并且狭缝小于  $180\ \mu\text{m}$  之后,能量下降非常明显。

图 2(c)横坐标是狭缝宽度,纵坐标为狭缝像半功率带宽大小,可以看到即使是在衍射影响较小的情况下,狭缝还是有增宽效应。减小狭缝,分辨率的缓慢改善,当狭缝值为曲线的拐点处时,继续减小狭缝,分辨率开始明显下降。

### 2.3 空间采样率对分辨率的影响

狭缝在物面处,光通过狭缝后,经过光栅调制在微镜面成像。光谱分辨力为  $\delta\lambda$ ,则在微镜面上的光能量分布近似为间隔为  $\delta\lambda$  的单色狭缝光能量的叠加

$$I_{\text{DMD}}(\lambda) = \text{comb}(\lambda - N \cdot \delta\lambda) I_{\text{slit}}(\lambda) \quad (5)$$

其中,  $I_{\text{DMD}}(\lambda)$  为微镜处光能量分布,  $I_{\text{slit}}(\lambda)$  为狭缝单色光能量。

因此从信息处理的角度上说,由光栅调制引起的单色象空间频率为光学分辨力的倒数,如式(6)。利用微镜对光谱进行采样,采样的空间频率如式(7)。

$$f_M = \frac{1}{\delta\lambda} \quad (6)$$

$$f_s = \frac{1}{\delta\lambda'} \quad (7)$$

由奈科斯特采样定理可知

$$f_s \geq 2f_M \quad (8)$$

$$\delta\lambda \geq 2\delta\lambda' \quad (9)$$

从公式中可知要达到设计要求的光学分辨率,象元分辨力必须小于光学分辨力二分之一,要提高总体分辨率必须同时提高光学分辨力和象元分辨力,仅从几何成像的影响因素上去做改进无法较好的提高光谱仪器的分辨率,还要讨论光学分辨力和象元分辨力相互制约的因素。

## 2.4 光栅引起的谱面内弯曲的影响

点光源通过狭缝后由透镜作用变成平行光入射到平行栅条闪耀光栅, 狭缝垂直方向上入射的平行光束与主光轴成一角度, 导致狭缝非主截面光束将不通过光栅的主截面<sup>[8]</sup>。

由轴外点发出的光线服从于式(10)

$$d(\sin i' + \sin \varphi) = \frac{k\lambda}{\cos \varepsilon} \quad (10)$$

其中, 轴外点发出的光线与主截面的夹角为  $\varepsilon$ ,  $i'$  为入射角  $\varphi$  在主平面的投影,  $\varphi'$  为衍射角在主平面的投影, 轴外点发出的光线所具有的色散率与光栅常数为  $d \cos \varepsilon$  的光栅色散率相同, 狭缝高度越高, 衍射角越大, 光线弯曲越厉害, 因此由平行栅条闪耀光栅调制后得到的狭缝像的两端向长波长方向弯曲, 弯曲程度为一抛物线方程, 其曲率半径如下

$$R = f_2 \frac{d \cos \varphi}{k\lambda} \quad (11)$$

光栅常数为 300 线, 主波长为 1 200 nm, 微镜前成像透镜 50 mm, 狭缝尺寸为  $a_1 \times b_1 = 300 \mu\text{m} \times 2 \text{mm}$ , 由线性放大率得到狭缝像尺寸为  $a_2 \times b_2$ , 在  $b_2$  缝高下狭缝弯曲平移量  $\Delta x$  占狭缝像宽的百分比为

$$\nu = \frac{\Delta x}{a_2} = \frac{f_1 \cos \varphi \left( -\sqrt{R^2 - \left( \frac{b_1 f_2}{f_1} \right)^2} + R \right)}{f_2 \cos i_1} \quad (12)$$

在微镜的参数下狭缝弯曲偏移量占狭缝像宽 0.697%, 也就是说微镜光谱仪在考虑一级光谱的情况下, 由光栅引起的谱面弯曲基本可以忽略不计。

## 3 MOEMS 微镜面阵光谱仪样机测试

MOEMS 微镜面阵微镜光谱仪样机主要器件有 Texas 仪器公司的 D4100-DMD, Avalight-HAL 溴钨灯, 硫化铅单探

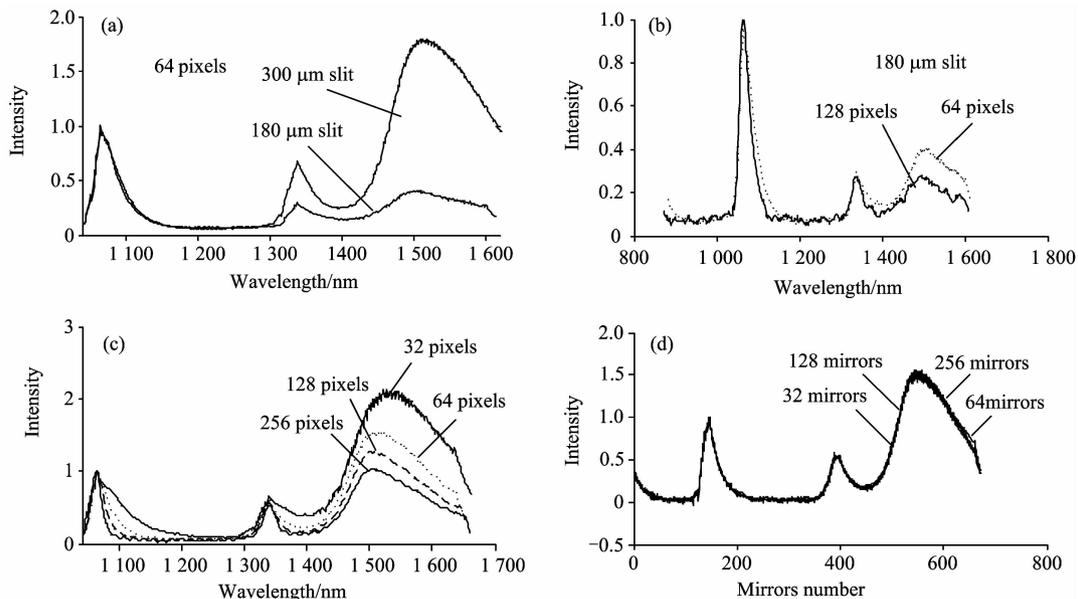


Fig. 3 Comparisons of spectra as the results of the filter tested by micro mirror system (a) the width of the slit plotted with solid line is 180  $\mu\text{m}$  and the width of the slit plotted with dotted line is 300  $\mu\text{m}$ ; (b) with the width of the 180  $\mu\text{m}$  slit, the pixel numbers plotted with solid line are 128 and the pixel numbers plotted with dotted line are 64; (c) pixel numbers are 256, 128, 64 and 32; (d) the micro mirror numbers in each column are 256, 128, 64 and 32

测器, 300 线闪耀光栅(闪耀波长为 1 250 nm)。测试对象为主波长为 1 063.8 nm, 半功率带宽为 10 nm 的近红外滤光片。因为设计的理论光学分辨率为 13 nm, 因此 1 064 nm 处单峰值可看作是一个单色狭缝像, 测试中通过对该单色像半功率带宽分析改善分辨率。

### 3.1 衍射限制对分辨率的影响

由几何成像因素可知, 在光栅和光栅前后透镜不变的情况下, 减小狭缝值可以提高系统的光学分辨率。但是理论分析可知狭缝较小的时候, 减小狭缝, 光学分辨率不能很好的提高。因此实验中采用 300 和 180  $\mu\text{m}$  的狭缝作为微镜光谱仪的入射狭缝, 在 64 个象元的条件下进行测试, 对测试光谱进行 9 次平均, 将 1 064 nm 波长归一后得到图 3(a), 从图中可以看到左侧单峰在不同的入瞳值下峰值轮廓几乎完全一致, 也就是狭缝降至 180  $\mu\text{m}$  时分辨率得不到提高, 并且光能量大大下降了。在 180  $\mu\text{m}$  狭缝缝宽下, 提高象元分辨率测得实验结果如图 3(b)所示。微镜共 1 024 个镜子, 光谱采样点, 即象元个数  $n_s$  改变, 也就是对应 10 nm 带宽下采用的微镜个数的改变, 则象元中心距  $p$  为

$$p = \frac{1\,024 \times 10.8 \mu\text{m}}{n_s} \quad (13)$$

128 个象元测得的单峰比 64 个象元测得的单峰半功率带宽略有减小, 分辨率提高不明显, 并且整体光能量却明显下降了, 导致全谱段光谱波形不稳定。测试结果为狭缝在 180  $\mu\text{m}$  的时候光学分辨率跟 300  $\mu\text{m}$  的基本一致, 光学分辨率得不到改善。单纯从衍射受限影响上分析, 180  $\mu\text{m}$  狭缝分辨率比 300  $\mu\text{m}$  略高, 但是实际系统中还有像差的影响, 所以实验中测得 180  $\mu\text{m}$  狭缝和 300  $\mu\text{m}$  狭缝分辨力没有较大的改变。考虑到能量和分辨力两方面的影响, 狭缝在 300  $\mu\text{m}$  的时候测得的值较好。

### 3.2 空间采样率对分辨率的影响

系统是通过利用微镜阵列抽样特性, 分时选通实现单个探测器测量的。相较于阵列探测器, 微镜阵列最显著的特点就是微米级象元。通过改变同时偏转的微镜个数可以自由选取不同的象元分辨率, 灵活度大, 精度高。

分别取 32 个象元, 64 个象元, 128 个象元以及 256 个象元对应 10 nm 带宽进行测试, 测试结果如图 3(c) 所示, 通过数据处理后, 从图中可以看到随着象元的增大, 1 064 nm 单峰的半功率带宽逐渐减小。从表 1 中分辨率参数比较可以看出, 随着象元个数的成倍增大, 象元分辨率成倍减小, 而单峰处半功率带宽也是成倍减小的, 可见减小象元分辨率改善了光谱仪器分辨率。根据抽样定律可知, 光学分辨率必须大于象元分辨率的两倍, 其仪器分辨率才不受象元分辨率的制约。但是, 由于能量也是成倍的减小的, 所以并不是象元分辨率越大越好的, 从实验中得到选用 256 个微镜时, 与理论光学分辨率误差为 9.8%, 在谱线重复性比较好的情况下, 选用 256 个微镜做光谱测量较好。

### 3.3 光栅引起的谱面内弯曲的影响

考虑到光栅会引起狭缝像弯曲现象, 造成分辨率下降, 通过改变纵向微镜个数, 限制狭缝像到探测器上的高度。分别取 256 个, 128 个, 64 个和 32 个纵向微镜进行测量, 经过数据处理后, 得到测量结果如图 3(d) 所示, 光谱曲线基本完全重合, 也就是说纵向狭缝完全对光谱分辨率几乎没有影响, 和理论分析一致。

**Table 1 Comparison of resolution parameters in different pixel numbers**

象元	理论光学 分辨率/nm	1 064 nm 处象 元分辨率/nm	单峰半功 率带宽/nm	相对能 量[-]
32	12. 751	18. 229	34	7. 81
64		9. 114 5	19	4. 513
128		4. 557 2	17	2. 391
256		2. 278 6	14	1. 229

## References

- [1] ZHANG Jun, CHEN Xing-dan, PIAO Ren-guan(张 军, 陈星旦, 朴仁官). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2008, 16(6): 986.
- [2] ZHANG Bo, WEN Zhi-yu(张 波, 温志渝). Semiconductor Optical Electronics(半导体光电), 2007, 28(1): 147.
- [3] Kraft M, Kenda A, Frank A. Anal. Bioanal. Chem., 2006, 386: 1259.
- [4] Day D R, Butler M A, Smith M C. Transducers' 05. The 13th International Conference on Volume 2, 2005. 1246.
- [5] CHEN Wei-min, HU Song, WEN Zhi-yu(陈伟民, 胡 松, 温志渝). Piezoelectrics & Acoustooptics(压电与声光), 2000, 22(3): 149.
- [6] LÜ Nai-guang(吕乃光). Fourier Optics(傅里叶光学). Beijing: China Machine Press(北京: 机械工业出版社), 2006. 92.
- [7] FENG Yu-tao, XIANG Yang(冯玉涛, 向 阳). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(1): 20.
- [8] WU Guo-an(吴国安). The Design of Spectrometer(光谱仪器设计). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1978. 104.

## 4 综合评价三因素

在之前的分析中可以知道光栅引起的谱面内弯曲在 MOEMS 微镜面阵微镜光谱仪中是可以不予考虑的, 针对衍射限制和空间采样率的这两方面影响, 结合理论分析和测试, 通过多项式拟合分别得到光学分辨率和狭缝尺寸  $f_{\text{rs}11}(x_1)$ , 光学分辨率和象元分辨率  $f_{\text{rs}13}(x_2)$ , 光通量和狭缝尺寸  $f_{\text{eng}2}(x_1)$  以及光通量和象元分辨率  $f_{\text{eng}4}(x_2)$  之间的关系, 建立约束非线性规划

$$\begin{aligned} & \min f_{\text{rs}11}(x_1) \\ & \min f_{\text{rs}13}(x_2) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} f_{\text{eng}2}(x_1) \geq 0.2, f_{\text{eng}4}(x_2) \geq 0.2 \\ \cos i \cdot d \cdot x_1 - 2f_1 \cdot x_2 \geq 0, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

得到 MOEMS 微镜面阵光谱仪样机理论最优值

$$x_1 = 1.818 \times 10^{-4} \text{ m}, x_2 = 2.2786 \times 10^{-9} \text{ m}$$

## 5 结 论

通过提出以狭缝像作为研究对象, 对 MOEMS 微镜面阵光谱仪微型结构引入的分辨率影响因素进行分析, 具体从衍射限制, 空间采样率, 以及光栅谱面弯曲三个方面分别对微镜光谱仪分辨率进行优化设计, 综合评价影响因素优化光谱仪器分辨率, 保持其他条件不变的情况下仅改变其中一种影响因素, 对 MOEMS 微镜面阵光谱仪样机进行试验测试。结果表明, 狭缝减小到一定程度时, 由于衍射受限导致继续减小狭缝尺寸无法进一步改善光谱分辨率; 空间采样率要求光谱光学分辨率至少是象元分辨率的两倍; 微型光谱仪中, 光栅引起的谱面内弯曲影响较小, 在设计中不需要考虑; 综合评价前两个因素, 在不考虑几何像差的影响下, 狭缝最优值为 1.818  $\mu\text{m}$ , 象元分辨率为 2.2786 nm。该最优值能够满足系统光通量的最低要求。

# The Optimizing Design and Experiment for a MOEMS Micro-Mirror Spectrometer

MO Xiang-xia, WEN Zhi-yu, ZHANG Zhi-hai, GUO Yuan-jun

National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, The Key Laboratory for Opto-Electronic Technology and System under Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044

**Abstract** A MOEMS micro-mirror spectrometer, which uses micro-mirror as a light switch so that spectrum can be detected by a single detector, has the advantages of transforming DC into AC, applying Hadamard transform optics without additional template, high pixel resolution and low cost. In this spectrometer, the vital problem is the conflict between the scales of slit and the light intensity. Hence, in order to improve the resolution of this spectrometer, the present paper gives the analysis of the new effects caused by micro structure, and optimal values of the key factors. Firstly, the effects of diffraction limitation, spatial sample rate and curved slit image on the resolution of the spectrum were proposed. Then, the results were simulated; the key values were tested on the micro mirror spectrometer. Finally, taking all these three effects into account, this micro system was optimized. With a scale of  $70\text{ mm}\times 130\text{ mm}$ , decreasing the height of the image at the plane of micro mirror can not diminish the influence of curved slit image in the spectrum; under the demand of spatial sample rate, the resolution must be twice over the pixel resolution; only if the width of the slit is  $1.818\text{ }\mu\text{m}$  and the pixel resolution is  $2.2786\text{ }\mu\text{m}$  can the spectrometer have the best performance.

**Keywords** Resolution; Micro mirror; Spectrometer; MOEMS

(Received Dec. 25, 2010; accepted Mar. 12, 2011)