

静态傅里叶变换红外光谱仪的公差分析

付建国^{1,2} 梁静秋¹ 梁中燾¹

(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 由于光谱分辨率或光谱信噪比只能作为光谱仪干涉系统的性能评价指标,但不能用于光学系统的公差分析与优化,所以将系统分为三个子系统:前置光学系统、干涉系统与后置光学系统,分别采用不同的评价标准分析系统公差。前置光学系统采用波像差为评价标准,给出波像差与光谱噪声的关系,分析误差对波像差的影响,间接给出各种误差对系统性能的影响。干涉系统直接采用光谱噪声作为评价标准,可直接给出各种误差对系统性能的影响。后置光学系统采用光斑尺寸作为评价标准。通过这种方法,计算出三个子系统的灵敏度矩阵,并且给出了前置光学系统与后置光学系统的公差分配。

关键词 傅里叶光学;公差分析;多级微反射镜;评价标准

中图分类号 O438.2; O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0607002

Tolerance Analysis for a Static Fourier-Transform Infrared Spectrometer Based on Multi-Micro Mirrors

Fu Jianguo^{1,2} Liang Jingqiu¹ Liang Zhongzhu¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract The spectral noises or spectral resolution is the main criterion for spectrometer, but it is not suitable for tolerance analysis and optical optimization. Therefore, the system is divided into three sub-systems: the front optical system, the interferometer and the post optical system, and three different criterions are taken separately. Wavefront errors is taken as criterion by the front optical system, and then the relationship between wavefront errors and spectral noises is analysed. If the changes in wavefront errors by the manufacturing and alignment errors are calculated, the influence on system performance could also be evaluated. Spectral noises can be taken as criterion by the interferometer, and the changes in system performance is evaluated directly. The spot diameter is taken as the criterion by the post optical system. Through this way, the sensitivity for three sub-systems and the tolerance tables on the front and post optical systems are listed.

Key words Fourier optics; tolerance analysis; multi-micro mirrors; evaluation criterion

OCIS codes 080.2208; 080.1010; 070.0010

1 引言

基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪是一种静态空间调制的干涉型光谱仪,采用两个多级微反射镜代替时间调制傅里叶变换光谱仪的动镜与

定镜^[1~4]。从光源发出的光经会聚透镜成像到光阑处,然后又经准直透镜准直。准直的光束被反射镜反射到样品池,样品对入射光吸收,产生吸收光谱。含有吸收光谱信息的出射光进入干涉系统,被多级微

收稿日期: 2011-12-06; **收到修改稿日期**: 2012-01-12

基金项目: 国家 863 计划(2009AA04Z315)和国家自然科学基金(60977062,61027010)资助课题。

作者简介: 付建国(1984—),男,博士研究生,主要从事基于阶梯镜的傅里叶变换光谱仪的光学设计方面的研究。

E-mail: jianguofu1984@163.com

导师简介: 梁静秋(1962—),女,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统(MOEMS)及微结构光学等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

反射镜分割为若干份,在分束器处相干,每一份携带一定的相位信息。由于干涉图面积较大,探测器不能完全接收,需要通过缩束系统将光束成像到探测器上。对信号做傅里叶变换,即可复原吸收光谱图。

对该光谱仪的基本原理与光学特性,已经做了相关的研究,并分析了衍射效应、扩展光源、表面粗糙度以及像差等因素对光谱复原的影响,在此基础上提出了指标要求,对该系统进行了初步设计^[5,6]。

光谱仪器一般以光谱分辨率或者光谱信噪比作为系统的性能评价指标,但这种评价方式不适用于系统的公差分析与优化^[7~10]。将系统分解为三部分,采用不同的评价方法分析各种加工误差与装调误差对系统性能的影响,验证初步设计的合理性与可靠性,给出灵敏度矩阵与公差分配。

2 系统初步设计

图 1 给出了基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪结构示意图。图 2 给出了在光学仿真软件

环境下建立的基于多级微反射镜的静态傅里叶变换红外光谱仪模型。系统分为前置光学系统、干涉系统和后置光学系统。前置光学系统将光源发出的光准直,后置光学系统将干涉系统的光束缩小尺寸并将多级微反射镜成像到探测器像面上。

对在光学仿真软件中建立的光谱仪系统模型进行光线追迹,得到如图 3 所示的干涉图。对干涉图做傅里叶变换即可得到复原光谱(如图 4 所示)。从光谱图可以看出,最大噪声为 0.05,这种噪声是由光学系统的像差所致。初步设计方案要求噪声小于 0.1,所以可以满足设计要求。

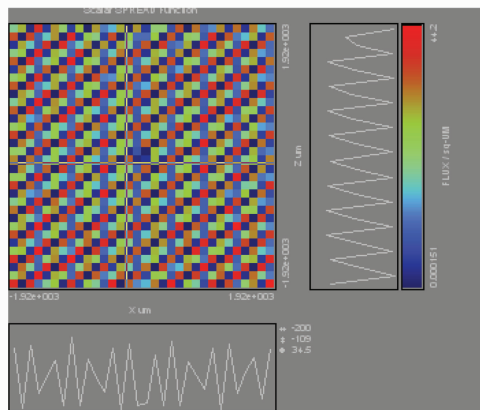


图 3 探测器上的干涉图

Fig. 3 Interferogram on detector

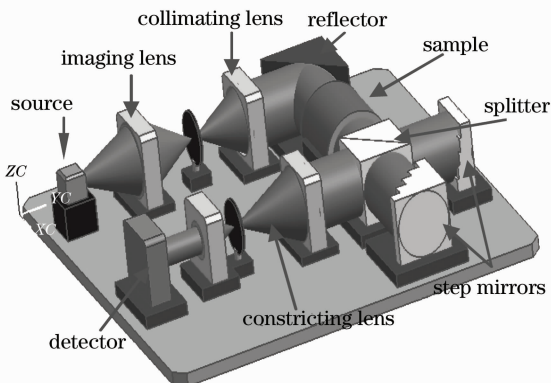


图 1 基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪的示意图

Fig. 1 Scheme of Fourier transform infrared spectrometer based on multi-micro mirrors

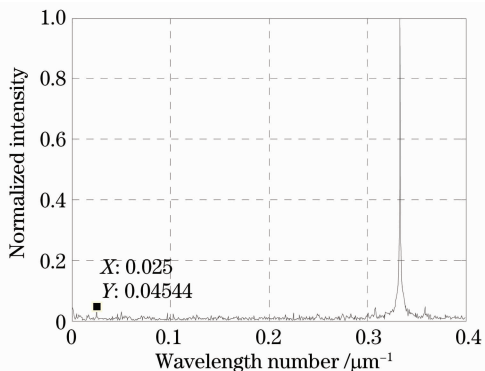


图 4 光谱复原图

Fig. 4 Reconstructed spectrum

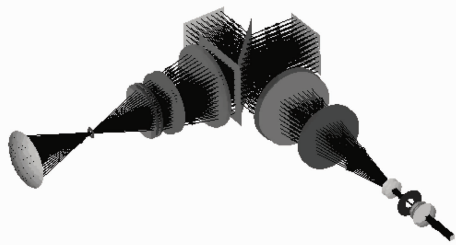


图 2 基于多级微反射镜的静态傅里叶变换红外光谱仪的光学仿真软件模型

Fig. 2 Model of static Fourier-transform infrared spectrometer in optical simulation software based on multi-micro mirrors

3 前置光学系统公差分析

前置光学系统由会聚反射镜与准直透镜组成(如图 5 所示)。会聚反射镜的基底采用融石英材料,而准直透镜采用 CaF_2 和 ZnSe 材料。从光源发出的光经会聚反射镜会聚到一点,然后经准直透镜组入射到干涉系统。由于像差的存在,使得出射的准直光束存在一定的发散角,影响光程差的调制,最终影响光谱复原,产生光谱噪声。由于光谱噪声不

能直接用于评价光学系统的优劣,采用波像差与点列图作为像质评价的方法,分析波像差或者点列图与系统光谱噪声的关系,用以指导光学系统的设计与公差分析。

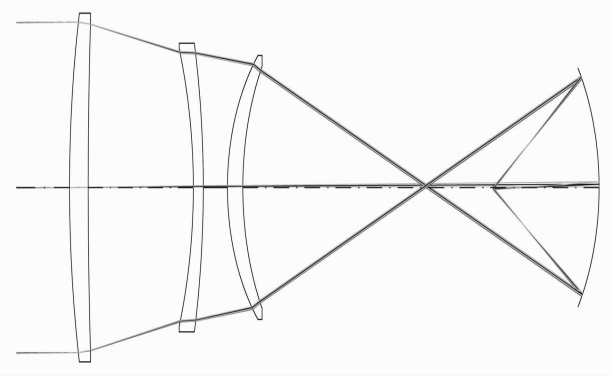


图 5 前置光学系统的结构图

Fig. 5 Structure of the front optics system

由于视场增大会导致光谱分辨率的降低,所以系统的视场很小,只有 0.016 rad,因而轴外像差很小,只需考虑轴上像差即可。假设入射到的干涉系统的光波为非平面波,利用 Seidel 像差公式可表示为

$$\omega = \omega_{020}h^2 + \omega_{040}h^4 + \omega_{080}h^8, \quad (1)$$

式中 ω_{020} 为离焦系数, ω_{040} 为初级球差系数, ω_{080} 为高级球差系数, h 为出瞳处光线归一化高度。利用菲涅耳衍射公式计算非平面波通过干涉系统后的光强分布^[11],再对干涉图做傅里叶变换,即可求得非平面波产生的复原光谱图。图 6 为一非平面波的波前图, λ 为波长, $\omega_{020} = 3\lambda$, $\omega_{040} = 0.8\lambda$, 此时 $d_{pv} = 8\lambda$, $n_{rms} = 0.57\lambda$, 归一化最大光谱噪声为 0.07 (如图 7 所示)。

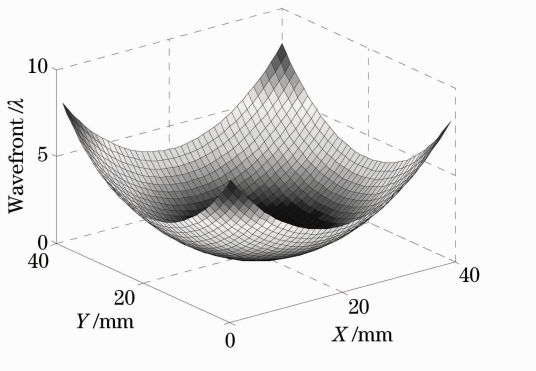


图 6 非平面波的波前图

Fig. 6 Wavefront of non-planar wave

由于波像差构成的复杂性,波像差与最大光谱噪声不构成简单的比例关系。需要根据已知的波像差,计算其产生的噪声。计算表明,当 0° 视场的波像差 n_{rms} 值小于 0.5 时,可以实现最大光谱噪声小

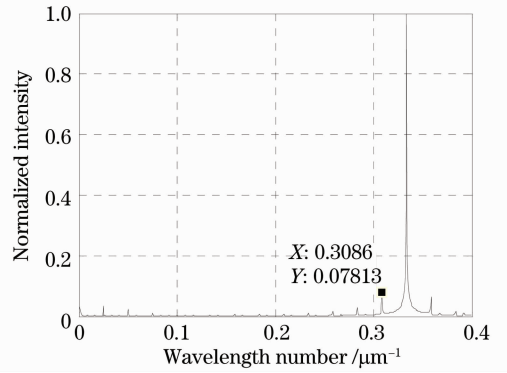


图 7 非平面波入射时的复原光谱

Fig. 7 Reconstructed spectrum with non-planar wave

于 0.1。

通过分析像差对光谱复原的影响可知,虽然不能以光谱噪声为评价标准分析前置光学系统的公差,但是可以以波像差为评价标准,先分析公差对波像差的影响,再分析波像差对光谱噪声的影响,间接地分析公差。以下是应用光学设计软件以逆灵敏度算法给出的灵敏度矩阵(表 1),限制波像差 n_{rms} 改变量小于 0.05,由于数据量较大,只列出波像差 n_{rms} 改变大于 0.01 的变量。从表 1 可以看出,曲率半径和面形对 0° 视场波像差影响较大。

表 1 前置光学系统灵敏度矩阵(视场角 0°)

Table 1 Sensitivity of the front optics (view-field angle 0°)

Type	Change	Change in wavefront errors for plus and minus λ	
Radius for surface 1	2 mm	-0.0261	0.0299
Radius for surface 2	30 mm	-0.0308	-0.0264
Radius for surface 3	0.95 mm	0.0223	0.0249
Radius for surface 4	2.7 mm	0.0131	0.0041
Radius for surface 5	0.1 mm	0.0295	0.0270
Radius for surface 6	0.3 mm	0.0486	0.0412
Radius for surface 7	0.39 mm	0.0217	0.0123
Thickness for surface 5	0.2 mm	0.0412	0.0331
Thickness for surface 6	0.5 mm	0.0229	0.0159
Irregularity for surface 1	3 fringes	0.0283	-0.0031
Irregularity for surface 2	3 fringes	-0.0030	0.0284
Irregularity for surface 5	3 fringes	0.0233	-0.0046
Irregularity for surface 6	3 fringes	-0.0043	0.0234
Irregularity for surface 7	3 fringes	0.0006	0.0351

利用蒙特卡罗法分析逆灵敏度给出的公差(表 2),可以得到其对波像差 n_{RMS} 的影响(如图 8 所示),发现 0° 视场时波像差 n_{RMS} 为 0.3352λ 的概率为

97.7%,改变了 0.1977λ 。由公差列表可以看出,前置光学系统的公差要求宽松,容易加工与装调。

表 2 公差列表

Table 2 Tolerance table

Surface	Radius / mm	Radius tolerance /mm	Irregularity / fringe	Thickness /mm	Thickness tolerance /mm	Tilt /(')	Displacement /mm
1	169.62	2	12/3	5.64	0.5	Surface: 1.2	0.1
2	645.71	30	12/3	31.76	0.5	Element: 17.2	
3	-76.06	0.95	12/3	3	0.5	Surface: 2.1	0.1
4	-128.33	2.7	12/3	7.3	0.5	Element: 6.7	
5	35.75	0.1	12/3	4.63	0.2	Surface: 0.8	0.4
6	44.49	0.3	12/3	107.6	0.5	Element: 8.6	
7	-40	0.39	12/3	-31.997		Element: 3.4	0.4

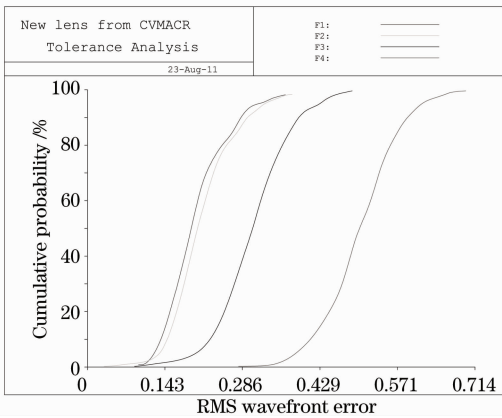


图 8 公差分析图

Fig. 8 Tolerance analysis

4 干涉系统的公差分析

在基于多级微反射镜的干涉系统中,用两个多级微反射镜代替了迈克耳孙干涉仪的两个平面镜。图 9 是该系统在光学仿真软件中的模型,由于多级微反射镜的台阶高度较小,所以图中显示不出阶梯

形状。干涉系统是整个系统的核心部分,它将入射光分为两束后,利用多级微反射镜调制光程,然后在分束器上相干,对干涉图做傅里叶变换即可复原光谱,所以光谱噪声或光谱分辨率可以作为干涉系统的评价方式。利用光学仿真软件对各个参数做一定的改变量,计算最大光谱噪声的大小,可以给出灵敏度矩阵,如表 3,表 4 所示。

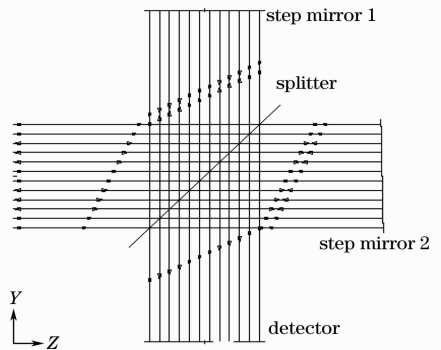


图 9 基于多级微反射镜干涉仪的光学仿真软件模型

Fig. 9 Model of interferometer in optical simulation software based on multi-micro mirrors

表 3 多级微反射镜的灵敏度矩阵

Table 3 Sensitivity of multi-micro mirrors

Type	Change /mm	Noise	Type	Change /(°)	Noise
Shift in X axis for mirror 1	0.5	0.1738	Tilt in X axis for mirror 1	0.01	0.1272
Shift in Y axis for mirror 1	0.5	No change	Tilt in Y axis for mirror 1	0.1	No change
Shift in Z axis for mirror 1	0.5	No change	Tilt in Z axis for mirror 1	0.1	0.03
Shift in X axis for mirror 2	0.5	No change	Tilt in X axis for mirror 2	0.1	0.04
Shift in Y axis for mirror 2	0.5	0.073	Tilt in Y axis for mirror 2	0.0005	0.2536
Shift in Z axis for mirror 2	0.5	No change	Tilt in Z axis for mirror 2	0.1	No change

表 3 分析的是多级微反射镜装调误差对光谱复原的影响。由表 3 可知,多级微反射镜 1(小台阶)对沿 X 轴旋转的误差比较灵敏,多级微反射镜 2(大台阶)对沿 Y 轴旋转的误差比较灵敏。从模型图可

知,这两个误差属于同一类型:旋转轴与台阶的长度方向垂直共面。此外,有几个误差量的对光谱复原没有产生明显的影响,这是因为这些误差没有明显地影响光程差的调制。

表4 台阶的灵敏度矩阵
Table 4 Sensitivity of steps

Type	Standard deviation / μm	Noise	Type	Standard deviation / $(^\circ)$	Noise
Shift in X axis for small step	100	0.0852	Tilt in X axis for small step	0.001	0.1914
Shift in Y axis for small step	0.1	0.1757	Tilt in Y axis for small step	0.1	No change
Shift in Z axis for small step	500	No change	Tilt in Z axis for small step	0.01	0.08
Shift in X axis for big step	500	No change	Tilt in X axis for big step	0.01	0.0776
Shift in Y axis for big step	100	0.1337	Tilt in Y axis for big step	0.001	0.1836
Shift in Z axis for big step	0.5	0.103	Tilt in Z axis for big step	0.1	No change

在实际制作中,无法保证多级微反射镜的每个台阶完全一致。假设台阶的误差按高斯函数分布,设置标准偏差的大小,计算最大光谱噪声。表5是对台阶的公差分析,由表可知小台阶对沿Y轴平移

与大台阶对沿Z轴平移的误差比较灵敏。这两个变量就是两个台阶的高度,它们的精度决定了光程差调制的精度。与多级微反射镜相同的是小台阶沿X轴旋转与大台阶沿Y轴旋转的误差灵敏度也很高。

表5 分束器的灵敏度矩阵

Table 5 Sensitivity of beam splitter

Type	Change /mm	Noise	Type	Change / $(^\circ)$	Noise
Shift in X axis	0.5	No change	Tilt in X axis	0.005	0.1211
Shift in Y axis	0.5	0.1862	Tilt in Y axis	0.0005	0.3385
Shift in Z axis	0.5	0.0767	Tilt in Z axis	0.1	No change

表6分析了分束器装调误差对光谱复原的影响。由表6可知,分束器的装调精度对系统性能的影响很大,尤其是对旋转精度的控制。分束器面形与厚度误差对光谱复原的影响无法在光学仿真软件中模拟,但可以等效为前置光学系统的一部分,分析其像差对光谱复原的影响。

表6 缩束系统的灵敏度矩阵

Table 6 Sensitivity of the constricting lens

Type	Change	Diameter of spot / μm
Surface 12	5 fringe	-0.893
Surface 13	5 fringe	1.051
Surface 14	5 fringe	-0.719
Surface 15	5 fringe	1.142
Thickness for surface 12	0.025 mm	-0.864
Thickness for surface 13	0.025 mm	-1.185
Thickness for surface 14	0.025 mm	0.981
Irregularity for surface 10	1 fringe	1.137
Irregularity for surface 11	1 fringe	1.247
Irregularity for surface 12	1 fringe	0.848
Irregularity for surface 13	1 fringe	0.965
Irregularity for surface 14	1 fringe	0.516
Tilt in Y axis for surface 1	0.025 mm	2.69
Tilt in X axis for surface 1	0.025 mm	1.972
Tilt in Y axis for surface 3	0.025 mm	4.712
Tilt in X axis for surface 3	0.025 mm	3.784

(续表6)

Type	Change	Diameter of spot / μm
Tilt in Y axis for surface 5	0.025 mm	4.310
Tilt in X axis for surface 5	0.025 mm	3.573
Tilt in Y axis for surface 7	0.025 mm	1.402
Tilt in X axis for surface 7	0.025 mm	1.273
Tilt in Y axis for surface 10	0.025 mm	0.599
Tilt in Y axis for element 5	0.025 mm	0.762
Displacement in Y axis for element 5	0.025 mm	0.533
Displacement in X axis for element 5	0.025 mm	0.565
Tilt in Y axis for surface 10	0.025 mm	1.544
Tilt in Y axis for element 6	0.025 mm	8.799
Tilt in X axis for element 6	0.025 mm	8.011
Tilt in Y axis for surface 14	0.025 mm	7.725
Tilt in X axis for surface 14	0.025 mm	7.025
Displacement in Y axis for element 7	0.025 mm	5.911
Displacement in X axis for element 7	0.025 mm	5.737

干涉系统的灵敏度矩阵分析尚不能给出公差分配,准确的公差分配需要结合实际的加工条件灵活确定。

5 后置光学系统的公差分析

后置光学系统采用开普勒远心光路结构(如图10所示),它的作用是对干涉系统的出射光进行缩束,并将多级微反射镜成像到探测器上。后置光学

系统采用 Si 和 Ge 材料。与前置光学系统一样,不能直接利用光谱噪声或者光谱分辨率对光学系统进行优化和公差分析,所以采用点列图作为光学系统

优化与公差分析的评价方法,再找到光斑尺寸与光谱噪声的关系,间接地分析公差对系统的影响。

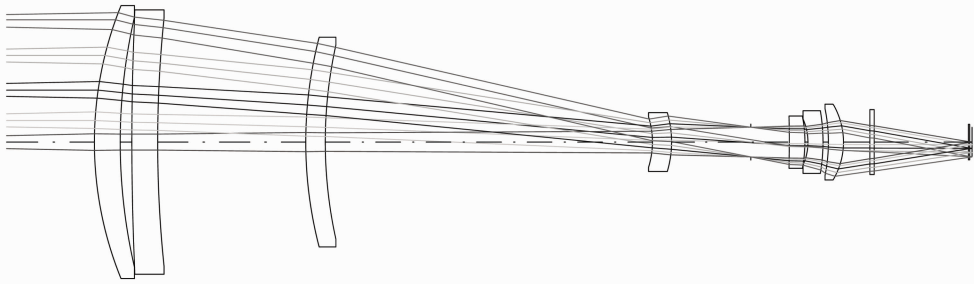


图 10 缩束系统的结构图

Fig. 10 Structure of constricting lens

研究发现,最大光谱噪声随着光斑的大小单调递增(如图 11 所示)。常见的中红外探测器的像元

尺寸为 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$,所以要求缩束系统的光斑尺寸小于 $30\ \mu\text{m}$ 。

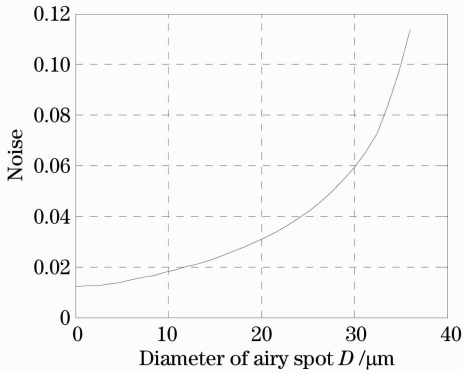


图 11 光斑直径与噪声的关系图

Fig. 11 Relation between spot diameter and noise

设计的系统的视场高度为 0 时的光斑尺寸约为 $4.8\ \mu\text{m}$,满足系统需求。以光斑几何尺寸为评价标准,使用光学设计软件默认的公差计算灵敏度矩阵,由于数据量较大,只输出视场高度为 0 时,光斑尺寸改变量大于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的数据(表 6)。

由表 6 可知,对光斑尺寸影响较大的变量多为面的倾斜与镜头的倾斜,说明加工时对透镜楔形角要求高,装调时对元件倾斜度要求高。表 7 是结合加工条件给出的公差列表。其中要求较高的是第 6 片镜子,其他量都在加工能力范围之内。利用蒙特卡罗法分析公差对光斑尺寸的影响(如图 12 所示),计算结果显示,光斑尺寸小于 $16\ \mu\text{m}$ 的概率为 97.7%。

表 7 缩束系统的公差列表

Table 7 Tolerances of the constricting lens

Number	Radius /mm	Surface tolerance	Tilt tolerance	Thickness /mm	Thickness tolerance	Displacement tolerance
0				96		
1	83.56	N2; $\Delta N0.5$	Surface: $1'$	6	± 0.05	± 0.05
	127.64	N2; $\Delta N0.5$	Element: $2'$	2.7	± 0.05	
2	668.3	N2; $\Delta N0.5$	Surface: $1'$	6	± 0.05	± 0.05
	279.3	N2; $\Delta N0.5$	Element: $2'$	34.4	± 0.05	
3	96.16	N2; $\Delta N0.5$	Surface: $1'$	4.53	± 0.05	± 0.05
	102.8	N2; $\Delta N0.5$	Element: $2'$	76	± 0.05	
4	-19.055	N2; $\Delta N0.5$	Surface: $1'$	4.44	± 0.05	± 0.05
	-23.77	N2; $\Delta N0.5$	Element: $2'$	18.44	± 0.05	
Stop				8.9		± 0.04
5	-423.6	N2; $\Delta N0.5$	Surface: $1'$	3.64	± 0.05	± 0.04
	-31.62	N2; $\Delta N0.5$	Element: $2'$	0.7	± 0.05	
6	-12.822	N2; $\Delta N0.5$	Surface: $40''$	3.5	± 0.02	± 0.02
	-42.85	N2; $\Delta N0.5$	Element: $1'$	1.25	± 0.02	
7	-37.33	N2; $\Delta N0.5$	Surface: $1'$	3.5	± 0.02	± 0.02
	-17	N2; $\Delta N0.5$	Element: $2'$	6.12		

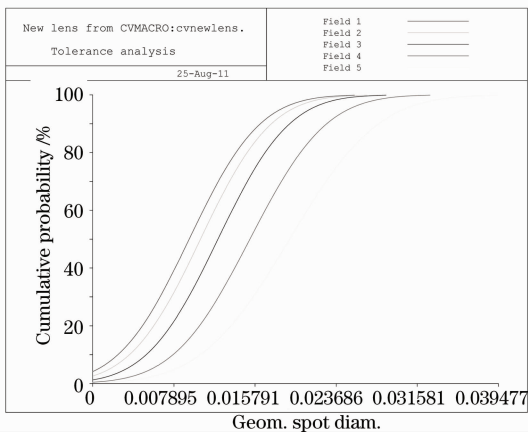


图 12 公差分析图

Fig. 12 Tolerance analysis

6 结 论

针对基于多级微反射镜的静态傅里叶变换红外光谱仪的初步设计,对系统的公差进行分析。对不同的子系统采用不同的评价方法,便于系统的公差分析与优化。但由于方法的局限性,无法给出干涉系统的公差列表,只能以灵敏度矩阵为参考,结合实际条件灵活分配。公差分析的结果表明,对前置光学系统与后置光学系统的加工与装调精度要求比较宽松,而对干涉系统的个别变量的精度要求较高,主要集中在多级微反射镜与台阶的旋转精度。台阶的结构误差可以利用微机械加工工艺控制,多级微反射镜的旋转误差需要在装调中加以高精度的控制。

参 考 文 献

- 1 J. Courtial, B. A. Patterson, A. R. Harvey *et al.*. Design of a static Fourier-transform spectrometer with increased field of view [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(34): 6698~6702
- 2 Kong Yanmei, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *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, 梁中翥等. 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
- 3 K. D. Moller. Wavefront dividing interferometer [J]. *Infrared Phys.*, 1991, **32**: 321~331
- 4 K. D. Moller, D. P. Siddons, C. J. Hirschmugl *et al.*. Two-mirror wave-front-dividing interferometer for infrared synchrotron radiation [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(30): 4297~4301
- 5 Feng Cong, Wang Bo, Liang Zhongzhu *et al.*. Miniaturization of step mirrors in a static Fourier transform spectrometer: theory and simulation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(1): 128~133
- 6 Fu Jianguo, Liang Zhongzhu, Liang Jingqiu. Analysis of diffraction in Fourier-transform infrared spectrometer based on step mirrors [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(12): 3203~3207
- 付建国, 梁中翥, 梁静秋. 基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪衍射效应分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(12): 3203~3207
- 7 Weng Shifu. Fourier Transform Infrared Spectrometer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 40~42
- 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 40~42
- 8 Liu Lin, Zhang Xingde, He Yiliang. Monte Carlo simulation and its application in the IR optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(5): 496~499
- 刘琳, 张兴德, 贺谊亮. 基于蒙特卡洛模拟法的红外光学系统公差分析 [J]. *激光与红外*, 2010, **40**(5): 496~499
- 9 Xiang Yang, Xiang Caixin. The effects of surface roughness on point spread function [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1764~1769
- 向阳, 向才新. 表面粗糙度对点扩散函数影响的研究 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1764~1769
- 10 Xiang Yang, Xiang Caixin. Optical transfer function and image evaluation criterion of an optical system with partially coherent illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1375~1381
- 向阳, 向才新. 部分相干光学成像系统的光学传递函数和像质评价准则 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1375~1381
- 11 Guo Chengshan, Li Chuantao, Hong Zhengping *et al.*. Suitability of different sampling methods for digital simulations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 442~446
- 国承山, 李传涛, 洪正平等. 光衍射数值模拟中不同抽样方法的适用性分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 442~446

栏目编辑: 韩峰