一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统 分析与设计

付建国1,2 梁静秋1 梁中翥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 对基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪进行了光学分析,研究了光源尺寸、光强分布的不均匀性和 光学系统像差等因素对光谱复原的影响。发现光源尺寸影响光谱分辨率,光强分布的不均匀性和光学系统像差会 产生基线噪声。数值计算的结果表明,当光阑的尺寸小于 2.5 mm,不均匀的标准偏差小于 0.5,准直系统的波像差 均方根值小于 0.05,以及缩束成像系统的光斑直径小于 30 μm 时,光谱复原的噪声可以忽略。给出了光学系统的 设计结果。

关键词 光学设计;傅里叶变换光谱仪;多级微反射镜;静态 中图分类号 O438.2; O435.2; O435.1; O432.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0222006

Analysis and Design for the Optical System of a Static Infrared Fourier Transform Spectrometer

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

 $^{\rm 1}\,State$ Key Laboratory of Applied Optics , Changchun Institute of Optics ,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jiling 13003, China

² Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract The optical properties of the Fourier transform spectrometer such as the size of source, the ununiformity of the intensity and the aberration of the optical system are analysed. It is shown that the large size of source caused the double peaks and lower spectral resolution, the ununiformity and the aberration cause the noises on the base line. The numerical results show that the noises can be ignored as the size of source at the stop is smaller than 2.5 mm, the standard deviation of intensity is smaller than 0.5, the root-mean square (RMS) of wavefront aberration for the collimating lens is smaller than 0.05 waves, and the RMS of spot diameter for constricted lens is smaller than 30 μ m. The design of optical systems is proposed.

Key words optical design; Fourier transform spectrometer; step mirrors; static state OCIS codes 220.4830; 300.6340; 070.4790; 230.4040

1 引

言

傅里叶变换红外光谱仪由于具备光谱覆盖范围 宽、光通量大和波数精度高等特点已经被广泛地应 用于科研与生产领域^[1]。傅里叶变换光谱仪按光程 差的产生方式可分为时间调制型和空间调制型两 类。时间调制型的傅里叶变换光谱仪由于使用了动 镜驱动结构,使其对环境的要求很高,因而在野外探 测以及空间探测等领域迫切需求空间调制的微型傅

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和微结构光学等方面的研究。 E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn(中国光学学会会员号:1309126)(通信联系人)

收稿日期: 2011-07-14; 收到修改稿日期: 2011-10-09

里叶变换光谱仪(μFTS)^[2~7]。

近几年,国际上对 "FTS 研究十分关注,国外正 在研究的 "FTS 的工作波段多为可见及近红外波段, 大部分采用基于时间调制的方式,动镜的驱动方式有 热电、电磁和静电梳驱动等方式。2006年,Sin等^[8] 利用硅微机械加工和组装工艺实现了单片集成迈克 耳孙扫描干涉微光学系统,它是在一片硅衬底上通过 深层反应离子刻蚀工艺将线性动镜平移台、分束器、 反射镜和组装槽集成在一起,由热电驱动器驱动动镜 做线性平移,在22 V的驱动电压下可以达到30 µm 最大位移,可以在 775 nm 的波段获得 10 nm 分辨 率,该系统尺寸仅为5 mm×4.5 mm。2008年, Reves 等^[9]也采用微机电系统(MEMS)技术实现了 时间调制的傅里叶变换红外光谱仪。该研究利用表 面微加工技术实现了系统基座的制作,并重点研究 了动镜驱动系统,利用两个次镜来调节主镜即反射 镜的角度及位移,实现了 2~14 µm 的红外探测。 2009年, Martin 等^[10]利用波导实现静态的 *µ*FTS, 它基于平面波导的平面漏导回路结构,在回路结构 中产生的干涉条纹通过平面波导到达探测器阵列 上,实现信号的探测,但该结构存在的问题同样是所 能测量的波段范围较窄,因此不适合宽光谱范围的 测量。2009年,孔延梅等[11]研究一种新型结构的基 于多级微反射镜的空间调制型傅里叶变换光谱仪。 该光谱仪采用迈克耳孙干涉仪结构,用两个多级微 反射镜代替时间调制型干涉仪的动镜与定镜。两个 多级微反射镜正交摆放,将入射光空间分割为若干 份,每一份可看作传统傅里叶变换的一次采样。该 光谱仪光谱范围可以覆盖中波红外,而且实现静态 采样,结构简单、紧凑、稳定,适合用于野外探测与空 间探测。对于这种特殊结构的光谱仪,尚无法确定 光源的尺寸、光源照度的不均匀性和光学系统的像 差对光谱复原的影响,也没有相关的研究作为参考, 所以不能给出系统设计的指标要求。本文详细讨论 了这些问题,并且给出设计结果[12~16]。

2 基本原理

如图 1 所示,基于多级微反射镜的傅里叶变换 红外光谱仪的核心部件为两个正交摆放的多级微反 射镜。两个镜子的台阶个数相同,台阶周期不同。 设小台阶个数为 m,周期为 d,则大台阶个数为 m, 周期为 md。两个多级微反射镜的参数是由光谱仪 的工作波段、分辨率和衍射效应等多个因素决定的, 台阶高度在 0.5~20 μm 之间。



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 a Fourier transform IR spectrometer based on multi-step micro mirrors

从光源发出的光经透镜会聚到光阑处,由光阑 控制点光源的尺寸,然后经准直系统准直,透过样品 池,被样品部分吸收。透射光经过干涉系统后形成 干涉图,对其做傅里叶变换即可复原吸收光谱,实现 样品检测。

两个多级微反射镜将入射光分为 m^2 份,每一 份携带一定的相位信息。设 x 为大台阶序数,y 为 小台阶序数,则两个台阶对应区域产生的光程差为 $\delta(x,y) = 2d (my - x)$ 。并且 m^2 个干涉图对应的 光程差在空间上分布具有一定的规律性,以图 2 所 示的 3×3 阵列为例分析,其中 Δ 为一个采样间隔。

0	34	6Δ
Δ	4Δ	7Δ
2Δ	5Δ	84

图 2 3×3 多级微反射镜空间干涉后光能量分割及 光程差示意图

Fig. 2 Scheme of optical path difference and division of energy with 3×3 step micro mirrors after interference in space

设入射光波数为v,则反射面(x,y)对应的干涉 光强为

$$I(\nu, x, y) = \frac{1}{2m^2} B_0(\nu) \{1 + \exp[i2\pi\nu 2d(my - x)]\}, \quad (1)$$

式中 B₀(v)为光谱亮度。舍去直流分量,对v积分, 可得到整个光谱范围的干涉强度函数为

$$\int_{0}^{\infty} \frac{1}{2m^{2}} B_{0}(\nu, x, y) \exp[i2\pi\nu 2d(my - x)] d\nu. \quad (2)$$

当不考虑平面坐标时, $B_0(\nu, x, y)$ 简化为 $B_0(\nu)$, 对频域进行离散量化, 取波数间隔 $\delta \nu = \frac{1}{\delta_{\max}}$, 离散波数 $\nu_n = \frac{n}{m^2 \Delta}$, $(n = 0, 1, \dots, m^2 - 1)$ 。在这些频率上, 对 干涉强度做离散傅里叶变换可得离散光谱为

$$B_{0}(\nu_{n}) = \sum_{k=-n}^{m^{2}} I_{D}(k) \exp\left(-i \frac{2\pi nk}{m^{2}}\right), \quad (3)$$

采用过零单边采样方法用于相位校正,即k = -n, …, 0,…, $m^2 - n$,其中n为过零采样量。

3 光源的尺寸对光谱复原的影响

如图 3 所示扩展光源经成像透镜在光阑处成像,通过调节光阑的大小,即可调节系统的视场角:



图 3 扩展光源产生的视场角 Fig. 3 Angle of vision produced by extended light source



式中 R 为光阑半径, f' 为准直透镜焦距。由于视场 角的存在, 多级微反射镜产生的光程差不再是 $\delta = 2d(mx-y)$, 而是 $\delta_e = 2d(mx-y)/\cos\theta$, 如图 4 所示。

分别计算立体角 $\Omega = 0.1$ rad 与 $\Omega = 0.002$ rad 时的复原光谱,如图 5 所示。立体角 Ω 与视场角 θ 的 关系为

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta), \qquad (5)$$

通过对比图 5 中两图可以发现,由于视场角的存在使 得系统的光谱分辨率降低,而且出现双峰现象。出现 这种现象是因为不同视场角的干涉光在探测器像元 上叠加,每一个视场角对应一个光程差,使得相干性 降低,相干长度变短,最终导致光谱分辨率降低。



图 4 多级微反射镜产生的光程差

Fig. 4 Optical path difference produced by the step mirrors





Fig. 5 Reconstructed spectra with extended light source

图 6 为光谱分辨率与立体角的关系图。由图 6 可知光谱分辨率随立体角的增大而增大。若要提高 系统的分辨率,可以减小光阑的尺寸,但这样会导致 系统光通量的降低。在本系统中,要求探测器输入 信号的信噪比大于 100。设置立体角小于 0.001 rad,此时光阑直径小于 2.5 mm。当黑体温 度为 100 K时,理论上信噪比最高可达 2×10⁵,而 且可实现光谱分辨率与理论值接近。

4 光强不均匀性对光谱复原的影响

由(1)式可知,理论上入射光在各个台阶的光谱 亮度 $B_0(\nu)$ 是一致均匀的,但是由于光源在空间上 发光不均匀,探测器各像元响应不均匀等因素,导致 $B_0(\nu)$ 在空间上分布不均匀。设台阶个数为 32,采 样点数为 1024,入射波长为 3 μ m,按正态分布随机 选取 1024 个 $B_0(\nu, x, y)$,其平均值为 0,标准偏差为 1,其 $B_0(\nu, x, y)$ 在空间的分布如图 7 所示。



图 7 入射光谱亮度在空间上的分布图

Fig. 7 Distribution of spectral brightness incident light

入射光经过干涉系统后,干涉光强由(2)式可得,去除其直流分量,做傅里叶变换,复原光谱如图8所示。由图可知:1)基线噪声很大会导致光谱 信噪比降低,湮没弱的光谱信号;2)对光谱分辨率几 乎不产生影响。





这种基线的光谱噪声主要和入射光在空间分布 的不均匀有关,用光强的标准偏差σ表示入射光的 不均匀性,计算标准偏差与最大基线噪声的关系,如 图 9 所示。由图 9 可知,标准偏差与噪声基本成线 性关系。噪声随着标准偏差的增加而增大。由(2) 式可知, $B_0(v,x,y)$ 随空间位置(x,y)变化而变化, 将其直接做傅里叶变换导致产生噪声。降低噪声的 方法有两种:1)选择光强分布均匀的光源,当标准偏 差 σ 小于 0.5 时,就能保证光谱噪声小于 0.06;2) 通过数据处理消除光强分布不均匀的影响。



图 9 光强的标准偏差与噪声的关系 Fig. 9 Relationship between noise and standard deviation of incident-light intensity

5 像差对光谱复原的影响

光学系统主要有会聚系统、准直系统和缩束系统。会聚系统与准直系统使光源发出的光准直入射 到干涉系统,如图 10 所示,而缩束系统的作用为改 变光束的尺寸并将多级微反射镜成像在探测器上。 缩束系统采用开普勒形式的远心光路结构,如图 11 所示。会聚系统对像差的要求不高,只对光强分布 有所要求。所以只分析另外两种系统的像差对光谱 复原的影响。



图 10 光源结构示意图 Fig. 10 Scheme of structure of light source



图 11 缩束系统示意图 Fig. 11 Scheme of constricted lens

5.1 准直系统的像差的对光谱复原的影响

从光源发出的光(3~5 μm)经过会聚系统和准 直系统转变为平行光束,如图 12(a)所示,设其波长 为λ,图 12 中各坐标均以λ为单位。由于系统像差 的存在,使理想情况下的平行光产生一定的发散角, 而不垂直于反射镜的发散光束使得多级微反射镜对 光程差的空间调制产生偏差。由于扩展光源的尺寸 较小,只有 2.5 mm,系统的视场也只有 0.98°,轴外 点像差很小,所以只考虑轴上点像差。假设入射光 波为非平面波,即有一定像差的波面函数 w,利用赛 德尔公式可表示为

$$w = w_{020}h^2 + w_{040}h^4 + w_{080}h^8, \qquad (6)$$

式中 w_{020} 为离焦系数, w_{040} 为初级球差系数, w_{080} 为高级球差系数,h为出瞳处光线高度。取 $w_{020} = 0.2\lambda$,

 $w_{040} = 0.1\lambda$, $w_{080} = 0$, 波长 $\lambda = 3 \mu m$, 可得 w 如 图 12(b) 所示, 其峰谷值为 0.61 μm , 均方根值为 0.04 μm 。利用菲涅耳衍射公式可得像面处的光强 分布^[16], 然后对干涉图做傅里叶变换就可得复原光 谱, 如图 13 所示。由图可见非平面波入射时产生的 噪声较大。这是因为非平面波的入射波面可以导致 衍射效应增强。关于衍射效应对光谱复原的影响可 参阅文献[17,18]。利用这种计算方法可以在已知 波像差的情况下计算出像差对光谱复原的影响,但 是由于像差构成的复杂性, 很难给出波像差与噪声 的数值关系。总的趋势为波像差越大, 噪声越大。 多次计算结果显示, 当波像差均方根小于 0.05 λ 时, 所引起的噪声可以忽略。



图 12 (a) 平面波; (b) 非平面波 Fig. 12 (a) Plane wave and (b) curved wave



图 13 (a)平面波(b)非平面波入射时的复原光谱图 Fig. 13 Reconstructed spectra with (a) plane wave and (b) curved wave

5.2 缩束系统像差对光谱复原的影响

设一个反射面元只能覆盖 4 pixel×4 pixel,如 图 14所示,缩束系统的放大倍率 β =0.12。对于这种 缩束成像系统,光谱复原的影响来自于光斑的尺寸。 这是因为当光斑尺寸较大,分辨率较低时,相邻两个 像素之间的信号相互干扰,无法区分,如图 14 所示。 图 14(b)为分辨率为 33.3 line/mm,光斑尺寸为 30 μ m时探测器上的干涉图分布。与理想情况下的 干涉图图 14(a)对比,光强分布发生明显变化,信号 相互干扰。对干涉图做傅里叶变换可得复原光谱, 如图 15 所示。从复原光谱图可以发现,虽然干涉图 已经发生较大的变化,但复原光谱噪声却较小。对 于这种分辨率为 33.3 line/mm 的光学系统很容易 实现。计算分辨率产生的噪声与分辨率的关系,如 图 16 所示,噪声随着光斑直径的增加而增大。因 此,要求缩束系统的光斑直径小于 30 µm 即可。



图 14 (a)理想情况下和(b)分辨率为 33.3 line/mm 时探测器上的光强分布 Fig. 14 Distribution of the (a) ideal interferogram on detector and (b) the one with the resolution 33.3 line/mm





20

Diameter of Airy spot $D/\mu m$

30

40

10

6 光学系统设计

0.02

0<u>∟</u>

6.1 中波红外准直系统设计

准直系统主要用于将光阑处的会聚光进行准 直。镜头的口径由多级微反射镜的尺寸决定,并需 保证一定的光通量。系统的视场由光阑的尺寸决 定,视场不能过大,否则会降低光谱仪的分辨率。准 直系统的设计参数及设计结果,如图 17~图 19 所 示。

波长范围为 $3\sim5 \mu m$,视场范围为 $0.98^{\circ}, F' =$ 80 mm, F 数取 1.5,取准直透镜 0 视场发散角 $\theta <$ 1.25 mrad,二级光谱像差小于 0.02 mm,波面均方 根差小于 0.05λ,峰谷值小于 0.1λ。



图 17 准直系统结构图 Fig. 17 Optical layout of collimating system



图 18 准直系统的横向像差



6.2 中波红外缩束系统设计

将多级微反射镜放置在物镜的焦平面处,将探测器放置在目镜的焦平面处。远心光路结构可以保证多级微反射镜所有的面都能清晰地成像。以下是一些结构参数及设计结果,如图 20~22 所示。

波长为 3~5 μm,视场范围为 0.98°,物镜 f'_1 = 120 mm, F 数为 2,目镜 f'_2 =14.4 mm, F 数为 2, 放大倍率为 β =0.12,畸变小于 0.5%,色差小于 0.05 mm,点列图直径均方根值差小于 20 μm。



图 19 准直系统的波像差

Fig. 19 Wavefont aberration of the collimating system



图 20 缩束光学系统结构图 Fig. 20 Optical layout of constricted lens







Fig. 22 Spot diagram

7 结 论

通过对基于多级微反射镜的静态傅里叶变换红 外光谱仪的光学结构分析发现,光源的尺寸、光强分 布的不均匀性和光学系统像差都会对光谱复原产生 影响。光源的尺寸过大,对光程差的调节产生偏差, 导致光谱分辨率的降低以及双峰的出现。光强分布 不均匀与光学系统像差会导致复原光谱图中的基线 噪声。分析这些因素对光谱复原的影响,有助于提 出设计性能要求和技术指标。计算结果表明,当光 阑的尺寸小于 2.5 mm,不均匀的标准偏差小于 0.5,准直系统的波像差均方根值小于 0.05 以及缩 束成像系统的光斑直径小于 30 μm 时,光谱复原的 噪声可以忽略。最后结合设计要求,设计出了满足 系统要求的准直系统与缩束成像系统。

参考文献

1 Lan Tiange, Xiong Wei, Fang Yonghua et al.. Study on passive detection of biological aerosol with Fourier-transform infrared spectroscopic technique[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1656~1661

兰天鸽, 熊 伟, 方勇华等. 应用被动傅里叶变换红外光谱技术 探测生物气溶胶研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1656~1661

2 Shi Junfeng, Hui Mei, Wang Dongsheng et al.. Micromation and applications of spectrometers [J]. Opt. Tech., 2003, 29(1): 13~16

史俊锋,惠 梅,王东生等.光谱仪的微型化及其应用 [J]. 光 学技术,2003,**29**(1):13~16

3 Kong Yanmei, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. Developments of the micro modulating spectrometers [J]. Semicond. Optoeleltron., 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

- 4 Lin Ling, Ren Chao, Li Gang. Theory and correction of interference fringe in static Fourier transform spectrometer[J]. Spectrosc. & Spectral Analy., 2008, 28(9): 2067~2072
 林 凌,任 超,李 刚. 静态傅里叶变换光谱仪的机理及干涉 条纹的校正[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9): 2067~2072
- 5 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
- 6 Shi Shanjin, Shen Weimin, Gu Huajian *et al.*. Compact stationary Fourier-transform spectrometer principle and optical design [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(3): 16~18 时善进, 沈为民, 顾华俭等. 紧凑型静态傅里叶变换光谱仪的工作原理与光学设计[J]. 激光杂志, 2000, **21**(3): 16~18
- 7 Shen Weimin, Shi Shanjin. Compact spatially modulated Fourier transform spectrometer [J]. Semicond. Optoelectron., 2001, 22(6): 408~410

沈为民,时善进.紧凑型空间调制傅里叶变换光谱仪[J]. 半导体光电,2001,22(6):408~410

- 8 J. Sin, W. Lee, D. Popa *et al.*. Assembled Fourier transform micro-spectrometer [C]. SPIE, 2006, **6109**: 1~8
- 9 D. Reyes, E. R. Schildkraut, J. Kim *et al.*. A novel method of creating a surface micromachined 3-D optical assembly for MEMSbased miniaturized FTIR spectrometers [C]. SPIE, 2008, 6888: 1~8
- 10 B. Martin, A. Morand, P. Benech *et al.*. Design of a compact static Fourier transform spectrometer in integrated optics based on a leaky loop structure [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 184~186
- 11 Kong Yanmei, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu et al.. The investigation and simulation of a novel spatially modulated micro-Fourier transform spectrometer [J]. Spectrosc. & Spectral Anal., 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 12 Yu Bin, Chen Danni, Sun Qiang *et al.*. Design and analysis of new diffractive optic imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2009, **29**(5): 1260~1263

于 斌, 陈丹妮, 孙 强等. 新型衍射光学成像光谱仪的设计和 分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(5):1260~1263

- 13 Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679 刘 琳, 沈为民,周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统设计[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 675~679
- 14 Jiang Yanbin, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Beam shaping method for uniform illumination by superpositon of multi-titled Gaussian beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (4): 1012~1017
 姜燕冰,严惠民,张秀达等.基于倾斜多高斯光束叠加的均匀化

奏燕冰,严惠民,张秀达等.基于倾斜多高斯光束叠加的均匀化 照明整形方法[J].中国激光,2010,**37**(4):1012~1017

15 Hu Shijie, Shen Feng, Xu Bing *et al.*. Study of simulation and experiment of the aberration of retro reflector array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1433~1436
胡诗杰,沈 锋,许 冰等. 角锥棱镜阵列像差仿真与实验研究

胡诗杰,沈 锋,许 冰等.角锥棱镜阵列像差仿真与实验研究 [J].中国激光,2009,**36**(6):1433~1436

16 Guo Chengshan, Li Chuantao, Hong Zhengping *et al.*. Suitability of different sampling methods for digital simulations of the optical diffraction [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

- 17 C. Feng, B. Wang, Z. Liang *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
- 18 Fu Jianguo, Liang Zhongzhu, Liang Jingqiu. Analysis of diffraction in Fourier-transform infrared spectrometer based on step mirrors [J]. Spectrosc. & Spectral Anal., 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

栏目编辑:谢 婧