

中波红外微型静态傅里叶变换光谱仪的设计与分析

王洪亮 吕金光 梁静秋 梁中翥 秦余欣 王维彪

Design and analysis of medium wave infrared miniature static Fourier transform spectrometer

Wang Hong-Liang Lü Jin-Guang Liang Jing-Qiu Liang Zhong-Zhu Qin Yu-Xin Wang Wei-Biao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 060702 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172599

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172599>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[准直系统热光学效应对静态傅里叶变换红外光谱仪光谱复原的影响研究](#)

Influence on the recovered spectrum caused by thermal optics effect of the collimation lens used in static Fourier transform infrared spectrometer

物理学报.2015, 64(13): 130703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130703>

[时空联合调制成像光谱仪前置成像系统分析与设计](#)

Design and analysis for the front imaging optical system of the spatiotemporal mixed modulated Fourier transform imaging spectrometer

物理学报.2014, 63(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100701>

[多级反射镜阵列 Monte Carlo 法误差合成与统计分析](#)

Error synthesis and statistical analysis on stepped mirror array by Monte Carlo method

物理学报.2012, 61(22): 220701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.220701>

[空间调制傅里叶变换光谱仪分束器色散特性研究](#)

Study on chromatic dispersion of beam splitter in spatially modulated Fourier transform spectrometer

物理学报.2012, 61(14): 140702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.140702>

[窄带傅里叶变换光谱仪中平稳高斯噪声的理论分析](#)

Theoretical analysis on stationary Gaussian random noise in narrowband Fourier transform spectrometer

物理学报.2012, 61(7): 070704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.070704>

中波红外微型静态傅里叶变换光谱仪的设计与分析*

王洪亮¹⁾²⁾ 吕金光¹⁾ 梁静秋^{1)†} 梁中翥^{1)‡} 秦余欣¹⁾ 王维彪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, 长春 130033)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年12月6日收到; 2017年12月30日收到修改稿)

提出一种基于微光学元件的空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪, 通过引入红外微结构衍射光学元件、多级微反射镜和微透镜阵列, 实现仪器的微型化. 介绍了微型傅里叶变换红外光谱仪的结构及基本原理, 分析了微型准直系统和聚焦耦合光学系统的设计理论, 研究了单片折衍混合准直透镜的残存像差、衍射面的衍射效率、多级微反射镜的衍射、微透镜阵列的孔径衍射和中继系统的轴向装配误差对光谱复原的影响. 最后, 对中波红外微型傅里叶变换光谱仪进行了建模仿真, 得到的复原光谱与理想的光谱曲线比较符合, 实际的光谱复原误差为2.89%. 该中波红外微型静态傅里叶变换光谱仪无可动部件, 且采用了微光学元件取代了传统的红外镜头, 不仅稳定性良好, 而且体积小、重量轻, 有利于在线监测应用.

关键词: 中波红外傅里叶变换光谱仪, 衍射微结构, 微透镜阵列

PACS: 07.57.Ty, 42.15.Eq

DOI: 10.7498/aps.67.20172599

1 引言

傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱仪能够实现了对固体、液体、气体的定性和定量分析, 还能够实现对弱辐射物体的探测, 因此被广泛应用于许多领域^[1-11]. 随着医疗分析检测、气象或资源探测、军事地物侦察分析以及反恐防化等领域需求的不断增长, 传统的时间调制型 FTIR 光谱仪由于含有可动部件, 结构较为复杂, 体积较大, 对运输及使用环境要求较高, 使其在在线监测等方面的应用受到一定限制. 为了解决这一问题, 静态 FTIR 光谱仪引起了人们的关注^[12-16].

基于多级微反射镜干涉系统的轻小型 FTIR 光谱仪, 采用两个正交放置的阶梯结构取代时间

调制型 FTIR 光谱仪干涉系统的动镜机构, 实现了 FTIR 光谱仪的静态化, 并简化了仪器结构, 在仪器的体积和重量方面均得到显著改善^[17-19]. 在该仪器中, 由点光源转换为入射干涉系统的平行光束的调制过程以及将带有干涉信息的调制光束耦合至探测器的过程, 分别由多片传统的红外光学镜片组成的镜头实现. 与微型化的干涉系统相比, 这些镜头的体积和重量过大, 极大地限制了该仪器的微型化进程. 随着红外材料微加工技术水平的不断提高, 使得采用红外微结构光学元件取代传统的折射式光学系统成为可能.

本文研究了一种以微光学元件构建的微型 FTIR 光谱仪, 提出采用微加工技术制作的单片折衍混合透镜以及微透镜阵列, 分别实现多片传统光

* 国家自然科学基金 (批准号: 61575193, 61627819, 61376122, 6173000222, 61727818)、吉林省科技发展计划 (批准号: 20170204077GX, 20150204072GX, 20150520101JH, 20150101049JC) 和中国科学院创新促进会基金 (批准号: 2014193) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn

学折射透镜的准直和聚焦耦合功能, 使光谱仪器在实现干涉系统的静态化的同时, 也实现整体系统的微型化. 通过优化单片折衍混合透镜的光焦度, 均衡了准直系统的球差和色差, 并基于像差理论分析了折衍混合透镜的残余像差、衍射面的衍射效率以及多级微反射镜的衍射效应对光谱复原的影响. 利用微透镜阵列的消畸变特性, 设计了微型聚焦耦合光学系统, 并分析了微透镜的孔径衍射对光谱复原的影响. 最后借助光学分析软件对 FTIR 光谱仪整体系统进行了建模仿真, 得到了干涉图和复原光谱.

2 系统的工作原理

图 1 是空间调制型的 FTIR 光谱仪原理图, 它基于迈克耳孙干涉原理, 由多级微反射镜产生光程差, 阶梯高度满足奈奎斯特采样定理, 大小多级微反射镜之间满足光程差互补原则.

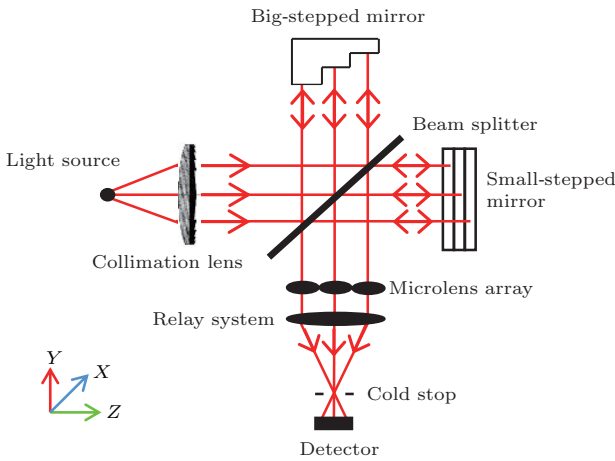


图 1 空间调制型 FTIR 光谱仪的结构示意图

Fig. 1. Schematic structure of the spatial modulation FTIR spectrometer.

FTIR 光谱仪的工作原理是: 光源经单片折衍混合透镜准直后, 经分束系统, 分别入射到两个正交放置的多级微反射镜上, 实现光程差的空间调制, 再经过微透镜阵列和中继成像系统组成的后置光学系统在探测器的靶面上获得干涉图.

单片折衍混合准直透镜利用衍射光学元件的负色散特性、消像差特性和多自由度的特点, 与正色散特性的折射元件相结合, 消除色差的同时也校正了像差, 从而使光束达到良好的准直性能. 微透镜阵列的作用是在其焦面上获得无畸变的干涉图, 中继成像系统的作用是将微透镜阵列焦面的图像

成像到探测器上, 同时实现冷光阑的匹配. 最终在探测器上获得干涉图强度满足以下的关系式:

$$I(n_1, n_2) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) \exp[j2\pi\nu\delta(n_1, n_2)] d\nu, \quad (1)$$

式中 n_1, n_2 分别是大小多级微反射镜的阶梯序数; $B(\nu)$ 是光的功率谱密度; ν 是入射光波数; $\delta(n_1, n_2) = 2d(n_s \cdot n_1, n_2)$ 是大小多级微反射镜对应区域产生的光程差, 其中 n_s 为台阶数, $2d$ 是光程采样间隔.

对 (1) 式做傅里叶变换即可得目标物体的离散光谱:

$$B(\nu_n) = \sum_{l=-n}^{h^2} I(l) \exp\left(-j\frac{2\pi nl}{h^2}\right)$$

$$n = 0, 1, \dots, h^2 - 1,$$

$$l = -n, \dots, 0, \dots, h^2 - n, \quad (2)$$

式中 h^2 是多级微反射镜将入射光所分的份数, $\nu_n = n/(h^2 \cdot 2d)$ 是离散波数.

3 微型准直系统分析与设计

准直系统采用单片折衍混合透镜, 不仅实现了准直系统的微型化, 同时也可以消除色差. 根据设计要求, 准直系统焦距定为 120 mm, 半视场角为 0.7162° , 计算了单片折衍混合透镜初始结构并针对其存在的问题进行了分析和优化. 为了实现高精度的光谱测量, 分析了准直系统的残存像差对光谱复原的影响; 鉴于红外波段波长与系统微结构的尺度关系, 分析了衍射面的衍射效率对光谱复原的影响.

3.1 单片折衍混合透镜初始结构的求解

为了得到比较理想的初始结构, 对传统光焦度分配公式^[20-23]进行了改进, 采用保留一定色差值的光焦度分配公式:

$$\Phi_r + \Phi_d = \Phi,$$

$$\frac{\Phi_r}{V_r} + \frac{\Phi_d}{V_d} = 1.3 \frac{D^2}{f_q^3}, \quad (3)$$

式中 Φ , Φ_r , Φ_d 分别为准直系统、折射面、衍射面的光焦度; V_r , V_d 分别为透射材料和衍射元件的阿贝数; $D = 50$ mm 为准直系统的入瞳直径; $f_q = 120$ mm 为准直系统焦距.

半口径为 r 的旋转对称衍射光学元件的相位函数可以表示为

$$p(r) = \frac{2\pi}{\lambda}(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots), \quad (4)$$

A_i 是相位系数. 其中 A_1 决定了衍射光学元件光焦度, 满足以下关系式:

$$A_1 = -\frac{\Phi_d \cdot \lambda_0}{2m\lambda}, \quad (5)$$

式中 m 是衍射级次取 $m = 1$; $\lambda = 4.0 \mu\text{m}$ 是系统设计的中心波长; λ 是工作波长.

单透镜采用铬材料, 利用 (3)—(5) 式可得到改进光焦度分配方案下准直系统的初始结构参数如表 1.

表 1 改进型准直系统的初始结构参数
Table 1. Initial structural parameters of the improved collimation system.

参数	数值
Φ_d/mm^{-1}	0.0010
Φ_r/mm^{-1}	0.0073
A_1	-5.1577×10^{-4}

根据初始结构参数计算, 其波像差可表示为

$$w = 3.07\rho^2 - 1.87\rho^4, \quad (6)$$

式中 ρ 是光瞳半径. 利用菲涅耳衍射光波传递理论, 可得到位于微透镜阵列前表面上的接受屏上的光强分布, 对其傅里叶变换即可得到光谱. 图 2(a) 是不考虑多级微反射镜衍射效应的理想复原光谱. 采用传统光焦度分配方案求解的初始结构, 接受屏上的光强分布受其波像差调制, 对其傅里叶变换即可得到光谱, 如图 2(b). 采用改进后的光焦度分配方案, 其对应的复原光谱如图 2(c).

从图 2 可以看出: 在相同的设计参数要求下, 采用传统光焦度分配方案求解的初始结构(图 2(b)), 其复原的光谱出现了明显虚假的光谱信号, 与理想光谱(图 2(a)) 有较大的差异; 而改进型光焦度分配方案求解的初始结构(图 2(c)) 相比于传统方法求解的初始结构有了很大的改进, 是较好的初始结构.

对求解的初始结构进行优化, 优化后单片折衍混合透镜光线追迹图如图 3. 优化后单片折衍混合透镜的结构参数如表 2, 衍射面的微结构轮廓参数如表 3, 对应其轴向色差曲线和调制传递函数如图 4 和图 5.

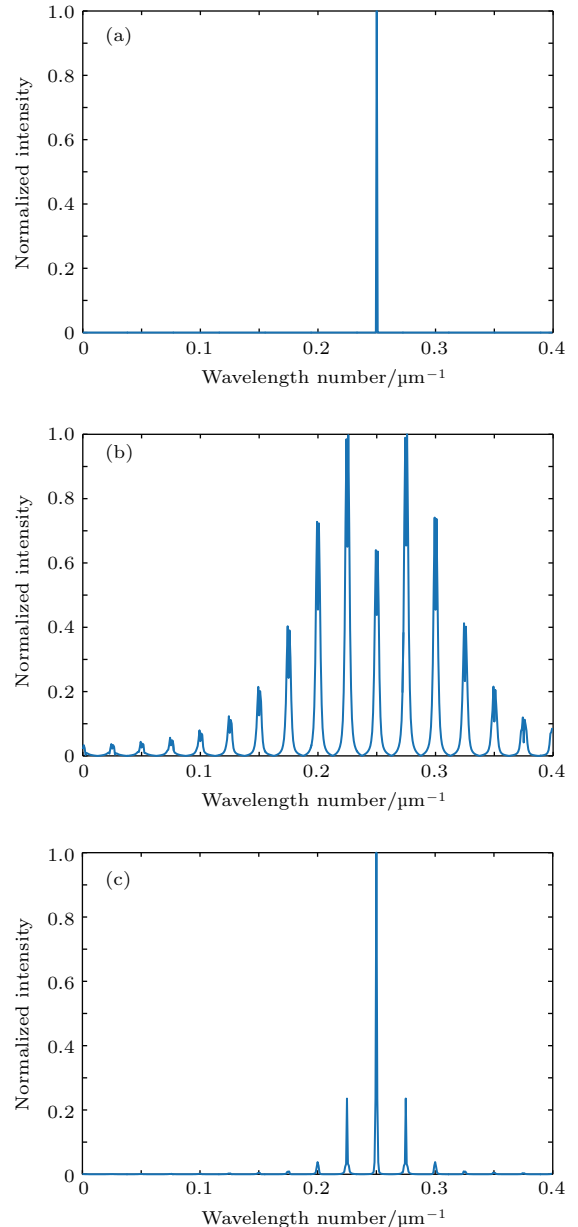


图 2 (a) 平面波入射时复原的理想光谱; (b) 传统光焦度分配下的复原光谱; (c) 改进光焦度分配下的复原光谱
Fig. 2. (a) Ideal recovery spectrum with plane wave incident; (b) reconstruction spectrum with traditional power distribution; (c) reconstruction spectrum with improved power distribution.

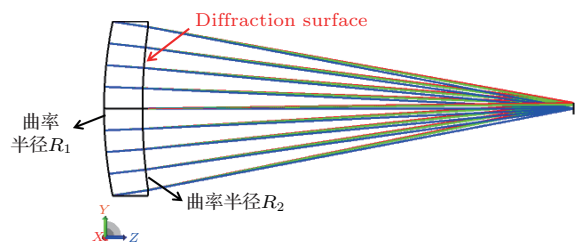


图 3 折衍混合单透镜光线追迹图
Fig. 3. The structure of refractive diffractive hybrid singlets.

表2 优化后准直系统的结构参数

Table 2. Structural parameters of the optimized pre-collimation system.

参数	数值
工作波段/ μm	3.7—4.8
R_1/mm	113.746
R_2/mm	153.414
透镜厚度/ mm	10
焦距/ mm	120
A_1	-80.87
A_2	16.535
衍射微结构的最大矢高 $s/\mu\text{m}$	1.32

表3 衍射面的微结构轮廓数据

Table 3. Microstructural contour data of diffraction surface

环带数	环带半径/ mm	环带数	环带半径/ mm
1	7.025	6	18.060
2	10.021	7	19.737
3	12.384	8	21.371
4	14.438	9	22.986
5	16.307	10	24.608

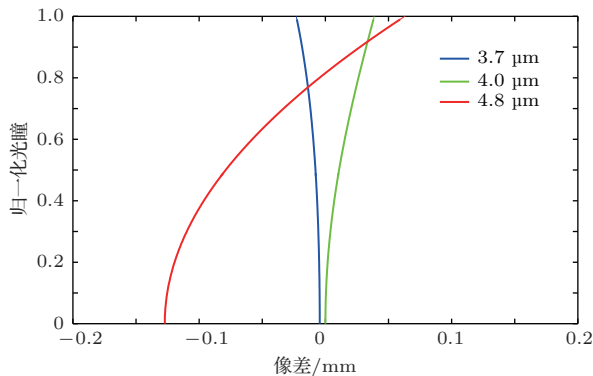


图4 轴向像差曲线图

Fig. 4. Axial aberration curves.

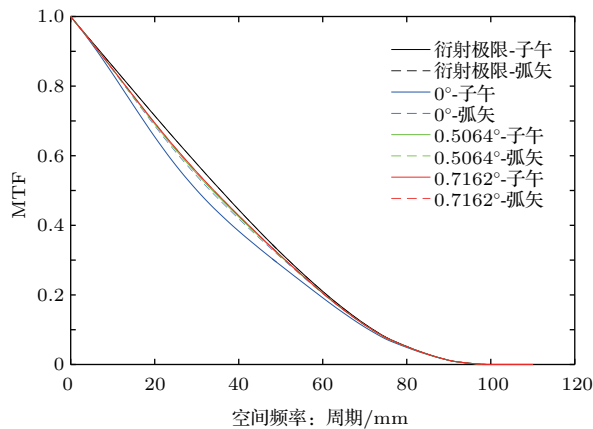


图5 准直系统的调制传递函数

Fig. 5. Modulation transfer function of the collimation system.

从图4和图5可以看出准直系统成像质量较好, 各视场的调制传递函数比较接近衍射极限, 色差在0.707孔径处得到很好地校正, 但系统还存在少量的残余像差.

3.2 系统残存像差对光谱复原的影响

根据波像差理论, 优化后准直系统的波前可以表示为

$$w = w_{020}\rho^2 + w_{040}\rho^4 + w_{222}p^2\rho^2 \cos^2\varphi, \quad (7)$$

式中 $w_{020} = -1.96$, $w_{040} = 1.23$, $w_{222} = 0.086$ 分别是离焦、球差、慧差; p 是与视场有关的光瞳坐标, ρ 是光瞳半径, φ 是光瞳角坐标. 对其复原光谱的结果如图6.

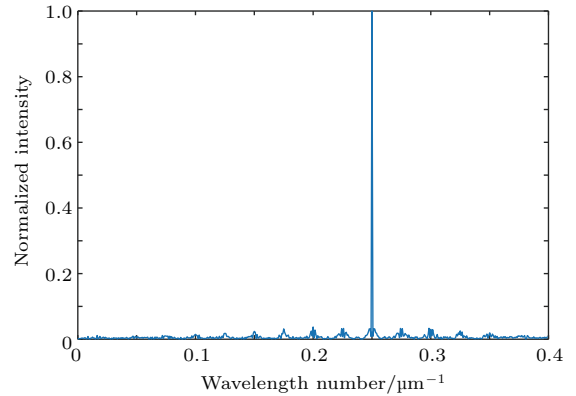


图6 准直系统波前入射时的复原光谱图

Fig. 6. Reconstruction spectrum with collimation system wavefront.

比较图6和图2(b)可以发现, 优化后的准直系统像差对光谱复原的影响较小, 满足仪器需求.

3.3 衍射面的衍射效率对光谱复原的影响

当光线以角度 θ 入射到衍射面时, 其衍射效率满足以下的关系式:

$$\eta(\lambda, \theta) = \text{sinc}^2 \left[1 - \frac{s}{\lambda} \left(\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2\theta} - \cos\theta \right) \right], \quad (8)$$

其中 $s = 0.0013 \mu\text{m}$, 是衍射微结构的最大矢高, $n(\lambda)$ 是材料的折射率, θ 是视场角. 对于本设计的红外材料锗而言, 满足 Sellmerier 色散公式:

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}, \quad (9)$$

式中 A, B, C, D, E 是材料折射率色散系数. 当入射角度 θ 为 0° 时, 其衍射效率随波长的变化如图7.

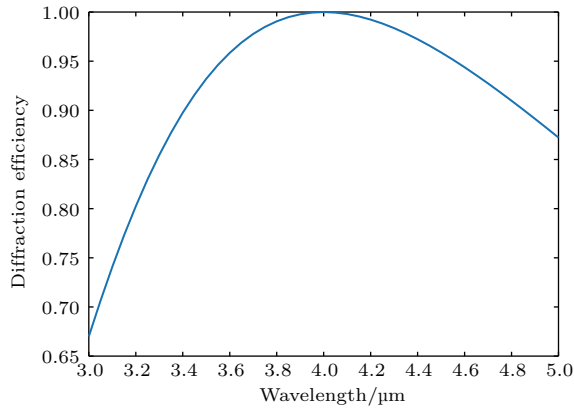


图7 衍射面的衍射效率随波长的变化

Fig. 7. Diffraction efficiency of diffractive surface with wavelength.

由图7可见,不同波长处的衍射效率不同,将衍射光学元件引入到FTIR光谱仪中,需要考虑对复原光谱的影响.因此需要对(2)式进行修正,修正后的表达式如下:

$$B_{\text{real}}(\nu_n) = \sum_{l=-n}^{n^2} I(l) \cdot \eta(\nu) \exp\left(-j \frac{2\pi n l}{h^2}\right). \quad (10)$$

为了便于表达实际复原的光谱和理想的光复原谱之间的差别,定义光谱误差如下:

$$EOS = B_{\text{real}}(\nu_n) - B(\nu_n), \quad (11)$$

当连续光源入射到含有衍射面的FTIR光谱仪时,复原光谱误差如图8.从图8可以看出,随着波长远离中心波长,光谱复原误差越来越大.在衍射面上镀增透膜可以有效减少当波长偏离设计波长时的光谱复原误差.在本文FTIR光谱仪系统的

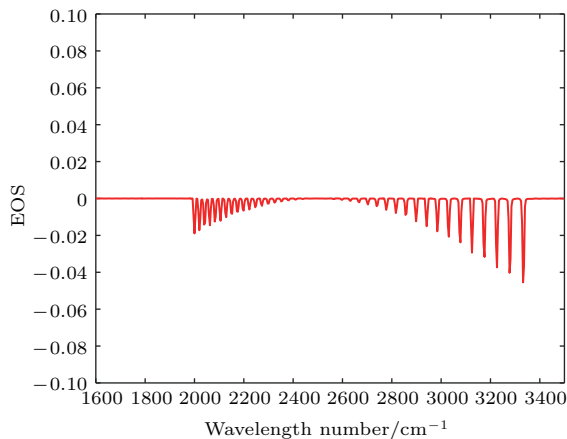


图8 光谱复原误差

Fig. 8. The error of spectral recovery.

3.7—4.8 μm 工作波段内,衍射面的衍射效率均高于90%,因此镀普通的红外增透膜即可解决此问题^[24].当系统工作在更宽的波段时,则需要设计特殊的增透膜系.

4 阶梯反射面的衍射对光谱复原的影响

微型静态干涉系统是由两个正交放置的大小阶梯多级微反射镜构成其中大小多级微反射镜的子反射面宽度 w 均为1 mm,子反射面的长度为32 mm,小阶梯高度 d 为0.625 μm ,大阶梯的高度为20 μm .为了只分析阶梯反射面的衍射对光谱复原的影响,对多级微反射镜到微透镜阵列的前表面的传播光场进行了建模.

多级微反射镜子反射面的宽度 $w > 10\lambda_0$ ^[25]($\lambda_0 = 4 \mu\text{m}$ 是中心设计波长)所以衍射仍属于标量衍射理论领域.根据菲涅耳衍射理论,接收屏上的复振幅分布为

$$U(x, y, z, \lambda) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{\frac{jk}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{\Sigma} \left[U(\xi, \eta) e^{\frac{jk}{2z}(\xi^2+\eta^2)} \right] \times e^{-\frac{jk}{z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta, \quad (12)$$

式中 x, y, z 是接收屏上的坐标; ξ, η 是衍射屏上的坐标; k 是波数.

由于矩形尺寸的子反射镜只在宽度维度上有衍射,故可以等效为单缝衍射,当单色光源入射时,大小多级微反射镜衍射对应的接收屏上光场复振幅可以表示为

$$U(x, z, \lambda) = U_s(x, y_s, \lambda) + U_b(z, y_b, \lambda), \quad (13)$$

$$U_s(x, y_s, \lambda) = \sum_{n_2=0}^{n_s} \sum_{n_1=0}^{n_s} \exp[jk(n_s \cdot n_2 \cdot d + y_{sn_1} - y_0 + n_1 \cdot d)] \times U_s(x + n_s \cdot n_2 \cdot w + n_1 \cdot w, y_{sn_1} + n_s \cdot n_2 \cdot d + n_1 \cdot d, \lambda), \quad (14)$$

$$U_b(z, y_b, \lambda) = \sum_{n_2=0}^{n_s} \sum_{n_1=0}^{n_s} \exp[jk(n_2 \cdot d + y_{bn_2} - y_0 + n_1 \cdot n_s \cdot d)] \times U_s(z + n_s \cdot n_1 \cdot w + w \cdot n_2, y_{bn_2} + n_s \cdot n_1 \cdot d + d \cdot n_2, \lambda), \quad (15)$$

式中 U_b, U_s 分别是大小多级微反射镜的衍射对接收屏上光场的贡献; y_0 是参考距离; y_{sn2}, y_{sn1} 分别是大小阶梯多级微反射镜距离接收屏的距离.

当连续光源入射时, 对 (13) 式在工作波段 ($\lambda_{short}, \lambda_{long}$) 内积分, 即可得到连续光源入射时接收屏上的光场复振幅分布 U_{lx} :

$$U_{lx}(x, z) = \int_{\lambda_{short}}^{\lambda_{long}} U(x, z, \lambda) d\lambda. \quad (16)$$

对 (16) 式积分可得到接收屏上干涉图的强度分布:

$$I = \iint U_{lx}(x, z) \cdot U_{lx}^*(x, z) dx dz, \quad (17)$$

式中 U_{lx}^* 表示 U_{lx} 的共轭. 对 (17) 式做离散傅里叶变换即可得到受衍射影响的光谱图.

当 $y_0 = 40 \text{ mm}$, 波数为 $0.25 \mu\text{m}^{-1}$ 的单色光源入射时, 根据 (12)—(17) 式, 通过数值计算得到衍射受限的复原光谱, 如图 9.

比较图 9 和图 2(a) 可以看出, 当阶梯反射面的尺寸为 1 mm 时, 阶梯反射面的衍射并没有对光谱复原造成影响. 从高建华等 [19] 实验复原的光谱和样品的光谱相符合也证明了阶梯反射面的衍射并没有对光谱复原造成影响.

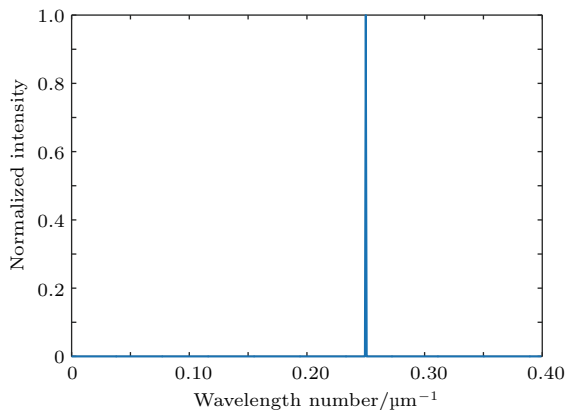


图 9 衍射受限的复原光谱
Fig. 9. Diffraction limited recovery spectrum.

5 微型聚焦耦合光学系统分析与设计

聚焦耦合光学系统由微透镜阵列和中继系统构成, 由微透镜阵列在其焦面获得无畸变的干涉图, 再由中继系统将干涉图成像在探测器上同时实现冷光阑匹配.

5.1 微透镜阵列

为保证相邻小透镜焦面的强度图不重合, 要求小透镜焦距 f_x 满足以下的关系:

$$f_x \leq \frac{\alpha}{2 \cdot \tan \theta} = 39.998 \text{ mm}, \quad (18)$$

式中 $\alpha = 1 \text{ mm}$, 是相邻的小透镜之间的间隔.

计算得到的微透镜阵列的参数如表 4, 图 10 为微透镜阵列的结构图, 优化后的微透镜调制传递函数如图 11.

表 4 微透镜参数
Table 4. Micro-lens parameters.

参数	数值
F 数	16.287
半视场角/rad	0.0125
波长/ μm	3.7—4.8
焦距/mm	23.0293
方形口径/mm	1×1
微透镜厚度/mm	0.5

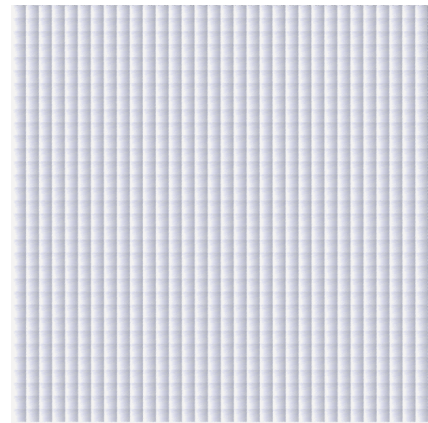


图 10 微透镜阵列的结构图
Fig. 10. Microlens array structure.

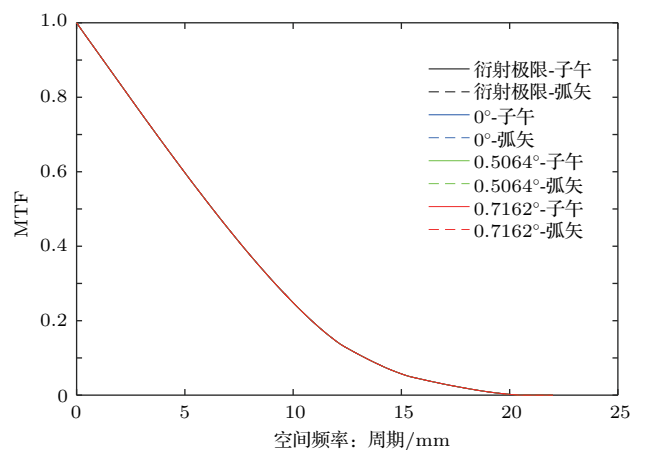


图 11 微透镜的调制传递函数
Fig. 11. Modulation transfer function of microlenses.

从图 11 可知微透镜各视场调制传递函数均接近衍射极限, 成像质量满足仪器设计要求.

5.2 微透镜阵列的孔径衍射对光谱复原的影响

为了分析微透镜阵列的孔径衍射对光谱复原的影响,对传播光场进行了建模.由于中继系统作用是将微透镜阵列焦面上的干涉像点阵列成像在探测器上,并未对光谱复原造成影响,所以这里只对从多级微反射镜到微透镜阵列的焦平面的传播光场进行建模.

准直光经大小多级微反射镜调制和空间光场自由传播,以 $U_{lx}(x, z)$ 入射到微透镜阵列,微透镜阵列对入射到其上的光场透射并在其焦面上获得干涉图像.根据标量衍射理论,微透镜阵列焦面上干涉图像的强度分布可以表示为

$$I = |F^{-1}\{F[U_{lx}(x, z)] * T(f_x, f_z)H_{len}(f_x, f_z)\}|^2, \quad (19)$$

式中 $H_{len}(f_x, f_z)$ 和 $T(f_x, f_z)$ 分别是微透镜的 Fresnel 传递函数^[26]和微透镜阵列的空间频谱,它们的函数形式如下:

$$\begin{aligned} H_{len}(f_x, f_z) &= \exp(j2\pi\gamma f) \exp[-j\pi\lambda f(f_x^2 + f_z^2)], \\ T(f_x, f_z) &= -j\lambda f k^2 w^4 \{ \exp[j\pi\lambda f(f_x^2 + f_z^2)] \\ &\quad * [\text{sinc}(wf_x)\text{sinc}(wf_z)] \} \\ &\quad \times \{ \text{comb}(wf_x)\text{comb}(wf_z) \} \\ &\quad \times \exp[-j\pi w f(f_x^2 + f_z^2)] \\ &\quad * [\text{sinc}(kwf_x)\text{sinc}(kwf_z)]. \end{aligned} \quad (20)$$

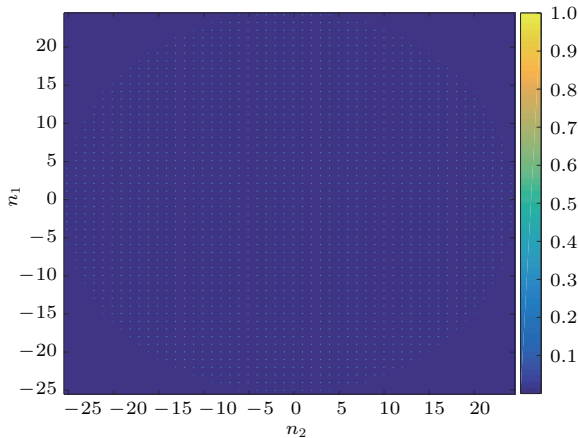


图 12 干涉像点阵列的光强分布

Fig. 12. Intensity distribution of an interferometric image point array.

将(16), (20)式代入(19)式,当入射光源为 $4 \mu\text{m}$ 的单色光源,根据系统的设计参数,便可以得

到微透镜阵列焦面上的干涉强度分布,如图 12.将干涉点阵列和光程差匹配后,对其做离散傅里叶变换便可得入射光波的复原光谱,如图 13.

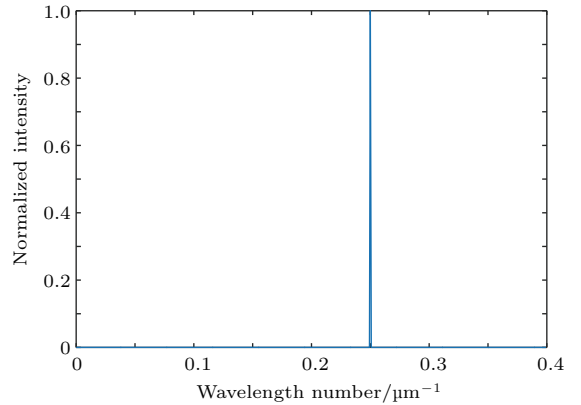


图 13 干涉像点阵列对应的复原光谱

Fig. 13. Recovery spectrum corresponding to an interferometric image point array.

比较图 13 和图 2(a) 可以发现,微透镜阵列的孔径衍射并没有对复原光谱造成影响,满足仪器的使用要求.

5.3 中继成像系统

由于系统采用像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$,像元数为 320×256 的制冷型碲镉汞面阵探测器,为保证微型后置光学系统的成像质量,要求中继系统的孔径光阑与探测器的冷光阑重合,以实现 100% 冷光阑效率;中继成像系统的物方数值孔径应和微透镜阵列的像方数值孔径相等,且中继成像系统的光斑半径尺寸应小于 $120 \mu\text{m}$.

根据以上要求进行设计,完成的中继系统光线追迹图如图 14.中继系统的物方数值孔径为 0.0307,缩放倍率为 0.24,完成了中继系统的孔径光阑和探测器的冷光阑重合,物方远心度大于 10^5 ,点列图 RMS 值小于 $57 \mu\text{m}$ (图 15),满足中继系统的设计要求.

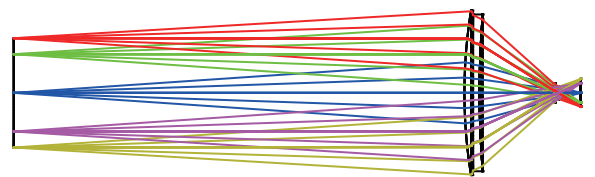


图 14 中继系统光线追迹图

Fig. 14. The structure of relay system.

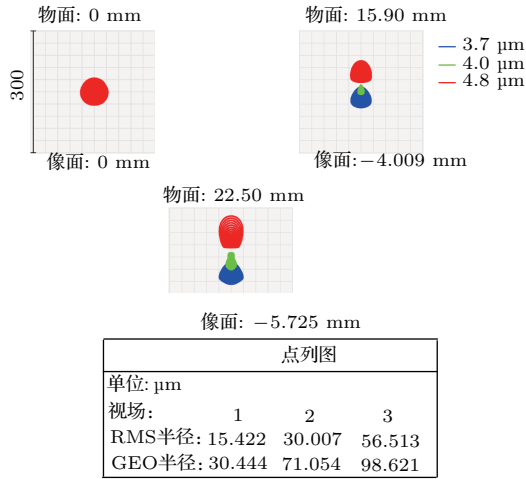


图 15 中继系统的点列图

Fig. 15. The spot diagram of relay system.

5.4 微型聚焦耦合光学系统仿真分析

为了验证微型聚焦耦合光学系统设计的正确性, 将分别设计的微透镜阵列和中继系统导入光学分析软件进行建模仿真. 聚焦耦合光学系统光线追迹图如图 16 所示, 图 17 为像面的光强分布图. 可以看出相邻微透镜的强度之间没有重叠, 后置光学系统的设计满足设计要求.

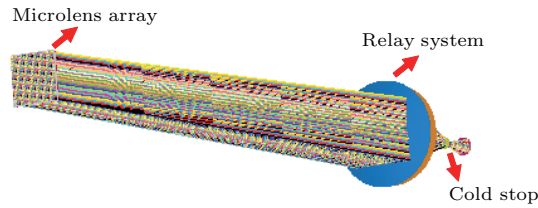


图 16 聚焦耦合光学系统光线追迹图

Fig. 16. Optical ray tracing of focusing coupled optical system.

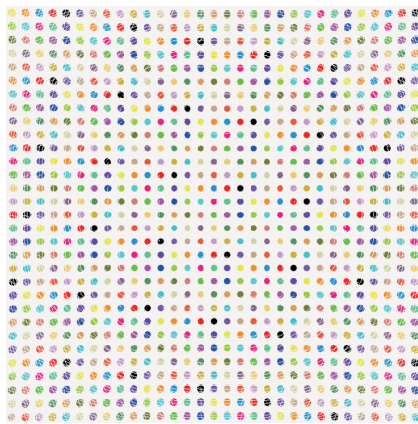


图 17 聚焦耦合光学系统像面强度分布

Fig. 17. Intensity distribution of the focusing coupled optical system in the image plane.

5.5 微型聚焦耦合光学系统的装配误差分析

在实际的装配过程中, 中继系统的物面和微透镜阵列的焦面之间会存在装配误差, 即中继系统的物面相对微透镜阵列的焦面有位移, 设位移量为 Δx .

从图 18 可以看出, 当位移 Δx 大于一定的距离时, 微透镜阵列的不同通道之间的干涉图发生混叠, 混叠程度随着 Δx 的增加而增大.

图 19 是当 $\Delta x = 5 \text{ mm}$ 时, 混叠的干涉图对应的光谱图. 从图 19 可以看出, 同理想的复原光谱图 2(a) 相比, 当干涉强度发生混叠时, 会对光谱复原产生影响. 为了消除干涉强度的混叠对光谱复原的影响, 要求 Δx 满足以下要求:

$$\Delta x \leq \frac{f_x(\alpha - 2f_x \cdot \tan \theta)}{2f_x \cdot \tan \theta + 4}, \quad (21)$$

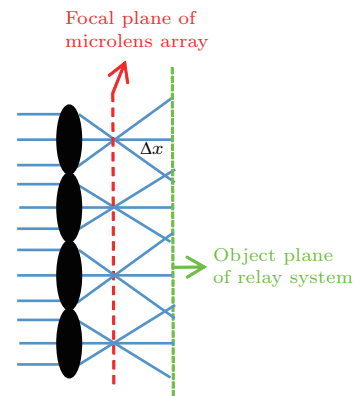


图 18 中继系统的物面相对微透镜阵列焦面的位置

Fig. 18. Position of the object plane of the relay system relative to the focal plane of the microlens array.

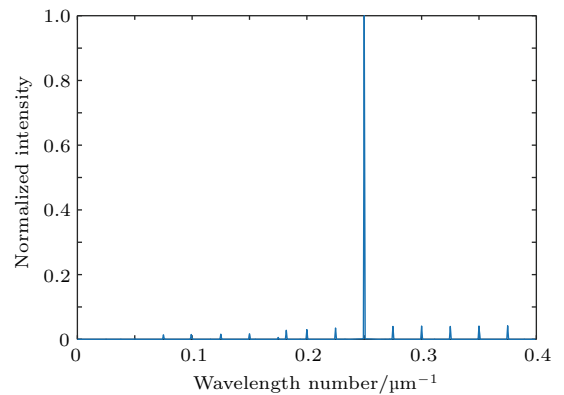


图 19 干涉图混叠的复原光谱

Fig. 19. Recovery spectrum of the aliasing interference diagram.

代入数值, 得到 $\Delta x \leq 2.136 \text{ mm}$, 即当中继系统的物面相对微透镜阵列焦面的位移误差 $\Delta x \leq 2.136 \text{ mm}$ 时, 对光谱复原的影响可以忽略.

6 FTIR 光谱仪系统的建模仿真

利用光学仿真分析软件对 FTIR 光谱仪系统进行建模仿真, 对设计结果进行验证. 光源使用波数为 $0.2083, 0.2381, 0.25 \mu\text{m}^{-1}$ 的离散光源. 当系统仅存在两个正交的多级阶梯微反射镜时, 对其进行建模仿真, 得到理想的干涉图和复原光谱, 如图 20 和图 21. 当加入微型准直和聚焦耦合光学系统, 对 FTIR 光谱仪整体系统进行建模仿真, 其光线追迹图如图 22 所示, 干涉图和复原光谱如图 23 和图 24.

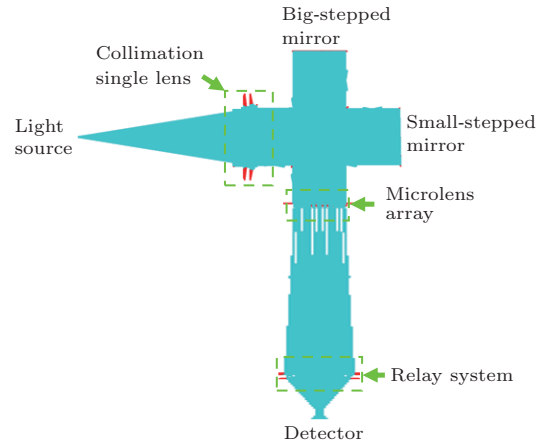


图 22 FTIR 光谱仪系统光线追迹图

Fig. 22. Ray trace diagram of FTIR spectrometer.

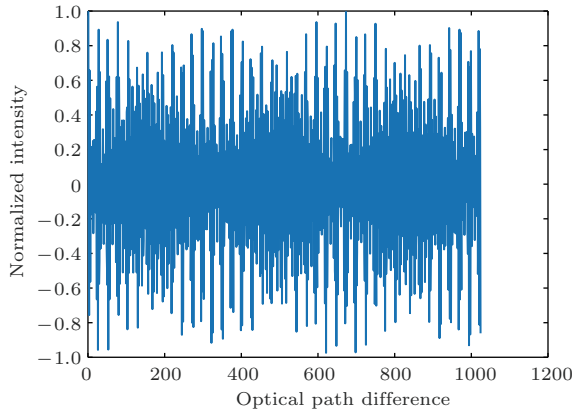


图 20 理想干涉图

Fig. 20. Ideal interference diagram.

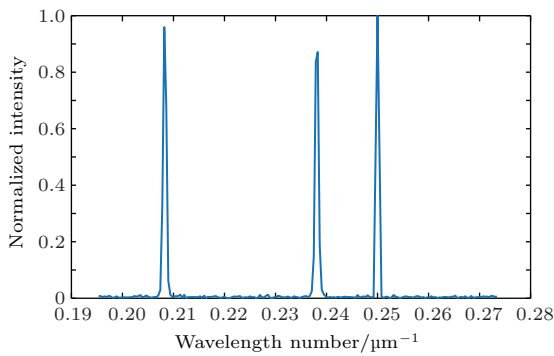


图 21 理想复原光谱

Fig. 21. Ideal recovery spectrum.

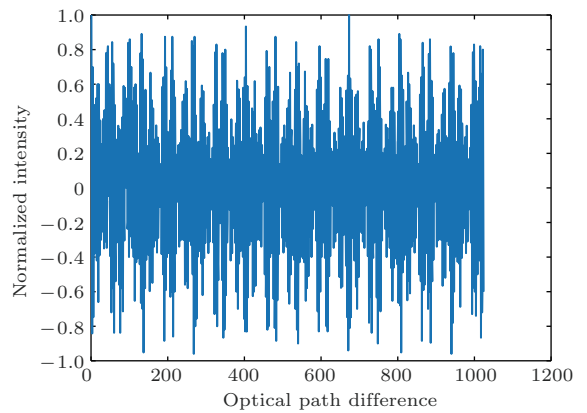


图 23 实际的干涉图

Fig. 23. Actual interference diagram.

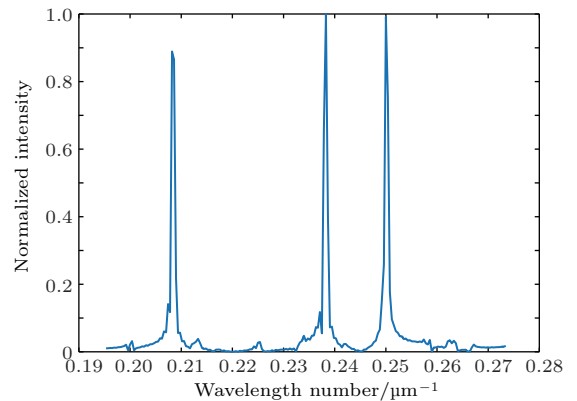


图 24 实际的复原光谱图

Fig. 24. Actual recovery spectrum.

从图 23 可以看出, 与理想的复原光谱相比, 实际的复原光谱存在一定的噪声. 根据 (11) 式, 可得复原光谱误差 $EOS = 2.89\%$, 能够满足 FTIR 光谱仪的使用需求.

7 结 论

本文提出了一种基于微光学元件的微型 FTIR 光谱仪, 并对微型准直和聚焦耦合光学系统进行

了设计与分析. 采用改进的光焦度分配方式, 设计了满足FTIR光谱仪需求的单透镜折衍混合准直系统, 分析了衍射面的衍射效率对光谱复原的影响, 并给出了相应的解决方案. 设计了由微透镜阵列和两片式中继系统组成的微型三片式聚焦耦合光学系统, 并对多级微反射镜的衍射、微透镜阵列的孔径衍射对复原光谱的影响以及微透镜阵列和中继系统的轴向装配误差进行了分析. 最后借助光学仿真软件对整体系统进行了建模仿真, 仿真结果表明仪器可以满足FTIR光谱仪的应用需求. 该光学系统的设计方法也为微型化、轻量化的FTIR光谱仪提供了一种新的设计思路.

参考文献

- [1] Cai Q S, Huang M, Han W, Cong L X, Lu X N 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 160702 (in Chinese) [才放胜, 黄旻, 韩炜, 丛麟骁, 路向宁 2017 物理学报 **66** 160702]
- [2] Shan C G, Wang W, Liu C, Xu X W, Sun Y W, Tian Y, Liu W Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 220204 (in Chinese) [单昌功, 王薇刘诚, 徐兴伟, 孙友文, 田园, 刘文清 2017 物理学报 **66** 220204]
- [3] Yu H, Zhang R, Li K W, Xue R, Wang Z B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 054201 (in Chinese) [于慧, 张瑞, 李克武, 薛锐, 王志斌 2017 物理学报 **66** 054201]
- [4] Wu M, Cui L, Wang G, Ling X F, Zhao H M, Xu Z 2017 *Spectrosc. Spec. Anal.* **37** 733 (in Chinese) [吴敏, 崔龙, 王港, 凌晓锋, 赵红梅, 徐智 2017 光谱学与光谱分析 **37** 733]
- [5] Podmore H, Scott A, Cheben P, Velasco A V, Schmid J H, Vachon M, Lee R 2017 *Opt. Lett.* **42** 1440
- [6] Nie X, Ryckeboer E, Roelkens G, Baets R 2017 *Opt. Express* **25** A409
- [7] Akca B 2017 *Opt. Express* **25** 1487
- [8] Watanabe A, Furukawa H 2018 *Opt. Commun.* **413** 8
- [9] Rutkowski L, Johansson A C, Zhao G, Hausmaninger T, Khodabakhsh A, Axner O, Foltynowicz A 2017 *Opt. Express* **25** 21711
- [10] Talghader J J, Gawarikar A S, Shea R P 2012 *Light-Sci. Appl.* **1** e24
- [11] Gross K C, Bradley K C, Perram G P 2010 *Environ. Sci. Technol.* **44** 9390
- [12] Yin X H, Steinle T, Huang L L, Taubner T, Wutting M, Zentgraf T, Giessen H 2017 *Light-Sci. Appl.* **6** e17016
- [13] Hegyi A 2017 *Opt. Express* **25** 17402
- [14] Shtanko A E, Kalenkov G S, Kalenkov S G 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** B49
- [15] Wang W, Samuelson S R, Chen J, Xie H 2015 *IEEE Photon. Technol.* **27** 1418
- [16] Hook S J, Kahle A B 1996 *Remote Sens. Environ.* **56** 172
- [17] Kong Y M, Liang J Q, Wang B, Liang Z Z, Xu D W, Zhang J 2009 *Spectrosc. Spec. Anal.* **29** 1142 (in Chinese) [孔延梅, 梁静秋, 王波, 梁中燾, 徐大伟, 张军 2009 光谱学与光谱分析 **29** 1142]
- [18] Fu J G, Liang J Q, Liang Z Z 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 266 (in Chinese) [付建国, 梁静秋, 梁中燾 2012 光学学报 **32** 266]
- [19] Gao J H, Liang Z Z, Liang J Q, Wang W B, Lü J G, Qin Y X 2017 *Appl. Spectrosc.* **71** 1348
- [20] Davidson N, Friesem A A, Hasman E 1993 *Appl. Opt.* **32** 4770
- [21] Wood A P 1992 *Appl. Opt.* **31** 2253
- [22] Riedl M J 1996 *Appl. Opt.* **35** 6833
- [23] Zhang S Q, Zhou L Y, Xue C X, Wang L 2017 *Appl. Opt.* **56** 7442
- [24] Pan Y Q, Zhu C, Hang L X, Song J J 2004 *Laser Infrar.* **34** 372 (in Chinese) [潘永强, 朱昌, 杭凌侠, 宋俊杰 2004 激光与红外 **34** 372]
- [25] Yang G G 2008 *Micro-optics and System* (Zhejiang: Zhejiang University Press) pp15–20 (in Chinese) [杨国光 2008 微光学与系统 (浙江: 浙江大学出版社) 第15–20页]
- [26] Lü N G 2007 *Fourier Optics* (3rd Ed.) (Beijing: China Machine Press) pp89–112 (in Chinese) [吕乃光 2007 傅里叶光学 (第三版) (北京: 中国机械工业出版社) 第89–112页]

Design and analysis of medium wave infrared miniature static Fourier transform spectrometer*

Wang Hong-Liang¹⁾²⁾ Lü Jin-Guang¹⁾ Liang Jing-Qiu^{1)†} Liang Zhong-Zhu^{1)‡}
Qin Yu-Xin¹⁾ Wang Wei-Biao¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 6 December 2017; revised manuscript received 30 December 2017)

Abstract

This paper presents a spatial modulation Fourier transform micro-spectrometer based on micro-optical elements. The infrared microstructure diffractive optical elements, multi-step micro-mirrors and microlens array are introduced to realize the miniaturization of the instrument. In addition, the structure and basic principle of Fourier transform infrared micro-spectrometer are introduced. The design theory of micro-collimation system is analyzed based on the negative dispersion, the aberration correction and the arbitrary phase modulation characteristics of diffractive optical element. Combined with the characteristics of micro-static interference system, the micro-focusing coupled optical system is analyzed and designed. Based on the wave aberration theory and the Sellmeier dispersion formula, the influence of residual aberration on spectral recovery and the diffraction efficiency of diffraction surface in single-chip hybrid diffractive-refractive collimating lens are studied. The effects of diffraction of multi-stage micro-mirrors and the aperture diffraction of microlens array on spectral recovery are studied by using the scalar diffraction theory. Furthermore, the influence of axial assembly error of relay system on the whole system performance is studied. The results show that the diffraction efficiency of the diffraction surface, the diffraction of the multistage micro-mirror and the microlens array have no effect on the recovery spectrum when the working band of the system is 3.7–4.8 μm . Finally, in order to verify the accuracy of the system design results, an optical simulation software is used to simulate the infrared micro-Fourier transform spectrum. The accuracy of the system model is verified by the simulation that the reconstructed spectrum is in agreement with the ideal spectral curve and the actual spectral recovery error is 2.89%. The medium-wave infrared micro-static Fourier transform spectrometer has no movable parts and adopts micro-optics element to replace the traditional infrared lens. Therefore, it has the advantages of not only good stability, but also small size and light weight so that it is helpful in on-line monitoring applications and provides a new design idea about the micro-Fourier transform spectrometer.

Keywords: medium wave infrared Fourier transform spectrometer, diffraction microstructure, microlens array

PACS: 07.57.Ty, 42.15.Eq

DOI: [10.7498/aps.67.20172599](https://doi.org/10.7498/aps.67.20172599)

* Project supported by National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 61575193, 61627819, 61376122, 6173000222, 61727818), the Science and Technology Development Plan of Jilin Province, China (Grant Nos. 20170204077GX, 20150204072GX, 20150520101JH, 20150101049JC), and the State Key Laboratory of Applied Optics Independent Fund and Youth Innovation Promotion Association Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2014193).

† Corresponding author. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn