

微小型静态傅里叶变换红外光谱仪中复眼缩束系统的光学设计及仿真研究

陈 成^{1,2} 梁静秋¹ 梁中翥¹ 吕金光¹ 秦余欣¹ 田 超^{1,2} 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, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在以多级微反射镜为核心器件的静态傅里叶变换红外光谱仪中,基于传统单孔径透镜组结构的缩束系统由于口径较大、透镜数量较多和整体尺寸较长等原因,其体积和重量在整个光谱仪中占有很大的比重,严重制约了光谱仪的微小型化和轻量化进程。而复眼系统以其结构紧凑、体积小、重量轻等优点有助于解决这一问题。根据三维矩阵光学理论计算了由3个微透镜阵列组成的复眼缩束系统的初始结构参数,设计了消杂光光阑阵列,并使用光学设计软件对初始结构进行了优化。最后,借助光学分析软件,对光谱仪系统进行了干涉图和光谱复原理论分析,结果显示所设计的复眼缩束系统能满足光谱仪系统的应用要求。

关键词 光学设计; 红外光谱仪; 复眼; 矩阵光学

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1122002

Design and Analysis of the Expansion Compound Eye Used in Micro-Miniature Static Fourier Transform Infrared Spectrometer

Chen Cheng^{1,2} Liang Jingqiu¹ Liang Zhongzhu¹ Lü Jinguang¹

Qin Yuxin¹ Tian Chao^{1,2} Wang Weibiao¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract In a stepped-mirror-based static Fourier transform infrared spectrometer, the expansion lenses based on classical lenses has several lenses, large aperture and overall length, and its volume and mass have major proportion comparing to the whole system. That limits the development of micro-miniature and lightweight spectrometer seriously. However, compound eye is helpful to solve the problem because it has these advantages including of compact structure, smaller volume and lighter weight. In this paper, the structure parameters of compound eye consist of three microlens arrays are analyzed by the method of matrix formalism and optimized by optics design software, and the stop array for weaken the stray light is designed. Finally, the interferogram and the recovered spectrum of the spectrometer are obtained by the ray tracing software, and the result shows that the designed expansion compound eye can meet the application requirement of the spectrometer.

Key words optics design; infrared spectrometer; compound eye; matrix optics

OCIS Codes 220.3620; 120.6200; 350.3950; 080.2730

收稿日期: 2015-04-23; 收到修改稿日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(61027010, 60977062, 61376122)、吉林省科技发展计划(20120323, 20130206010GX, 20150204072GX)、长春市科技计划(2011131, 2013261)

作者简介: 陈 成(1989—),男,博士研究生,主要从事静态傅里叶变换红外光谱仪方面的研究。

E-mail: chengeng@126.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光谱技术等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn (通信联系人)(中国光学学会会员号: 1309126)

1 引 言

近年来,傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)以其高通量、多通道、高精度等优点在化学分析、环境监测、空间探测、军事地物侦察分析以及反恐防化等领域的发展得到了广泛的应用^[1-4]。随着科技的发展,对微型化和轻量化的红外光谱分析仪器提出了十分迫切的需求^[5-6]。目前,大多数工业化的傅里叶变换光谱仪(FTS)都是基于传统迈克尔孙干涉仪原理的时间调制型光谱仪,由于存在可动部件,不但体积、重量较大,系统的精度控制和稳定性仍然是一个很大的问题^[7-8]。

本课题组研究的基于微光机电系统(MOEMS)多级微反射镜的静态 FTIR,采用两个正交放置的多级微反射镜代替了传统时间调制型傅里叶变换光谱仪中的两个平面镜。由于不含可动部件,这种光谱仪具有系统稳定性高和结构简单等优点^[3,6]。然而,目前该 FTIR 的缩束系统仍采用传统单孔径透镜组,由于透镜口径较大、整体尺寸较长和透镜数量较多等原因,其体积和重量在整个 FTIR 中占有很大的比重,严重制约了 FTIR 的微型化和轻量化^[9]。复眼系统以其结构紧凑、体积小、重量轻等优点有助于解决这一问题^[10-12],而微光学制造技术的发展,使得低成本微透镜阵列的制造成为可能^[13-15]。

作为复眼系统的两种结构,联立复眼和重叠复眼的光学性能和各微透镜光学通道(MLOC)的图像传输原理在很多论文里已经被讨论过^[16-17]。本文选择了由 3 个微透镜阵列组成的联立复眼结构作为 FTIR 的复眼缩束系统(ECE)的初始结构,根据三维矩阵光学理论计算了初始结构参数,根据 MLOC 的光线传播特点设计了消杂光光阑阵列,并使用 Zemax 光学设计软件中的混合序列模式对初始结构进行了优化。最后,借助光学分析软件,将设计完成的 ECE 放入到 FTIR 中进行理论分析,得到了干涉图和复原光谱。

2 工作原理

图 1 是静态 FTIR 的原理示意图,仪器基于迈克尔孙干涉仪的基本原理。准直系统将光源发出的光准直成平行光束,被分束系统分成强度相等的两束相干光;两个相互正交放置的多级微反射镜代替了迈克尔孙干涉仪中的两个平面镜,用以调节经过分束系统后的两束光产生特定的光程差;ECE 将经过两个正交多级微反射镜调制后的干涉图缩束在其后的探测器上。

两个多级微反射镜的阶梯常数遵循 Nyquist-Shanno 采样定理和光程差互补原则,即采样间隔要小于等于最小波长的二分之一,低阶梯多级微反射镜的阶梯高度总和等于高阶梯多级微反射镜的一个阶梯高度^[18]。因此,对于阶梯数均为 M ,阶梯高度分别为 d 和 Md 的两个多级微反射镜,系统可以获得采样间隔为 $\Delta = 2d$ 的 $M \times M$ 个采样定域。图 2 所示为 3×3 采样定域光程差排布示意图。各个定域的干涉图函数可以表示为

$$I(m_1, m_2) = \int_0^\infty B(\nu) \exp[j2\pi\nu\delta(m_1, m_2)] d\nu, \quad (1)$$

式中 m_1 和 m_2 分别表示高低两个多级微反射镜的阶梯数, $I(m_1, m_2)$ 表示空间采样点 (m_1, m_2) 处的干涉图强度, $B(\nu)$ 为光信号的功率谱密度, ν 为光信号的空间频率, $\delta(m_1, m_2)$ 为空间采样点 (m_1, m_2) 处的光程差。对(1)式进行傅里叶变换即可得到复原光谱^[8]。

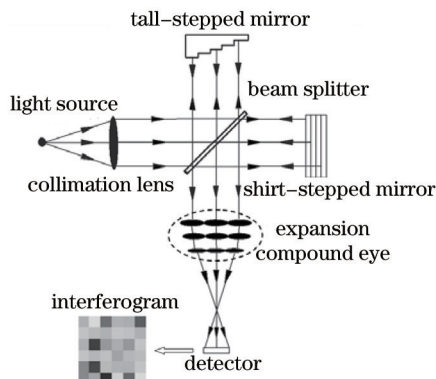


图 1 静态 FTIR 的原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the static FTIR

为了防止各采样定域之间发生混叠, ECE 在将整个采样区域缩束放在探测器上的同时,需保证各采样定域

之间的位置关系保持不变。因此, MLOC 和采样定域间必须保持一定的对应关系, 且 ECE 需使用物方远心结构。

0 Δ	3 Δ	6 Δ
1 Δ	4 Δ	7 Δ
2 Δ	5 Δ	8 Δ

图 2 3×3 采样定域光程差排布示意图

Fig.2 Schematic diagram of 3×3 optical path difference array

3 ECE 的设计与优化

3.1 初始结构设计

选择如图 3 所示的联立复眼结构作为 ECE 设计的初始结构, 该结构由 3 个不同尺寸的微透镜阵列组成, 各微透镜阵列互相对应的 3 个子透镜组成相对独立的 MLOC。每个 MLOC 均可看作光轴倾斜的开普勒型望远系统, 经过两个多级微反射镜反射的准直光束被 MLOC 分成一系列更小的准直光束, 最终会聚在探测平面上。第二微透镜阵列为场镜, 使得经过第一微透镜阵列的光束发生偏折, 从而降低其后第三透镜阵列的尺寸并减小系统的后工作距离。 p_1 和 f_1 , p_2 和 f_2 , p_2 和 f_2 分别表示第一、第二和第三微透镜阵列子透镜的口径和焦距, t 表示第二和第三微透镜阵列之间的空气间隔, L 表示第三微透镜阵列后表面到探测器冷光阑的距离, ΔL 表示探测器冷光阑到探测面的距离。根据图 3 中的几何关系, 有

$$L = \frac{Np_2}{2 \tan \alpha}, \quad (2)$$

其中 N 表示微透镜阵列在 y 方向的子透镜数, α 表示探测器冷光阑中心点到探测面边缘的最大张角。

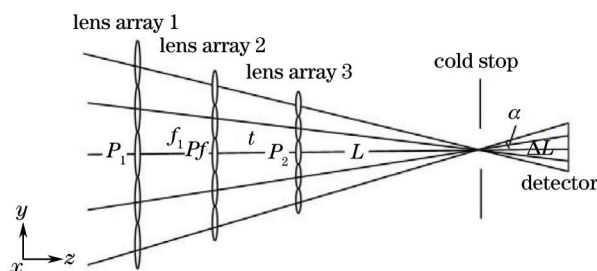


图 3 联立复眼缩束系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of apposition compound eyes

各 MLOC 可以看作一个特别的傍轴偏心系统, 使用包含近轴偏移的 3×3 矩阵形式计算 ECE 的光学传递矩阵, 傍轴出射光线的高度 h_{out} 和方向角 α_{out} 可以通过已知的傍轴入射光线高度 h_{in} 和入射角 α_{in} 计算得到

$$\begin{pmatrix} h_{out} \\ \alpha_{out} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \Delta x \\ A_{21} & A_{22} & \Delta \varphi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{in} \\ \alpha_{in} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 A_{11} , A_{12} , A_{21} 和 A_{22} 和传统 2×2 矩阵光学代表的含义相同, Δx 和 $\Delta \varphi$ 分别代表离轴和倾斜, 这种形式的矩阵通常被用来追迹离轴薄透镜阵列的傍轴光线^[16]。在 ECE 光学传递矩阵的计算过程中, 光线的坐标必须和偏心薄透镜的局部坐标保持一致, 当光线离开微透镜阵列后再变换回 ECE 所在的全局坐标系^[19]。假设薄透镜阵列的焦距为 f , 偏心量为 σ , 则 ECE 的光学传递矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1/f & 1 & \sigma/f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \sigma \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1/f & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sigma \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

根据(3)式, 图 3 中各 MLP 的光学传递矩阵为

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -Np_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1/f_2 & 1 & Ny \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1/f_1 & 1 & Nx \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1/f_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中,

$$x = \frac{(p_1 - p_f)}{f_f}, \quad (6)$$

$$y = \frac{(p_1 - p_2)}{f_2}, \quad (7)$$

相同视场角度不同入射高度的光线经过每一个 MLOC 后的出射光线最终都会聚在距第三个微透镜阵列距离 L 的探测器冷光阑面上, 相应光线传递矩阵为

$$T = \begin{pmatrix} 1 & L & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} B, \quad (8)$$

由于经过准直系统后的光束不是严格的零视场平行光, 而是有一定的视场角^[9]。因此, ECE 上的入射光是具有一定孔径角的细光束, 经各个 MLOC 后会聚在距第三个微透镜阵列距离 $L + \Delta L$ 的探测面上。设多级微反射镜距第一微透镜阵列前表面的距离, 即 ECE 物距为 L_0 , 则 ECE 的物像矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & L + \Delta L & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} 1 & L_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

为了将所有具有相同入射角不同入射高度的光线会聚到同一个点有, $T_{11}=0, T_{13}=0$, 则

$$f_2 = \frac{L(p_1 - p_2)}{p_1}, \quad t = \frac{L(p_1 - p_2)}{p_2}, \quad (10)$$

设 ECE 的垂轴放大率为 β , 根据物像矩阵的特点有 $M_{11} = \beta$, 即

$$-\frac{t}{f_1} + \frac{(L + \Delta L)(t - f_2)}{f_1 f_2} = \beta \Rightarrow f_1 = \frac{\Delta L(p_1 - p_2)}{\beta p_2}, \quad (11)$$

为了获得较低的像差, 应使每个 MLOC 的主光线通过第三个子透镜的中心, 则有 $B_{12}=0, B_{13} = N(p_1 - p_2)$, 即

$$f_f = \frac{\Delta L L(p_1 - p_2)}{(\Delta L + L\beta)p_2}, \quad p_f = p_1 - \frac{\beta L(p_1 - p_2)}{\Delta L + \beta L}, \quad (12)$$

则 ECE 的镜筒长度为

$$ML = f_1 + t = \frac{(\Delta L + \beta L)(p_1 - p_2)}{\beta p_2}, \quad (13)$$

ECE 的系统长度为

$$OAL = f_1 + t + L + \Delta L = \Delta L + \frac{\Delta L(p_1 - p_2) + \beta L p_1}{\beta p_2}, \quad (14)$$

由于 ECE 各结构参数之间相互关联, 因此有一个非常大的解空间^[19]。

由于由圆形子透镜构成的传统微透镜阵列的填充因子较低, 在实际应用中光能利用率较低^[8]。因此, 结合采样定域为矩形区域的特点, ECE 选择由方形子透镜构成的微透镜阵列, 如图 4 所示。

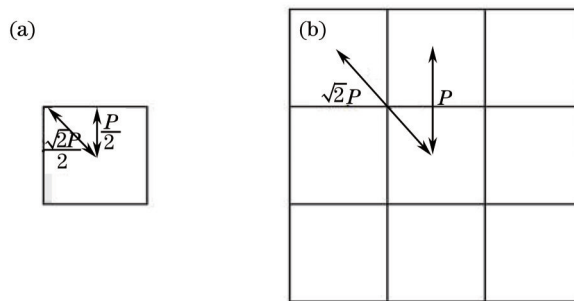


图 4 (a) 单个方形子透镜; (b) 方形子透镜组成的微透镜阵列

Fig.4 (a) A single rectangle lens; (b) microlens array consist of rectangle lens

由于 ECE 上的入射光具有一定孔径角, 因此, MLOC 的部分边缘光线将不能到达探测面上, 从而造成光能量的损失, 如图 5 所示, 图中阴影部分代表各 MLOC 损失的光能量, u 为入射光束的孔径角。系统的光能利用率为

$$\eta = \left(\frac{p_1}{L_0 u + p_1} \right)^2 \quad (15)$$

根据 FTIR 系统结构特点,选择 L_0 为 65 mm, u 为 0.01 rad。相应的光能利用率 η 随 p_1 的变化关系曲线如图 6 所示,从图中可以看出,光能利用率随着 p_1 的增加而非线性的增加。根据伯努利近似,探测器上噪声的概率密度服从泊松分布,因此,探测器上单个像元噪声的标准差等于到达该像元光线数 r 的二次方根^[13]。用 g 表示经多级微反射镜反射的光线数, s 表示探测器的像元数,则有系统信噪比(SNR):

$$F_{\text{SNR}}(\text{dB})(p_1) = 10 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{g}{s} \frac{p_1}{L_0 u + p_1}} \right), \quad (16)$$

信噪比随第一微反射镜子透镜孔径 p_1 变化关系曲线如图 7 所示,此时计算光线数为 200 万条。从图中可以看出,信噪比随第一微反射镜子透镜孔径 p_1 的增大而增大,当 p_1 大于 2 mm 时,信噪比变化不明显。

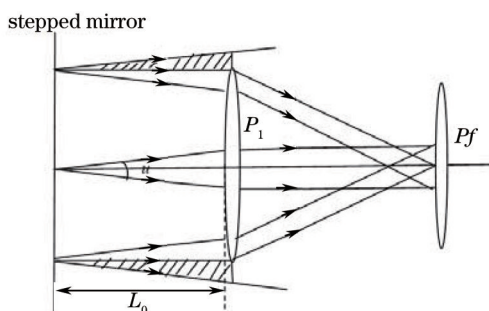


图 5 MLOC 光能量损失示意图

Fig.5 Schematic diagram of light energy loss of MLOC

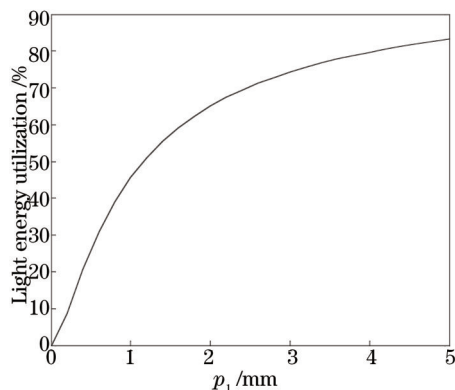


图 6 光能利用率随 p_1 的变化

Fig.6 Light energy utilization varies with p_1

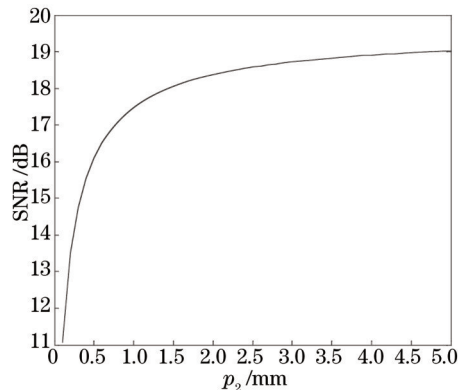


图 7 系统信噪比随 p_1 的变化

Fig.7 Signal-to-noise varies with p_1

根据以上分析可知,增大第一微透镜阵列微透镜孔径 p_1 有利于系统光能利用率和信噪比的提高。然而随着 p_1 的增加,各 MLOC 的像差也会迅速增加,不利于系统后期的优化^[13]。

3.2 消杂光光阑阵列设计

ECE 相邻 MLOC 的光线之间会发生相互串扰而在探测面上形成鬼像,如图 8 所示。为了抑制鬼像和各元件表面反射产生的杂散光对系统的影响,在第二微透镜阵列前表面上引入消杂光光阑阵列^[17]。该光阑阵列的制作可以通过先在微透镜阵列表面镀上一层反射金属膜,然后再对金属膜进行腐蚀的方法实现^[20]。图 8 中 w 表示子光阑的通光孔径, $D(n_x, n_y)$ 代表光阑中心相对于微透镜中心的偏移量,由几何关系有

$$w = f_1 u, \quad (17)$$

$$D(n_x, n_y) = (p_1 - p_f) \sqrt{n_x^2 + n_y^2}, \quad (18)$$

其中 f_1 为第一微透镜阵列的焦距, u 为 ECE 的物方孔径角, n_x 和 n_y 分别表示 x 方向和 y 方向微透镜数。图 9 展示了 3×3 光阑阵列,图中阴影部分为光阑。

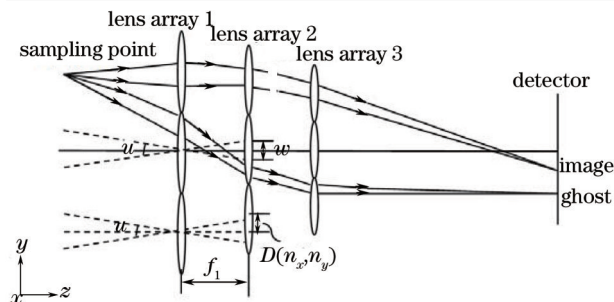


图 8 系统鬼像及光阑位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of ghost images and the location of the stop array

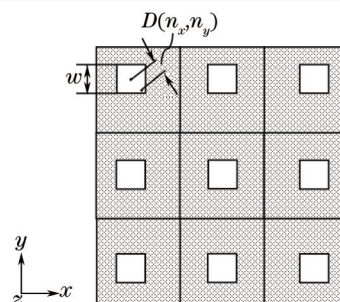


图 9 第二微透镜阵列前表面上 3x3 光阑阵列示意图

Fig.9 Schematic diagram of 3x3 stop array on the front surface of the second microlens array

3.3 系统优化

对于两个多级微反射镜阶梯数 M 均为 16, 子反射面宽度 W 均为 1 mm 的 FTIR, 单个采样定域所能覆盖的探测器像元数为 16×16 , 像元大小为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, F 数为 4, ECE 的放大倍率 $\beta = 0.48$, 冷光阑到探测面的距离 $\Delta L = 19.8 \text{ mm}$, $\tan \alpha = 0.194$ 。对于 FTIR, 光谱复原的影响主要来自于光斑尺寸, 因为当光斑尺寸较大时, 相邻两个像元之间的信号因相互干扰而无法区分, 因此要求 ECE 的光斑直径小于 $30 \mu\text{m}$ 即可^[3]。

选择 $p_1 = 2 \text{ mm}$, $p_2 = 1.8 \text{ mm}$, 由图 6, 7 有, 光能利用率 η 为 65%, 信噪比为 18.38 dB, 即噪声水平为 1.45%。根据 (2)、(8)、(9)、(10) 式有: $f_1 = 3.345 \text{ mm}$, $t = 3.093 \text{ mm}$, $f_2 = 2.861 \text{ mm}$, $f_3 = 1.607 \text{ mm}$, $p_3 = 1.928 \text{ mm}$, $L = 38.144 \text{ mm}$ 。

此时, 单个 MLOC 对应采样区域上的 4 个采样定域, 微透镜阵列的微透镜数为 8×8 , 其平面结构如图 10 所示, 图中编号 1-10 代表距离中心位置不同的微透镜分类。由对称性可知, 选择三角形区域内的 10 个 MLOC 即可反映出整个 ECE 的性能情况。

10	9	8	7	7	8	9	10
9	6	5	4	4	5	6	9
8	5	3	2	2	3	5	8
7	4	2	1	1	2	4	7
7	4	2	1	1	2	4	7
8	5	3	2	2	3	5	8
9	6	5	4	4	5	6	9
10	9	8	7	7	8	9	10

图 10 8×8 MLOC 分布图

Fig.10 Schematic diagram of 8×8 MLOC

根据上述 ECE 的初始结构参数, 使用 Zemax 光学设计软件中的混合序列模式对其进行了优化设计, 即使用非序列模式建立微透镜阵列模型, 将其作为一个整体导入到序列模式中进行优化。选择光斑尺寸作为优化的主要评价函数, 同时校正每一个 MLOC 的像散和畸变。ECE 的设计波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 选择第一、第二和第三微透镜阵列的材料组合为 锕-锕-硅, 这样的材料组合便于校正系统的色差。使用图 11 为 ECE 优化后

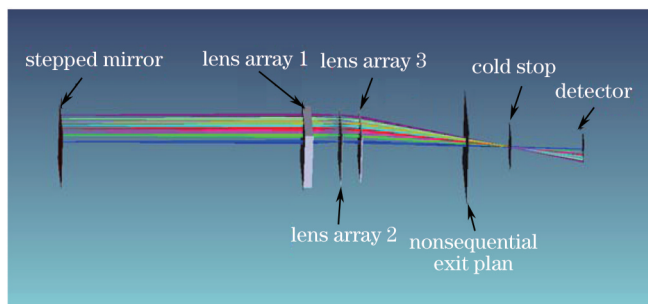


图 11 ECE 的三维结构图

Fig.11 Three-dimensional layout of the ECE

的三维光学结构图,图 12 为点列图,分别对应图 10 中三角形区域内的 10 个 MLOC,各点列图直径均方根值最大为 19.589 μm ,小于容限值 30 μm 。表 1 为 ECE 优化前后的参数对比。

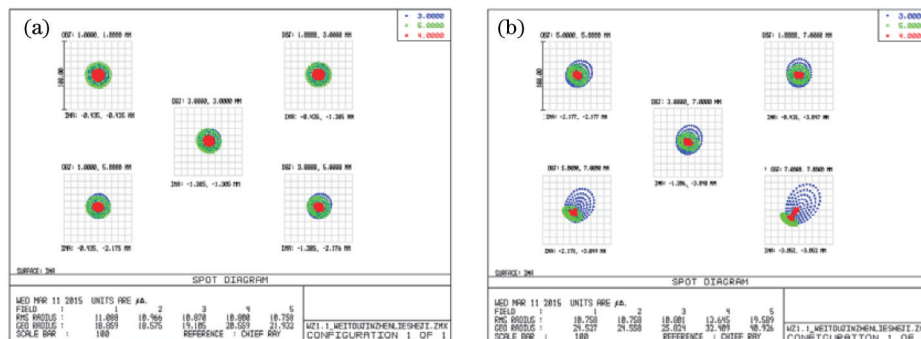


图 12 ECE 对应的点列图。(a) 1-5 MLOC 的点列图; (b) 6-10 MLOC 的点列图

Fig.12 Spot diagram of the ECE. (a) Spot diagram of 1-5 MLOC; (b) spot diagram of 6-10 MLOC

表 1 ECE 结构参数优化前后对比

Table 1 Comparison of initial and optimized structure parameters

Structure parameter	Initial value /mm	Optimized value /mm
p_1	2.000	2.000
p_f	1.928	1.896
p_2	1.800	1.760
f_1	3.345	6.392
f_f	1.607	4.141
f_2	2.861	5.461
T	3.093	5.061
L	38.144	40.429

ECE 和传统单孔径透镜组缩束系统的参数对比如表 2 所示, ECE 在减小系统透镜数量的同时,有效减小了镜筒长度和系统长度,使得傅里叶变换红外光谱仪的微型化和轻量化成为可能。

表 2 ECE 和传统单孔径透镜组缩束系统对比

Table 2 Comparison of ECE and compressing lenses based on classical lenses structure parameters

	ECE	Expansion lens based on classical lenses ^[3]
Lens construction	3	7
Drawtube length /mm	25.51	153.94
Overall length /mm	52.61	158.26

微透镜数目更多的系统亦可以使用同样的方法进行设计。对于像差要求更高的成像系统,可以通过引入非球面微透镜,让各通道结构参数独立变化等方法以更好的校正系统像差,但同时系统的成本及结构复杂程度会大幅上升^[16,19]。因此,应根据实际应用要求和预算成本选择合适的结构方案。

4 仿真分析

利用光线追迹软件,将所设计的 ECE 导入到 FTIR 中进行干涉图和光谱复原理论分析,高低两个多级微反射镜的高度分别为 20 μm 和 0.625 μm ,如图 13 所示。图 14 和图 15 分别为定义波数为 2000, 2500, 3333 cm^{-1} 的离散光源时 FTIR 理想的干涉图和复原光谱。图 16 和图 17 分别为将 ECE 加入到 FTIR 后的实际干涉图和实际复原光谱。与理想复原光谱相比,实际复原光谱出现了一定的背景噪声。为了评价实际复原光谱和理想复原光谱之间的误差,定义结构光谱误差(SCE)为:

$$F_{\text{SCE}} = \frac{\sum_{k=0}^n |B_{\text{real}}(k) - B_{\text{ideal}}(k)|}{\sum_{k=0}^n B_{\text{ideal}}(k)}, \quad (19)$$

其中, $B_{\text{real}}(k)$ 表示实际复原光谱, $B_{\text{ideal}}(k)$ 表示光信号理想复原光谱^[6]。则实际复原光谱的 SCE 为 2.56%,能够

满足 FTIR 的应用要求^[21]。

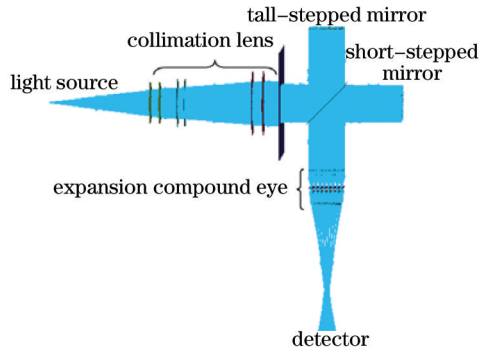


图 13 FTIR 系统光线追迹示意图

Fig.13 Ray tracing layout of the FTIR system

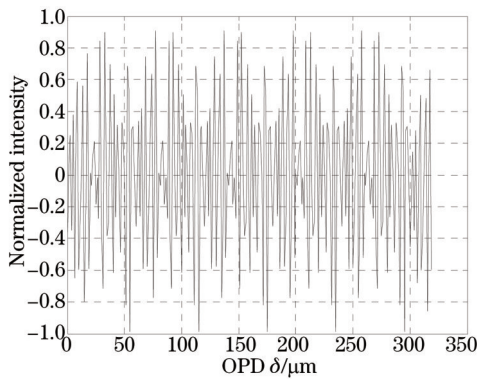


图 14 理想干涉图

Fig.14 Ideal interferogram

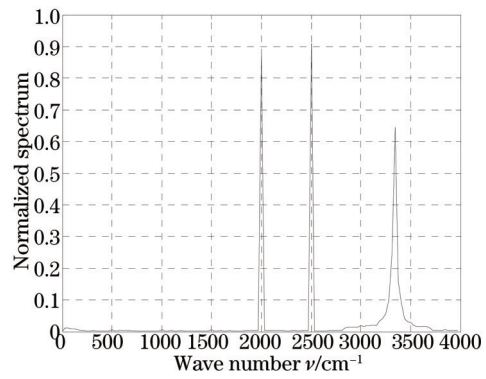


图 15 理想复原光谱

Fig.15 Spectrum recovered by ideal interferogram

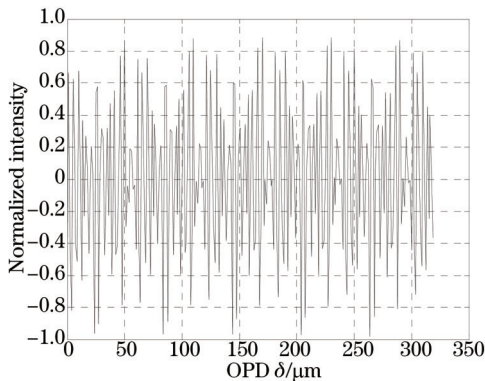


图 16 实际干涉图

Fig. 16 Simulated interferogram

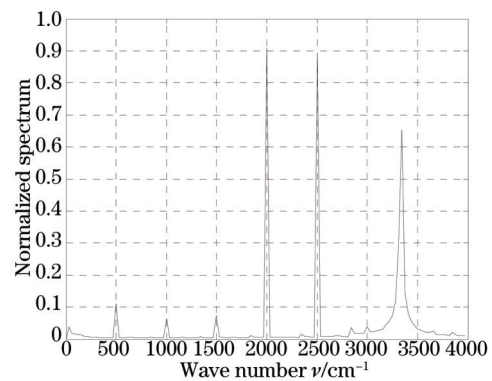


图 17 实际复原光谱

Fig.17 Spectrum recovered by simulated interferogram

5 结 论

选择由 3 个微透镜阵列组成的联立复眼结构作为复眼缩束系统 ECE 的初始结构,根据三维矩阵光学理论,计算了系统的初始结构参数;为了消除因相邻 MLOC 间光线串扰在探测器上形成的杂散光,在第二微透镜阵列的前表面设计了消杂光光阑阵列;使用 Zemax 光学设计软件中的混合序列模式对初始结构参数进行了优化,优化结果显示,各通道的点列图直径均方根值最大为 $19.589 \mu\text{m}$,小于容限值 $30 \mu\text{m}$;使用光学分析软件,将设计完成的 ECE 导入到 FTIR 系统中进行干涉图和光谱复理论分析,得到了实际的干涉图和实际的复原光谱,和理想复原光谱相比,实际复原光谱的 SCE 值为 2.56%,能满足 FTIR 的应用要求。而 ECE 的成功设计,将有利于 FTIR 微小型化和轻量化的进程,也为同类型结构的系统设计提供一定的借鉴。

- 1 F Brachet, P J Hébert, E Cansot, *et al.*. Static Fourier transform spectroscopy breadboards for atmospheric chemistry and climate[J]. Proc SPIE 7100, 2008: 710019.
- 2 A Lacan, F M Bréon, A Rosak, *et al.*. A static Fourier transform spectrometer for atmospheric sounding: concept and experimental implementation[J]. Opt Express, 2010, 18(8): 8311–8331.
- 3 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222006.
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222006.
- 4 Li Xianxian, Xu Liang, Gao Minguang, *et al.*. Fourier transform infrared green house analyzer for gases and carbon isotope ratio[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2359–2368.
李相贤, 徐 亮, 高闽光, 等. 分析温室气体及CO₂碳同位素比值的傅里叶变换红外光谱仪[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2359–2368.
- 5 U Wallrabe, C Solf, J Mohr, *et al.*. Miniaturized Fourier transform spectrometer for the near infrared wavelength regime incorporating an electromagnetic linear actuator[J]. Sens Actuators A, Phys, 2005: 123–124, 459–467.
- 6 Cong Feng, Bo Wang, Zhongzhu Liang, *et al.*. Miniaturization of step mirrors in a static Fourier transform spectrometer: theory and simulation[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 1(28): 128–133.
- 7 E V Ivanov. Static Fourier transform spectroscopy with enhanced resolving power[J]. J Opt A Pure Appl Opt, 2000, 2(6): 519–528.
- 8 Cong Feng, Jingqiu Liang, Zhongzhu Liang. Spectrum constructing with nonuniform sample using least-squares approximation by cosine polynomials[J]. Appl Opt, 2011, 50(34): 6377–6383.
- 9 Weilun Liang, Huikai Shen, Guodung J Su. Wide-angle camera with multichannel architecture using microlenses on a curved surface [J]. Appl Opt, 2014, 53(17): 3696–3705.
- 10 Li Dan, Xue Yunyun, Cao Wen, *et al.*. Optimization of DMD illumination system with microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122002.
李 丹, 薛芸芸, 曹 雯, 等. 基于微透镜阵列的DMD芯片投影系统照明优化[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122002.
- 11 Xiao Yanfen, Zhu Jing, Yang Baoxi, *et al.*. Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0216001.
肖艳芬, 朱 菁, 杨宝喜, 等. 用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0216001.
- 12 Zhang Xu, Li Cheng. Calibration and imaging model of light field camera with microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1211005
张 旭, 李 晨. 微透镜阵列式广场成像模型及其标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1211005.
- 13 Vesselin Shaoulov, Jannick P. Rolland. Design and assessment of microlenslet-array relay optics[J]. Appl Opt, 2003, 34(42): 6838–6845.
- 14 Huikai Shen, Guodung J Su. Cluster eye camera using microlenses on parabolic surface[J]. SPIE, 2013, 8842: 819102.
- 15 Zhong Kejun, Gao Yiqing, Li Feng, *et al.*. A Method of fabricating concave polydimethylsiloxane microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0310002.
钟可君, 高益庆, 李 凤, 等. 一种制作凹形聚二甲基硅氧烷微透镜阵列的方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0310002.
- 16 Jacques Duparre, Peter Schreiber, Andre Matthes, *et al.*. Microoptical telescope compound eye[J]. Opt Express, 2005, 3(13): 889–903.
- 17 Hamid Reza Fallah, Ayatollah Karimzadeh. MTF of compound eye[J]. Opt Express, 2010, 12(18): 12304–12310.
- 18 Lü Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Analysis of wedge error of beam splitter in spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1030001.
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪分束器楔形误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1030001.
- 19 H R Fallah, A Karimzadeh. Design and simulation of a high-resolution superposition compound eye[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 1(54): 67–76.
- 20 Jacques Duparre, Peter Dannberg, Peter Schreiber, *et al.*. Thin compound-eye camera[J]. Appl Opt, 2005, 15(44): 2949–2956.
- 21 Ying Zheng, Jingqiu Liang, Zhongzhu Liang. Design and fabrication of step mirrors used in space-modulated Fourier transform infrared spectrometer[J]. Opt Express, 2013, 21(1): 884–892.