

阿达玛光谱仪的入射狭缝选择方法研究

范玉^{1,2}, 吴一辉¹, 宣明¹, 张平¹, 周连群^{1,2}, 刘永顺^{1,2}

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了确定光谱仪的入射多狭缝结构设计的可靠依据, 研究了4种阿达玛S型狭缝阵列发生衍射后的光强分布。采用MEMS加工技术制作出最小狭缝单元为 $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ 的一体式微硅片阿达玛狭缝阵列, 对3种S7型狭缝和一种S15型狭缝进行比较。首先利用阿达玛矩阵构造狭缝阵列的孔径函数, 得到了衍射后的光强分布函数; 然后运用Matlab软件对光强分布函数仿真, 获得了各种狭缝衍射后的光强分布图及光通量对比。搭建了试验装置进行验证, 试验表明实际衍射光强分布及光通量间的比值都与仿真结果相符。最后分析了狭缝结构参数对光强分布的影响, 总结了S型狭缝阵列衍射规律。所提出的衍射光强分布方法, 为光谱仪中入射狭缝的选择与设计提供了理论依据, 为实际应用提供了有价值的参考。

关键词 阿达玛光谱仪; 微硅片狭缝阵列; 光通量; 阿达玛S型阵列

中图分类号: TH744.1; O233.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)09-2581-05

引言

目前微小型光谱仪入射狭缝形式大多数采用单狭缝, 在化学分析、医学分析等对光谱仪分辨率高要求的情况下, 通常采用减小入射狭缝尺寸手段来实现。这必然导致光通量严重下降, 对微弱信号的分析极其不利。大多数光栅光谱仪不得不在光通量与分辨率之间进行折衷^[1]。为了实现多狭缝阵列结构, 目前经常利用双层薄膜硅片叠加的方法, 比如采用压电驱动加放大机构的方式来实现驱动, 每次平移一个狭缝距离。这种方法对两层狭缝阵列的对准工艺要求非常苛刻, 并且驱动结构复杂、精度有限, 同时由于移动距离有限, 限制了狭缝的个数, 种种不利都限制了阿达玛光谱仪的发展^[2-5]。

MEMS技术的发展使光谱仪各项性能不断完善, 正广泛应用到各个领域^[6]。本文利用MEMS工艺制作出的全固态阿达玛狭缝阵列, 最小狭缝单元为 $6\mu\text{m}$, 完全能克服上述缺点, 因为全固态的阿达玛光谱仪仅仅用一次采集就可以实现阵列的变换。克服了大多数光栅光谱仪的缺陷。

但是, 多狭缝结构参数应如何进行选择, 目前却缺少可靠的依据, 需要一种方法来指导多狭缝参数设计。本文以光通量为考察对象, 对多狭缝结构参数设计进行分析。以衍射理论为基础, 对四种阿达玛S型微硅片狭缝阵列进行光通量

比较, 通过仿真与实验验证发现了多狭缝单元边距、单元尺寸及阵列阶数这三个参数对光通量的影响规律, 为阿达玛光谱仪的入射狭缝类型的选择与设计提供了依据。

1 阿达玛S型微硅片阵列狭缝

按照S型矩阵的排列^[7,8], 本文制作了3种S7型狭缝和一种S15型狭缝进行比较, 如表1所示。

Table 1 S slits that have been produced (unit: μm)

序号	单元边距	狭缝尺寸	阶数
狭缝1	4-6	6×6	7
狭缝2	4-8	6×6	7
狭缝3	4-6	16×16	7
狭缝4	4-6	6×6	15

微狭缝尺寸示意图如图1所示, 其中狭缝尺寸是指最小单元的长度乘以宽度, 单元边距是指相邻两列的邻近边的距离与相邻两行邻近边的距离(列边距一行边距)。图2为显微镜下的微硅片狭缝实物图片, 放大了100倍。

本文的微狭缝阵列以硅片为原料, 通过使用MEMS加工技术得到了微狭缝阵列, 加工工艺技术稳定。仪器性能得到了很大的改善, 成本却未增加多少, 提高了仪器的性价

收稿日期: 2009-11-23, 修订日期: 2010-02-22

基金项目: 国家(863计划)项目(2007AA042102), 国家(863B计划)项目(2006AA04Z367)和吉林省科技发展技术项目(20060335)资助

作者简介: 范玉, 女, 1979年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士 e-mail: fanyu126@126.com

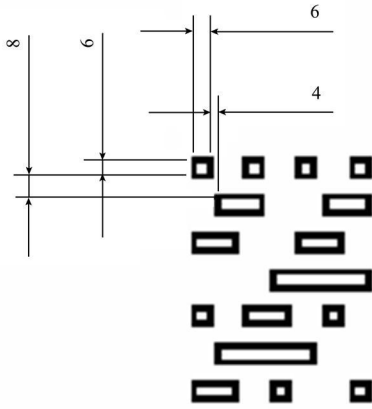


Fig 1 Schematic diagram of slit 2

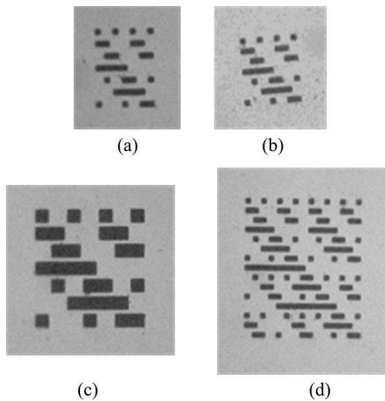


Fig 2 Micro silicon slits of S

- (a): Slit No 1 in the table 1; (b): Slit No 2 in the table 1;
 (c): Slit No 3 in the table 1; (d): Slit No 4 in the table 1

比^[9,10]。这种基于微硅片狭缝阵列结构的光谱仪系统的优点如下:

(1) 全固态化设计, 完全消除了任何移动部件带来的误差, 例如, 重复性差、一致性差、寿命短、测量时间长等缺陷^[11];

(2) 采用硅片狭缝模板的优点^[12]: 微硅片具有体积小、精度高、易于批量化制作、杂散光小、制备容易、同一个模板上的狭缝一致性好, 同时可以根据实际光学系统的需要对狭缝进行改变;

(3) 由于微硅片狭缝是中空的, 透过率达到 100%, 可以得到很好的通光效果, 并适于紫外到红外全波段。

2 衍射理论分析

本文采用的狭缝尺寸最小狭缝单元为 $6 \mu\text{m}$, 入射光经过狭缝后发生衍射, 在第一反射镜上形成的是衍射光斑, 而不再是入射狭缝的像, 因此必须考虑衍射光强的分布, 才能进一步精确量化具有 S 型入射狭缝的阿达玛光谱仪各项指标^[13]。

如图 3 所示, 根据标量衍射理论, 在任意点 P 处光场复振幅的夫琅和费衍射公式为

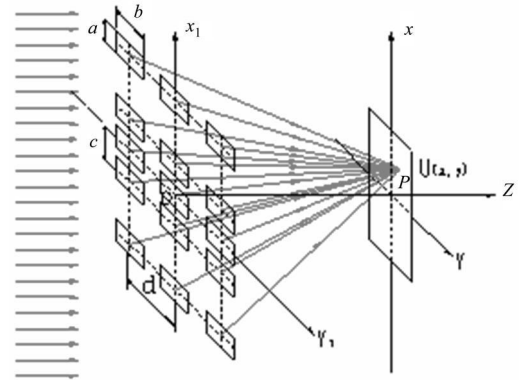


Fig 3 Schematic diagram of theory analysis

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik\frac{x^2+y^2}{2z}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{U}(x_1, y_1) e^{-2\pi i \left(\frac{x_1 x + y_1 y}{\lambda z} \right)} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

$U(x, y)$ 是在接收屏 (x, y) 处的复振幅, $\overline{U}(x_1, y_1)$ 是光源刚刚经过衍射屏后的复振幅, 其中

$$\overline{U}(x_1, y_1) = \overline{U}_0(x_1, y_1) \times t(x_1, y_1) \quad (2)$$

$t(x_1, y_1)$ 是衍射屏的复振幅透射系数, $\overline{U}_0(x_1, y_1)$ 是光源透过衍射屏射前的复振幅。假定以单位振幅的平面波来垂直照明时 $\overline{U}_0(x_1, y_1) = t(x_1, y_1)$, 二元函数 $t(x_1, y_1)$ 在接收屏上满足普遍的傅里叶积分存在的条件, 由(1)式可见, 除了与 (x_1, y_1) 无关的振幅和相位因子外, 夫琅和费衍射可以看作是函数 $t(x_1, y_1)$ 的傅里叶变换, 公式(1)可写成

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik\frac{x^2+y^2}{2z}} F\{t(x_1, y_1)\} \quad (3)$$

本文采用的循环 S 型狭缝结构, 按照狭缝的空间分布特点, 衍射屏的透射函数可写成下式^[14]

$$t(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \times \text{rect}\left(\frac{y_1}{b}\right) \otimes \sum \delta(x_1) \otimes \delta(y_1) \quad (4)$$

其中:

$$\sum \delta(x_1) \otimes \delta(y_1) = \sum_{n=1, m=1}^{N, M} \delta(x_1 - nx) \otimes \delta(y_1 - md)$$

a, b 分别是入射狭缝最小矩形单元沿 x_1 轴, y_1 轴方向的长度。 c 和 d 分别是相邻矩形单元沿 x_1 轴, y_1 轴方向的中心距。 nc, md 表明在 x_1 方向 nc 处, y_1 方向 md 处存在狭缝单元。式(4)经过傅里叶变化后得到

$$F\{t(x_1, y_1)\} = a \times \text{sinc}\left(a \frac{x}{\lambda z}\right) \times b \times \text{sinc}\left(b \frac{y}{\lambda z}\right) \times \left\{ \sum_{n=1, m=1}^{N, M} e^{i2\pi n \frac{x}{\lambda z}} \times e^{i2\pi m d \frac{y}{\lambda z}} \right\} \quad (5)$$

(5) 式代入(1)式得到

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik\frac{x^2+y^2}{2z}} \times a \times \text{sinc}\left(a \frac{x}{\lambda z}\right) \times b \times \text{sinc}\left(b \frac{y}{\lambda z}\right) \times \left\{ \sum_{n=1, m=1}^{N, M} e^{i2\pi n \frac{x}{\lambda z}} \times e^{i2\pi m d \frac{y}{\lambda z}} \right\} \quad (6)$$

取式(6)模的平方得

$$I^2(x, y) = \frac{1}{(\lambda z)^2} \times \left| a \times \frac{\sin \pi a \frac{x}{\lambda z}}{\pi a \frac{x}{\lambda z}} \times b \times \frac{\sin \pi b \frac{y}{\lambda z}}{\pi b \frac{y}{\lambda z}} \right| \times$$

$$\left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{i2\pi n \frac{x}{k}} \times e^{i2\pi m d \frac{x}{k}} \right|^2 \quad (7)$$

最终得到的 $I_{(x,y)}^2$ 即为在光谱仪的接收屏上处任意一点处的衍射光强的光强分布。

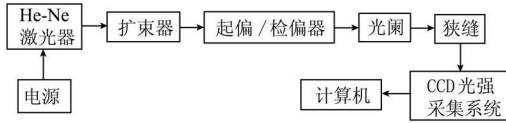


Fig 4 Schematic diagram of measure devices

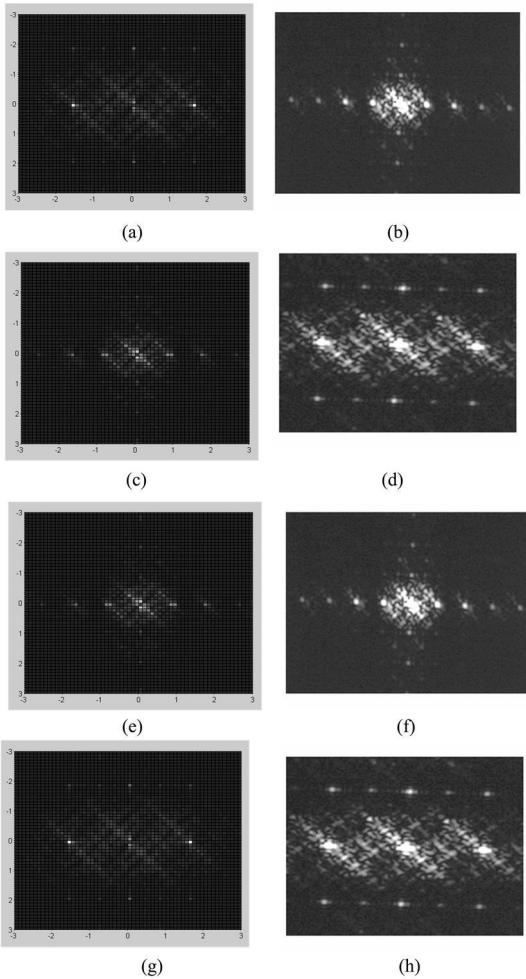


Fig 5 Comparison between the Matlab simulating picture and the actual diffract picture of S slits on throughput in the plane of X-Y

- (a): The Matlab simulating picture of slit No. 1 on throughput;
- (b): The actual diffract picture of slit No. 1 on throughput;
- (c): The Matlab simulating picture of slit No. 2 on throughput;
- (d): The actual diffract picture of slit No. 2 on throughput;
- (e): The Matlab simulating picture of slit No. 3 on throughput;
- (f): The actual diffract picture of slit No. 3 on throughput;
- (g): The Matlab simulating picture of slit No. 4 on throughput;
- (h): The actual diffract picture of slit No. 4 on throughput

3 衍射公式仿真及结果验证

对空间的任意点位置 (x, y, z) , $I_{(x,y)}^2$ 是 a, b, c, d 的多元函数, 且入射狭缝的结构直接决定关系式的大小。为了确定它们之间的关系, 利用 Matlab 软件对 $I_{(x,y)}^2$ 进行仿真计算, 可以得到狭缝的衍射光强分布。为了检验公式及 Matlab 程序得出的衍射后光强分布的准确性, 搭建了实验平台进行测量。测量装置整个系统由光源、扩束镜组、起偏/检偏器、光阑、微硅片狭缝、CCD 和计算机组成, 示意图如图 4 所示。CCD 感光器件大小为 $1/3$, 微硅片狭缝到接收屏的距离为 30 mm。在 X-Y 平面上光强分布仿真结果与利用 CCD 实际测量接收到的衍射后图样对比图, 如图 5 所示。实验表明, 实际得到的衍射光强分布与 Matlab 仿真结果基本一致。

本文中 4 个狭缝由 Matlab 仿真衍射计算最终的能量之比与使用光电池在相同条件下测量得到对应的比值数如表 2 所示。

测量系统在搭建过程中存在安装误差, 如距离, 平行度, 对准程度等偏差等会累加在一起, 从而使测得值产生误差^[5]。

Table 2 Comparison between the slit No. 1 and the other slits on throughput

比较的狭缝名称	仿真能量比值	测得能量比值
狭缝 2/ 狭缝 1	1.01	1.07
狭缝 3/ 狭缝 1	6.70	6.82
狭缝 4/ 狭缝 1	4.40	4.51

4 光强分布规律分析

为了考察单元边距、单元小孔尺寸和阵列阶数这 3 个参数对能量分布的影响, 将分别逐个对这 3 个参数引入变化,

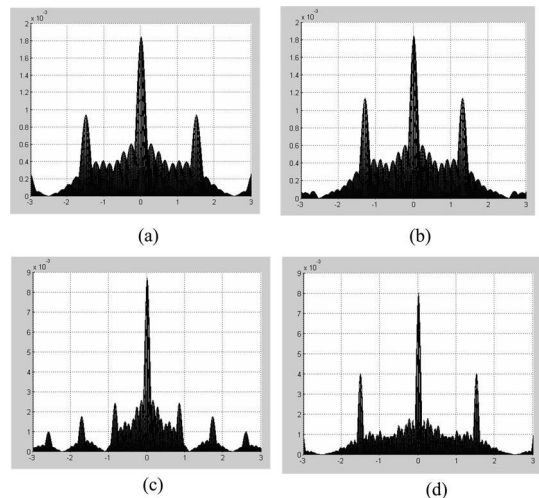


Fig 6 Matlab simulating picture of S slits on throughput

- (a): The Matlab simulating picture of slit No. 1 on throughput;
- (b): The Matlab simulating picture of slit No. 2 on throughput;
- (c): The Matlab simulating picture of slit No. 3 on throughput;
- (d): The Matlab simulating picture of slit No. 4 on throughput

并对它们进行比较。仍然以表 1 中的 3 种 S7 型狭缝和一种 S15 型狭缝为例, 在相同的接收区域内, 在 $Y-Z$ 平面上这 4 种狭缝的 Matlab 仿真衍射光强分布投影如图 6 所示。

从图 6 中发现 S 型狭缝衍射遵循如下规律:

(1) 当狭缝的单元小孔尺寸相同, 阶数相同, 单元边距增大时:

由图 6(a) 和 (b) 相比较可得到: 随着单元边距的增大, 主极大与次极大之间距离减小, 能量更集中, 主极大的最大值相同, 但是次极大的最大值增大, 在接收屏内总体能量增加。

(2) 当狭缝的单元边距相同, 阶数相同, 单元小孔尺寸增大时:

由图 6(a) 和 (c) 相比较可得到: 随着单元小孔尺寸的增大, 主极大与次极大之间的距离变小, 能量更集中, 主极大与次极大最大值均增大, 在接收屏内总体能量增加。

(3) 当狭缝的单元小孔尺寸相同, 单元边距相同时, 阶数增大时:

由图 6(a) 和 (d) 相比较可得到: 随着阶数的增大, 衍射光强分布位置基本相同, 主极大与次极大的最大值都增加, 在接收屏内总体能量增加。

综上所述, 对多狭缝阵列, 当狭缝间距相对增大, 单元

小孔尺寸增大, 阵列阶数增大时, 光通量将增加。通过对光通量的比较分析得出狭缝 3 适合本文的光谱仪。

5 结 论

入射狭缝作为光谱仪中的一个重要元件, 其设计的优劣程度直接影响到光谱仪的性能, 是设计中的关键。本文分析了光谱仪中入射多狭缝阵列的衍射后光强分布, 采用 Matlab 对四种 S 型狭缝阵列的衍射光强仿真, 搭建了试验装置对仿真结果验证, 发现了狭缝的单元边距、单元尺寸和阶数等参数对光通量的影响, 得到多狭缝结构参数变化对光通量影响的变化规律。狭缝结构的优化设计可以更好满足光谱仪对光通量的要求。

该仿真方法能够使设计周期缩短, 而且采用模块化程序设计, 可以实现任意形状狭缝阵列衍射后的光强分布仿真。仿真方法编程简单, 且能反映衍射场的细节特征, 为光谱仪入射狭缝设计结构参数设置提供参考, 缩短了入射狭缝设计周期和节约试制成本。通过对仿真结果的验证表明, 仿真结果正确有效。对光谱仪入射狭缝的快速准确设计具有理论和应用意义。

参 考 文 献

- [1] JIA Hui, YAO Yong(贾 辉, 姚 勇). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(8): 1653.
- [2] Rainer R, Seifert T. SPIE, 1999, 3680: 406.
- [3] Rainer R, Ulrich D. SPIE, 1999, 3753: 203.
- [4] Rainer R, Wuttig A. SPIE, 2001, 4561: 339.
- [5] Thomas S, Rainer R. SPIE, 1999, 3878: 155.
- [6] JU Hui, WU Yi hui(鞠 挥, 吴一辉). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2001, 9(4): 372.
- [7] Harwit M O, Sloane N J A. Hadamard Transform Optics. New York: Academic, 1979. 202.
- [8] Eriks K, Toshiaki N, Ray F. Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 2003, 42: 95.
- [9] Crocker J H, Atkinson C B, Ebbets D C. SPIE, 2000, 4013: 27.
- [10] Scott R, Carrie A, Andre A, et al. SPIE, 2000, 4008: 968.
- [11] ZHOU Lian qun, WU Yi hui, ZHANG Ping, et al(周连群, 吴一辉, 张 平, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2006, 14(6): 990.
- [12] ZHOU Lian qun, WU Yi hui, ZHANG Ping, et al(周连群, 吴一辉, 张 平, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2005, 13(6): 637.
- [13] YU Dao yin, TAN Heng ying(郁道银, 谈恒英). Engineering Optics(工程光学). Beijing: Mechanical Industry Press(北京: 机械工业出版社), 2003. 247.
- [14] LIANG Zhu(梁 柱). Optics Theory Tutorial(光学原理教程). Beijing: Beihang University Press(北京: 北京航空航天大学出版社), 2005. 47.
- [15] FEI Ye tai(费业泰). Error Theory and Data Processing(误差理论和数据处理). Beijing: Mechanical Industry Press(北京: 机械工业出版社), 2000.

Study on the Method of Selecting Hadamard Spectrophotometer's Multi Slits

FAN Yu^{1,2}, WU Yihui¹, XUAN Ming¹, ZHANG Ping¹, ZHOU Liarqun^{1,2}, LIU Yongshun^{1,2}

1. State Key Lab of Applied Optics, 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 realize high throughput of Hadamard spectrometer, the performance of four Hadamard S slits are compared. Multi micrometer silicon slits were produced by MEMS technique. Based on diffraction theory, the formula with Hadamard S matrix is presented. The phenomenon of diffraction is analyzed by using the software of Matlab. The comparison was made between the Matlab simulating picture and the actual diffract picture of S slits on throughput. Experiment results indicate the precisions of the system. The influence of the factors such as spot distance, slit dimension and the matrix array on the throughput was analyzed, then the diffracting way of S slit was offered. The results of emulation are consistent with test, and proved that the design method on the slit in the paper is right. The way of analysis can provide some theoretic and application foundations for slit design.

Keywords Hadamard spectrometer; Micrometer silicon slits matrices; Throughput; Hadamard S slits

(Received Nov. 23, 2009; accepted Feb. 22, 2010)