

空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究

梁静秋*, 梁中翥, 吕金光, 秦余欣, 田超, 王维彪

(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)

摘要:针对目前环境、医疗、空间、气象、军事及安全等领域对傅里叶变换红外光谱仪微型化、轻量化及固态化的迫切需求,提出并研究了一种以 MOEMS 多级微反射镜为核心器件的空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪。在理论研究方面,建立了空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪的物理模型,探究了该系统的光场分割与空间采样的光学原理;分析了多级微反射镜的衍射效应,提出了一种通过补边抑制衍射噪声抑制方法;进行了多级微反射镜采样误差的分析,并提出了基于最小二乘拟合的修正算法;通过对光源空间相干性、准直系统像差以及入射光场均匀性的分析,确定了光学系统的总体设计指标;通过对多级微反射镜基片加工精度、分束器材料色散特性和膜层透射效率等的计算分析,确定了干涉系统的设计方法与技术参数。在核心技术方面,提出了两个多级微反射镜的3种制作方法,分析了制作误差的来源及对系统性能的影响。通过工艺设计及实验条件探索,分别采用电铸法、真空镀膜法以及斜面倾角叠片法制作了两个多级微反射镜。在系统设计方面,进行了红外准直与缩束系统的光学设计,对整体光机系统进行了建模仿真,分析了杂散光噪声的来源。在图谱处理方面,利用过零采样方式,通过图像分割算法,获取了干涉图采样序列;通过对干涉图序列的插值、补零、延拓与卷积方法,完成了光谱相位误差的校正;通过离散傅里叶变换解调,实现了由干涉图像到信号光谱的数据反演。最后研究了系统光机整体的集成组装技术,并对原理样机进行了实验测试。本文研制的空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪的特点在于:取消了动镜驱动机构与采样控制机构,具有微型与轻量化的特点;干涉图的采样由多级微反射镜完成,其空间采样的方式增加了系统的稳定性与可靠性,实时采样的特点增加了系统的快速性与有效性;多级微反射镜阵列采用 MOEMS 工艺技术制作,增加了系统的采样精度。该光谱仪系统的结构及制作方法具有自主知识产权,并具有广阔的应用前景。

关键词:红外光谱仪;傅里叶变换红外光谱仪;微型;微光机电系统

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150802.0277

Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer

LIANG Jing-qiu*, LIANG Zhong-zhu, LÜ Jin-guang, QIN Yu-xin, TIAN Chao, WANG Wei-biao

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

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

Abstract: According to the urgent requirement to the microminiature, lightweight, and staticize on Fourier transform infrared spectrometer in the field of environment, medical treatment, space exploration, meteorolo-

收稿日期:2014-12-11;修订日期:2015-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61027010)

gy, military and security, a spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer based on MOEMS micro multi-step mirrors(MMSMs) was proposed. In theory, the physical model and the optical principle of spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer was built and researched. A method of leaving extra patches in the boundary to suppress diffraction noise was put forward, and an algorithm based on the least-squares approximation was proposed to correct sampling error. According to the analyzing on the fabrication accuracy of MMSMs, the dispersion characteristics and the transmission efficiency of the beam splitter, the design method and the technical parameters were determined. In the core technology, three different kinds of manufacture method of MMSMs were put forward. By ways of analyzing the origin of the error, the tolerance of two MMSMs was given. The two MMSMs were completed by the method of electroform, positioning of the growth multilayer film, and inclined plane method respectively. In the system design, the infrared collimation system and imaging system were designed and manufactured. According to modeling simulation of the whole machine system, the source of stray light noise was analyzed. In the interferogram processing, using zero crossing sampling model and image segmentation algorithm, the sampling sequence was obtained. By interpolation, zero filling, continuation and convolution of the interference sequence, the phase error of spectrum was corrected. After that, the spectrum was obtained from the interferogram via discrete Fourier transform. Finally, the integration and coupling technology of the system were researched. The characteristics of infrared spectrometer developed in this project were as follows: Firstly, the moving mirror driven mechanism and the sampling control mechanism were cancelled, hence, micro-miniature and lightweight were realized. Secondly, the spatial sampling mode through MMSMs increased the stability and reliability; the characteristics of real-time sampling decreased time wastage and enhanced the optical efficiency. Thirdly, the MMSMs fabricated by MOEMS technology increased the sampling precision. Therefore, the infrared spectrometer designed by us has a great application prospect.

Key words: infrared spectrometer; Fourier transform infrared spectrometer(FTIR); micro; Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems(MOEMS)

1 引言

自20世纪以来,红外光谱技术逐渐成为一项取得巨大突破并得到迅速发展的科学技术。红外光谱属于分子光谱,可以说,任何物质都具有一幅红外光谱,因此红外光谱是确定分子组成与分子结构的有效手段。根据被测物质红外光谱中吸收谱线的位置、强度和线形等信息,便可以确定该被测物质分子的组分构成,从而推断被测物质的结构。利用红外光谱既可以对被测物质进行定性或定量分析,也可以对未知物质进行剖析。对于固体、液体或气体物质,单一组分的纯净物和多种组分的混合物,都可以利用红外光谱进行测定。红外光谱既可以用于无机物、有机物、聚合物、配位化合物的分析,也可以用于粮食、水质、土壤、煤

炭、石油、矿物等的分析。由于红外光谱技术具有灵敏度高、波数准确、重复性好等优点,因此是科研和工程领域必不可少的分析技术,在农业、环境、地质、冶金、化工、医药等领域得到了广泛的应用。

近年来,随着一些高新科学技术领域的出现和发展,如空间探测、资源勘探、环境监控、气象监测、生命科学、生物工程、现代医学、纳米科技等领域的科学研究和工程应用,由于其特殊的应用环境和使用需求,对于小型化、微型化、智能化、灵敏度高、可靠性强、可进行实时探测和非侵入式在线分析的光谱仪器提出了迫切的使用需求^[1-3]。本项目组在国家自然科学基金仪器专项项目的资助下,开展了微小型空间调制傅里叶变换红外光谱仪课题的研究。课题研制的光谱仪利用新原理、新技术、新材料和新工艺,实现了光谱仪器的微小

型化,具有体积小、重量轻、稳定性好、分析精度高、探测速度快等优点,将在未来的光谱探测与光谱分析领域得到广泛的应用并起到重要的作用^[4-5]。

2 基本结构及工作原理

微型空间调制傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 在结构上主要由干涉系统、准直系统、缩束系统、光源系统以及探测器组成^[6-9]。其核心为基于多级微反射镜的干涉系统,包括两个多级微反射镜与一个红外分束器。准直系统与缩束系统采用透射式结构,与反射结构相比,体积小且加工、装调简单。采用面阵红外探测器进行干涉图采集。图 1 为微型 FTIR 的结构示意图。在该系统中,两个具有不同阶梯常数的多级微反射镜 M_1 、 M_2 放置于干涉仪的两臂上,取代了传统迈克耳逊干涉仪中的两个平面反射镜。两个多级微反射镜的台阶数均为 M ,周期分别为 d 和 d' ;且在右手坐标系中沿 x, y 方向正交放置。

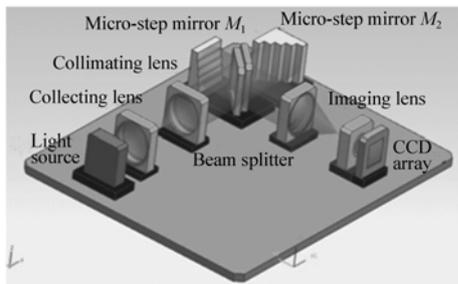


图 1 微型空间调制 FTIR 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer

仪器工作原理如图 2 所示,光源发出的光束经透镜准直后入射到分束器上,分束器将入射光分为强度相等的两束相干光,一束光经分束器反射后到达反射镜 M_1 ,经过 M_1 反射后返回分束器;另一束光透过分束器到达反射镜 M_2 ,经反射后回到分束器。光束在空间上被两个多级微反射镜分成 M^2 份,两束光再次相遇干涉后携带有一定的位相信息。而不同空间点的干涉光的级次不同,并按一定规律排列,从而实现不同级次的干涉光的

空间分割,使得干涉系统的程差可控。即:两束由反射镜不同位置反射的出射光在空间不同位置发生干涉形成多个定域干涉图像。

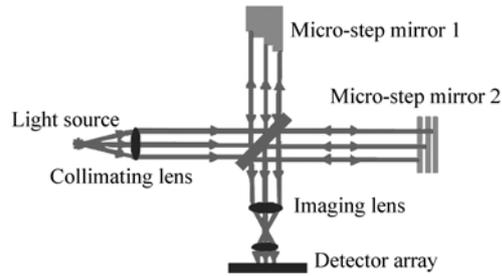


图 2 微型空间调制 FTIR 工作原理示意图

Fig. 2 Sketch map of working principle of micro-FTIR

为了避免离散采样导致的光谱混叠,阶梯间隔 d 遵循奈奎斯特-香农采样定理;为了满足光程差互补原则,阶梯间隔应满足阶梯方程 $d' = M \times d$ 。设第一多级微反射镜的阶梯序数为 x ,第二多级微反射镜的阶梯序数为 y ,则干涉定域 (x, y) 所对应的光程差为:

$$\delta(x, y) = 2(yd' - xd) = 2(My - x)d. \quad (1)$$

由此,在干涉光场的横向空间就构成了一个 $M \times M$ 的光程差采样阵列,采样间隔 $\Delta = 2d$,并且第 n 个光程差的采样序数为 $n = My - x$ 。从而得到各个光场基元所对应的采样光程差与探测器上对应各个特定光程差的干涉图元。图 3 为 3×3 模式光程差阵列与干涉图像示意图。

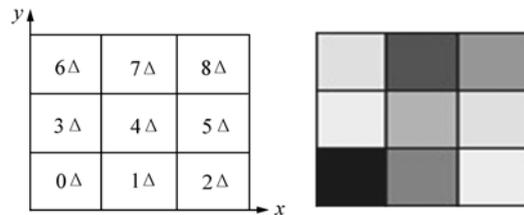


图 3 3×3 模式光程差阵列与干涉图像示意图

Fig. 3 Chart of OPDs array and interferogram image in 3×3 mode

由傅里叶变换光谱学原理,第 n 个干涉图元所对应的干涉图像的函数形式为:

$$I[n(x, y)] = \int_0^\infty B(\nu) \exp[j2\pi\nu n2d] d\nu =$$

$$\int_0^{\infty} B(\nu) \exp[j2\pi\nu(My - x)2d] d\nu, \quad (2)$$

式中: $\nu = 1/\lambda$ 为入射光信号的空间频率; $B(\nu)$ 为入射光信号的功率谱密度(光谱)。

采用面阵探测器探测光强信息,在不降低干涉调制度的前提下增大系统的光通量,实现高信噪比的信号探测,最后通过对干涉图像采样序列进行离散傅里叶变换,就可以复原出入射光信号的光谱信息^[10-11]。

3 理论研究

3.1 多级微反射镜的衍射效应分析

由空间干涉系统的光学结构可以看出,每一个采样干涉图像元的尺寸由其多对应的两个多级微反射镜的宽度所决定。在红外谱段,多级微反射镜台阶反射面宽度过小会导致复原光谱中出现由衍射效应引起的噪声。以理想平行光入射,通过菲涅耳衍射理论,计算此衍射效应的影响,从而确定多级微反射镜台阶反射面宽度^[12-13]。

考虑不同台阶反射面宽度产生的衍射效应,计算得到波长为 $10 \mu\text{m}$ 时不同台阶反射面宽度所对应的光谱信噪比,如图4所示。从图中可以看出,当台阶反射面宽度小于 0.2 mm 时,信号光谱复原失真;当台阶反射面的宽度大于 1 mm 时,光谱信噪比大于 50,复原光谱接近理想光谱。

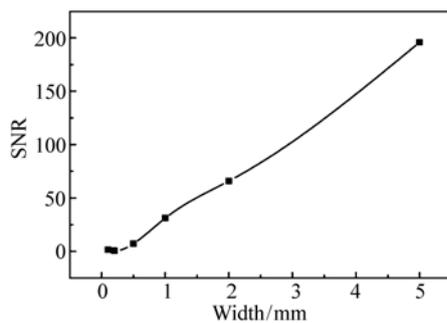


图4 光谱信噪比与台阶宽度的关系曲线

Fig.4 Relationship curve between spectrum SNR and step width

连续光谱的光信号和离散光谱的光信号在不同衍射距离处具有不同的干涉图像,因此会引起

复原光谱的失真。将不同衍射距离处的干涉图像复原为光信号的光谱,计算相应的光谱复原质量

函数 Q ,从而分析不同衍射距离对于复原光谱的影响。计算得到,对于连续光谱的光信号,在多级微反射镜阶梯宽度一定的情况下,衍射距离越小,多级微反射镜每个阶梯边缘的衍射越不明显,复原光谱失真程度越小。随着衍射距离的增加,多级微反射镜阶梯边缘的衍射增强,复原光谱失真也越严重,以致无法识别;对于离散光谱的光信号,无论是干涉图像还是复原光谱,与连续光谱的光信号具有大致相同的变化规律。两种光谱信号的光谱复原质量函数 Q 与衍射距离的关系如图5所示。

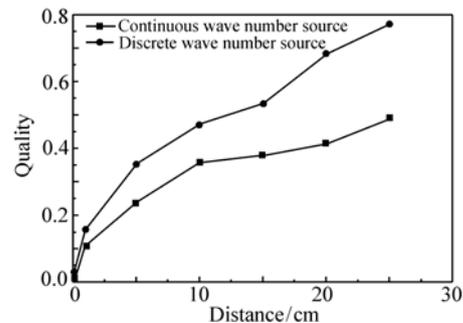


图5 光谱复原质量函数与衍射距离的关系曲线

Fig.5 Relationship curves between the spectrum quality and diffraction distance

无论是连续光谱还是离散光谱的光信号,随着衍射距离的增加,光谱复原质量函数都急剧变差,而且离散光谱信号的光谱复原质量函数大于连续光谱信号的光谱复原质量函数。如果系统需要对连续光谱的复原能力进行定量的计算,则系统受衍射的影响较大;但如果系统仅需要定性分辨吸收峰或发射峰,则系统的分辨能力受衍射的影响不大。

鉴于光谱噪声是由边缘阶梯边界条件的变化引起的,因此本文提出一种阶梯补边的方法来抑制边缘阶梯边界条件的变化^[14]。通过对阶梯补边法进行模拟,结果表明,衍射距离为 10 cm 处的复原光谱噪声已被较好的抑制,衍射距离为 25 cm 处的复原光谱噪声仅被部分抑制,如果需要进一

步抑制衍射噪声,则需要添加更多的台阶来抑制边缘阶梯边界条件的变化。

3.2 阶梯高度的非均匀采样误差分析

多级微反射镜制作过程中的台阶高度误差会带来采样的非均匀性,造成还原光谱的失真。因此,有必要对台阶高度误差容限进行计算。设多级微反射镜台阶高度是以 $0.625 \mu\text{m}$ 为中心,标准差为 σ 的正态分布进行计算。由于台阶高度

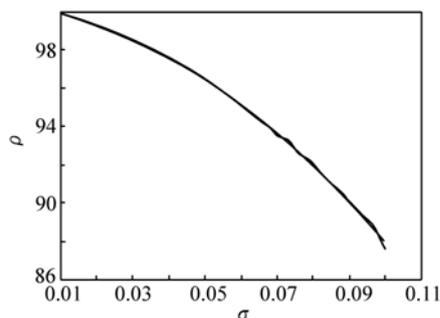


图6 光谱相关度与标准偏差的关系曲线

Fig.6 Relationship curve between spectrum correlation and standard deviation

3.3 视场的空间相干特性分析

由扩展光源发出的光具有一定的视场角,当其经过准直后所得的平行光束除了零视场的平行光束与光轴平行之外,其他视场的平行光束与光轴具有一定的夹角,因此其通过干涉系统产生的光程差将受到视场角的作用^[16]。采用波长为 $3 \mu\text{m}$ 的光谱进行仿真,当立体视场角为 0.2 rad 时所对应的光谱复原图如图8所示。计算得到,立体视场角为 0.2 rad 的扩展光源所对应的光谱分辨率为 125 cm^{-1} ,光谱分辨率严重下降。

随着扩展光源立体视场角的增大,复原光谱中谱线的宽度变宽,谱线的光谱分辨率降低,并且光谱中出现了双峰。因此,为了提高系统的光谱分辨率,应当减小扩展光源的立体视场角,但减小立体视场角又意味着降低系统的光通量。在实际系统中存在着暗电流、杂散光等噪声,这些噪声的存在将导致较弱的光谱信号信噪比低下,光谱失真严重。因此,需要综合考虑光谱分辨率与光通量两个因素来选择扩展光源的立体视场角。立体视场角的大小取决于扩展光源的尺寸和准直透镜

误差使一些采样间隔不满足采样定理而引入噪声,采用快速傅里叶变换算法还原光谱。以复原光谱与原光谱相关度 ρ 作为评价指标来确定 σ 的值。采用统计方法计算标准差 σ 与光谱相关度 ρ 的关系曲线,如图6所示。当要求复原光谱与原光谱的相关度 ρ 大于 0.95 时, σ 应小于 $0.06 \mu\text{m}$ 。

为了降低多级微反射镜在制作过程中的加工精度要求与定位精度要求,提出了一种基于最小二乘拟合的修正算法^[15],数值测试证明该算法可以有效修正非均匀采样带来的光谱失真现象,将台阶高度误差容放宽两倍。如图7中(a)为理想光谱,(b)为采用快速傅里叶变换处理的还原光谱,(c)为采用一般的样条插值处理的还原光谱,(d)为采用最小二乘拟合处理的还原光谱。计算表明,最小二乘拟合算法更符合光谱还原需要,利用此算法可以对 σ 为 $0.12 \mu\text{m}$ 的多级微反射镜采样的干涉图序列进行良好的光谱反演。

的焦距,扩展光源尺寸越小,准直透镜焦距越大,则立体视场角越小。在本研究中,通过光阑来控制扩展光源的立体视场角。

3.4 平行光束的准直特性分析

在理想状态下,准直系统输出的是一平行光束,出瞳平面上为平面波前。但是由于准直系统像差的存在,出射光束相对于平行光束会存在一定的发散角,从而引起出瞳平面上的波前弯曲。发散角会引起干涉条纹发生弯曲,甚至会导致干涉条纹对比度发生反转^[17]。光束发散角与光程差的关系曲线如图9所示。

光束发散角随着光程差呈准周期振荡变化,

振荡变化的幅值与光程差有关,振荡变化的周期是光束发散角扫过干涉图一行时的光程差间隔。光束发散角作为一调制信号对干涉光强进行调制,这种调制作用在频域表现为一调频的过程。光束发散会改变相干光束的光程差,从而使复原光谱中产生一个附加的位相。附加位相与光程差之间的关系曲线如图10所示。

附加位相随着光程差呈准周期振荡变化,并且振荡的幅值随着光程差的增加而增大。当附加

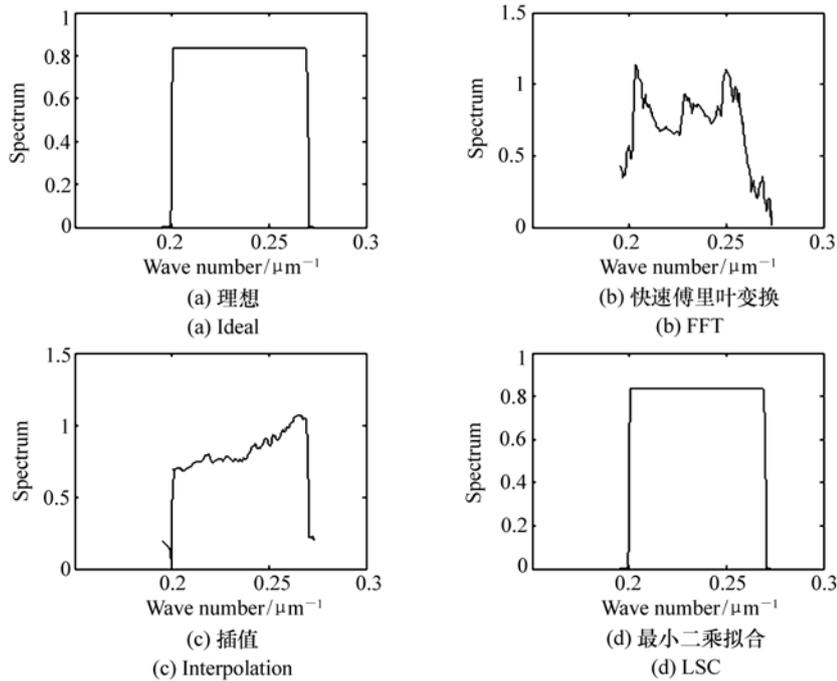


图 7 不同光谱复原算法反演的复原光谱

Fig. 7 Recovered spectra reversed by different methods

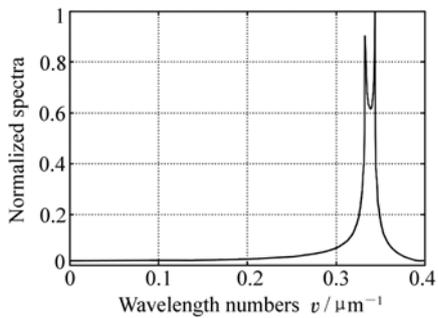


图 8 立体角 0.2 rad 对应的复原光谱图

Fig. 8 Recovered spectrum with solid angles 0.2 rad

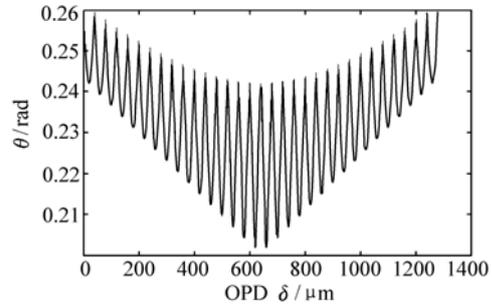


图 9 光束发散角与光程差之间的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between divergence angle and OPD

位相达到 π 时,位相错动了半个周期,致使黑白条纹互变,干涉条纹对比度发生反转。发生对比反转之后的干涉光强对于光谱复原不再有贡献,这样就会导致最大光程差减小,从而带来光谱分辨率的降低。由系统的分辨率需求指标,可以确定发散角系数应满足 $\alpha \leq \sqrt{\frac{\Delta\nu \cdot \lambda_{\min}}{(x^2 + y^2)_{\max}}}$ 。对于本

系统,带入系统参数,发散角系数应满足 $\alpha \leq 2.2 \text{ mrad/mm}$ 。

3.5 光场的能量分布均匀性分析

由于空间调制的 FTIR 在光场的横向空间同时获取所有光程差阵列的干涉图像,因此与时间调制的傅里叶变换光谱仪相比,要求准直系统出瞳平面光场能量分布有着高度的均匀性。如果出瞳平面光场的能量分布不均匀,则干涉图像的空间分布将会出现偏差^[18]。当光场的空间能量分布为固定的分布函数时,分布函数对干涉图像光强的调制将会使得干涉条纹的对比度下降,干涉

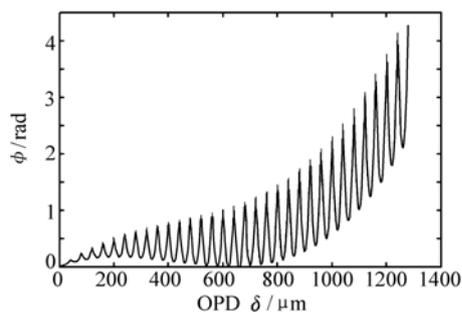


图 10 附加位相与光程差之间的关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between additive phase and OPD

图调制函数曲线如图 11 所示。

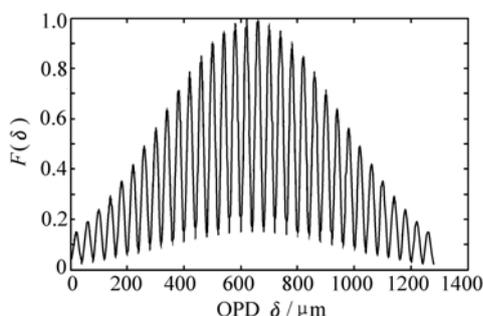


图 11 干涉图调制函数与光程差的关系曲线

Fig. 11 Relationship between interferogram modulation and OPD

干涉图调制函数随着光程差的增加呈准周期振荡的变化形式,被调制的干涉图的对比度降低,干涉图边缘区域的对比度下降尤为明显。

分布函数对干涉图像进行了调制,降低了干涉图像的对比度,因此需要对非均匀分布的光场进行平场校正。通过构造一个恢复函数与退化的干涉图像进行作用,对非均匀分布的光场进行了平场校正。

4 单元器件技术研究

4.1 第一多级微反射镜的分析、制作与测试

由奈奎斯特-香农采样定理,分析、确定了两个多级微反射镜的结构参数。根据采样误差的分析的结果,利用最小二乘拟合算法可以对 σ 为 $0.12 \mu\text{m}$ 的多级微反射镜采样的干涉图序列进行很好的光谱复原,因此将多级微反射镜子反射镜

高度误差范围限定为 $\sigma \leq 0.12 \mu\text{m}$ 。采用 MOEMS 技术制作小阶梯多级微反射镜^[19-21],以满足器件的设计精度要求。

在基片上用明暗相间条纹的光刻版进行光刻、膜层生长等工艺,用不同光刻版对版,重复以上工艺,按光刻次序,光刻版线条宽度依次为 $L/2^1, L/2^2, \dots, L/2^n$,通过 n 次光刻可实现 2^n 级微反射镜阵列制作^[22-24],制作流程如图 12 所示。

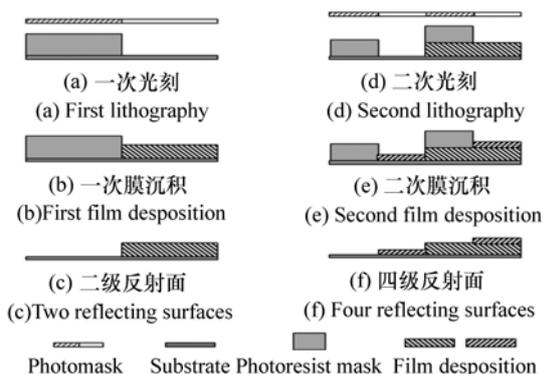


图 12 多级微反射镜制作流程图

Fig. 12 Fabrication flow chart of micro multi-step mirrors

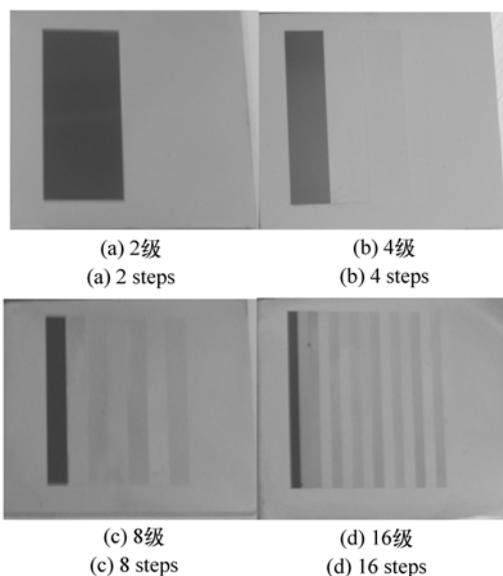


图 13 电铸工艺制作的含有 2 级、4 级、8 级和 16 级台阶结构的多级微反射镜

Fig. 13 Structure of micro multi-step mirrors with 2 steps, 4 steps, 8 steps and 16 steps by electroform

制作完成所需级数的多级微反射镜后,在该结构的台阶表面上蒸镀或溅射红外高反射膜及保护膜,即可得到完整的多级微反射镜结构。本项目采用电铸工艺和真空镀膜工艺两种工艺制作第一多级微反射镜。图 13 是采用电铸工艺制作的含有 2 级、4 级、8 级和 16 级台阶结构的第一多级微反射镜实物图,图 14 是电铸工艺制作完成的蒸镀红外高反射膜的含有 32 级台阶结构的第一多级微反射镜的实物照片,图 15 是单个台阶形貌图。采用 KLA-Tencor P-16 + 台阶仪对多级微反

射镜的台阶高度进行测试,如图 16 所示。通过对高度测试数据进行统计分析,台阶高度的均值为 $0.623 \mu\text{m}$,标准差为 $0.049 \mu\text{m}$ 。

图 17 为单个台阶形貌图,采用 KLA-Tencor P-16 + 台阶仪对多级微反射镜的台阶高度进行测试,如图 18 所示,通过对台阶高度数据进行统计分析,台阶高度的均值为 $0.625 \mu\text{m}$,标准差约为 $0.069 \mu\text{m}$ 。

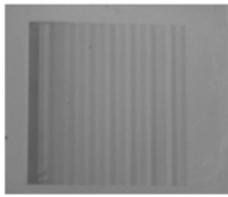


图 14 电铸工艺制作的第一多级微反射镜照片

Fig. 14 Picture of the first micro multi-step by electroform

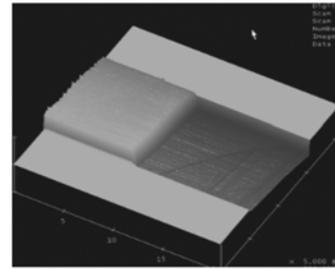


图 17 真空镀膜法的制作的台阶形貌图

Fig. 17 One step profile of micro multi-step mirrors

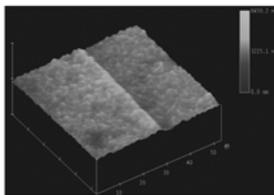


图 15 台阶形貌图

Fig. 15 One step profile of micro multi-step mirrors by AFM

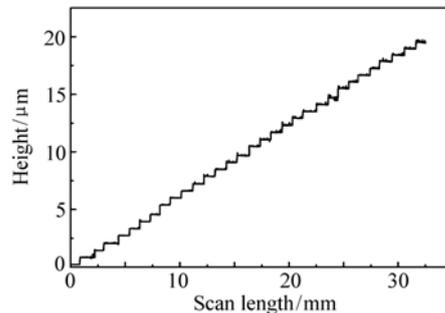


图 18 多级微反射镜台阶高度测试

Fig. 18 Steps height tested by KLA-Tencor P-16 + profile

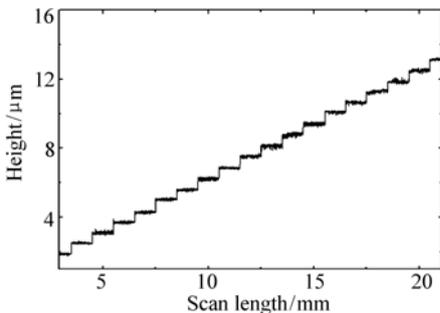


图 16 多级微反射镜台阶高度测试图

Fig. 16 Steps height tested by KLA-Tencor P-16 + profile

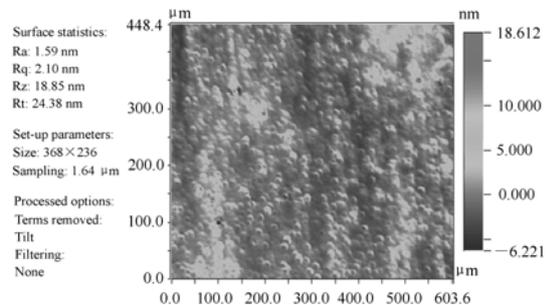


图 19 多级微反射镜粗糙度测试图

Fig. 19 Steps roughness tested by WYKO interferometer

利用表面轮廓分析仪(WYKO干涉仪)对多级微反射镜的最高阶梯反射面表面粗糙度进行了测试,如图 19 所示,测试结果显示其表面粗糙度为 2.10 nm。

4.2 第二多级微反射镜的分析、制作与测试

由于第二多级微反射镜的阶梯高度较高,不适于采用微加工技术制作。本文提出了一种在斜面上制作第二多级微反射镜制作方法,通过调节基板与基底之间的夹角形成一定的斜面,使基板上的各个基片之间产生一定的相对位移,通过高精度微位移台、显微镜以及专门设计的夹具来实现多级微反射镜制作^[25]。图 20 是利用斜面法制作多级反射镜阵列的示意图。

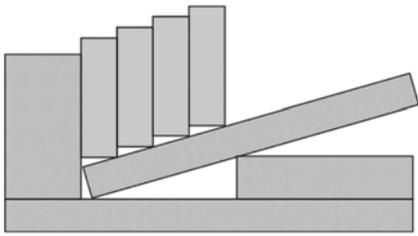


图 20 斜面法制作多级微反射镜示意图

Fig.20 Fabrication method of micro multi-step mirrors by inclined plane method

在制作过程中,由于基片加工精度的限制,单一基片会存在厚度与角度的偏差。设第 m 个基片的厚度相对于理想厚度的偏差为 $\varepsilon(m)$,其反射平面相对于理想反射平面的角度偏差为 $\theta(m)$,则其结构误差如图 21 所示。

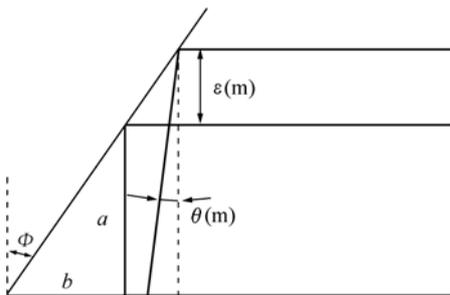


图 21 单个基片的厚度偏差与角度偏差

Fig.21 Thickness deviation and angle deviation of single chip

对于 32 级多级微反射镜来说,含有 32 项基片厚度误差和 32 项基片角度误差,对 64 项结构误差本文采用 Monte Carlo 方法来进行误差的合成,通过对光谱复原质量函数进行统计分析,就可以获得多级反射镜所有的 ε 与 θ 的合成误差对于复原光谱影响的统计特性,如图 22 所示。

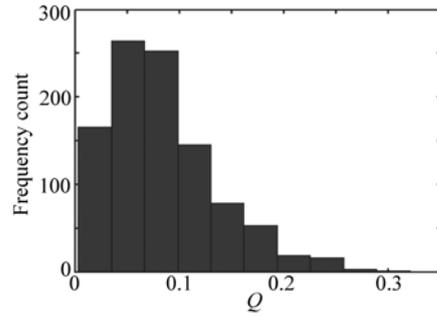


图 22 光谱复原质量函数的统计直方图

Fig.22 Probability distribution of spectrum quality function

图 22 为厚度标准差 $\sigma_\varepsilon = 1 \mu\text{m}$,角度标准差 $\sigma_\theta = 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 时,基片的 ε 与 θ 随机波动产生的光谱复原质量函数 Q 的统计直方图。由统计直方图可以得到 Q 的最小值为 0.003,最大值为 0.320,统计均值为 0.084。

针对不同的厚度标准差 σ_ε 与角度标准差 σ_θ ,由光谱复原质量函数 Q 的统计直方图,可以得到光谱复原质量函数的统计均值随 σ_ε 与 σ_θ 的变化情况,如图 23 所示。

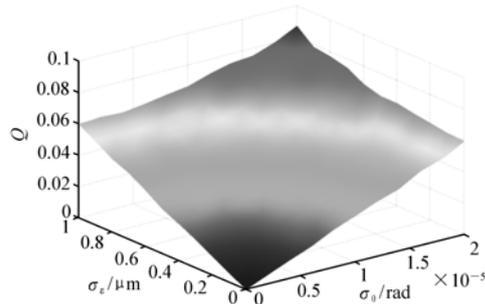


图 23 光谱复原质量函数随厚度偏差与角度偏差的变化

Fig.23 Relationship of spectrum quality versus thickness deviation and angle deviation

光谱复原质量函数与厚度偏差和角度偏差的关系可以看作是一种准线性关系。因此依照 Q 与 σ_e 和 σ_θ 之间的关系, 就可以根据系统需要的 Q 值得到基片厚度偏差与角度偏差的容限。若要求 $Q < 0.1$, 则厚度偏差与角度偏差应该满足 $\sigma_e \leq 1 \mu\text{m}$, $\sigma_\theta \leq 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。采用斜面法制作第二多级微反射镜。图 24 为斜面法制作的第二多级微反射镜的示意图。

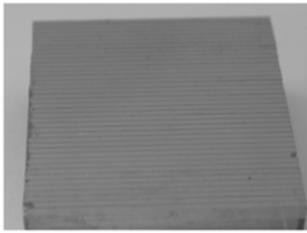


图 24 第二多级微反射镜的照片

Fig. 24 Picture of the second micro step mirror fabricated by inclined plane method

图 24 是利用斜面法制作出的已镀高反膜的二级多级微反射镜照片。将做好的多级微反射镜采用 KLA-Tencor P-16 + 台阶仪对多级微反射镜的台阶高度进行测试。图 25 是台阶高度测试图, 台阶高度的标准差为 $0.12 \mu\text{m}$ 。由多级微反射镜台阶高度容限的模拟计算可知, 当台阶高度在此范围内变化的时候, 台阶高度误差对复光谱复原的影响可以通过最小二乘余弦级数拟合算法予以消除, 实现对目前加工精度下的采样误差光谱的有效校正。

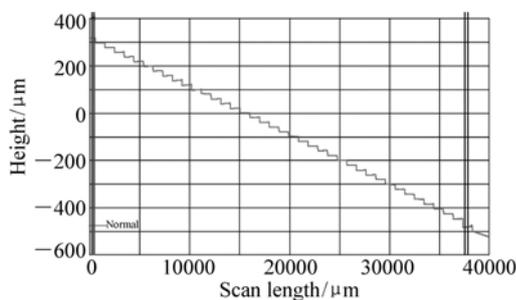


图 25 阶梯高度测试曲线

Fig. 25 Steps height test curve

利用表面轮廓分析仪 (WYKO 干涉仪) 对多级微反射镜的最高阶梯反射面表面粗糙度进行了测试, 表面粗糙度为 1.02 nm , 如图 26 所示。

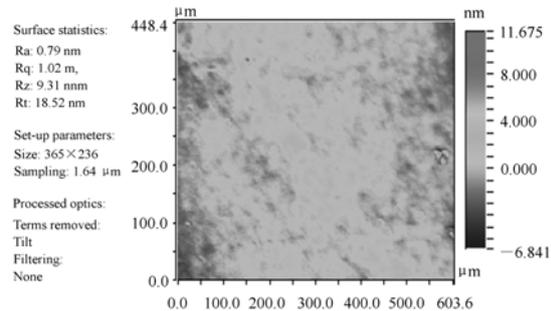


图 26 斜面倾角叠片法制作的二级微反射镜粗糙度测试图

Fig. 26 Steps roughness tested by WYKO interferometer

4.3 红外分束器的分析、制作与测试

由于干涉系统中分光组件对红外辐射具有一定的吸收和反射作用, 因此会引起光能量的损失与杂散光的产生。干涉系统的透过率主要取决于分束器与补偿板材料的吸收和表面膜层的反射^[26]。干涉系统透射效率的特性曲线如图 27 所示。

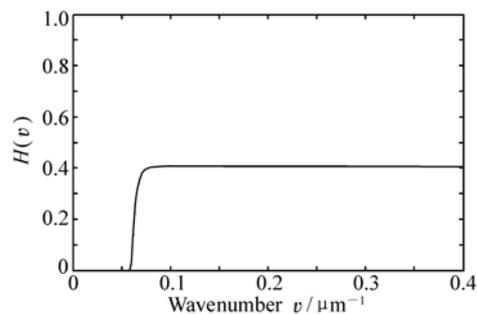


图 27 透射效率的频率特性曲线

Fig. 27 Frequency character curve of transmission efficiency

透射效率曲线具有高通特性, 低频部分的光信号经过干涉系统后被全部吸收, 而高频部分 ($0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}^{-1}$) 的光信号经过干涉系统后具有一致的透过率。高频谱段 ($0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}^{-1}$) 的透射效率 H_0 主要取决于分束器与补偿板表面增透

膜的光强反射率 R_1 和分束器表面分束膜的光强反射率 R_2 。不同光强反射率所对应的透射效率的变化曲面如图 28 所示。计算得到,当要求系统的透射效率大于 90% 时,光强反射率 R_1 和 R_2 应该限定在特征曲线 $H_0 = 0.9$ 所包围的区域之内,因此 R_1 和 R_2 应该满足 $R_1 \leq 2\%$, $45\% \leq R_2 \leq 55\%$ 。

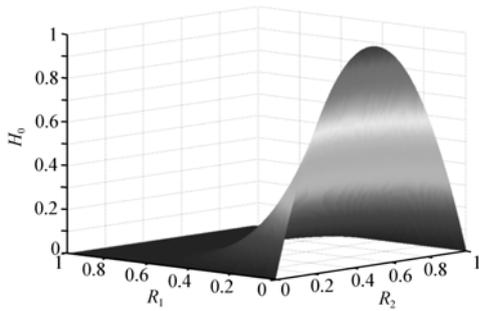


图 28 透射效率与光强反射率之间的关系曲面图

Fig. 28 Surface plots of transmission efficiency with intensity reflectance R_1 and R_2

由于分束板与补偿板均具有一定的厚度,所以被分束膜分开的两束光,当其被多级微反射镜反射再次回到光束分割点时,传播的光程相对于实际的空间位置具有一光程增量。所以,两束光相干叠加时其光程差具有一偏移量。折射率的色散导致不同波长的相干光发生干涉时具有不同的光程差偏移量,从而引起不同频率成分的干涉图在叠加时在纵向空间发生混叠^[27]。当分束板与补偿板的厚度差为 $\Delta b = 0.2 \mu\text{m}$ 时,光程差偏移量的频率特性曲线如图 29 所示。

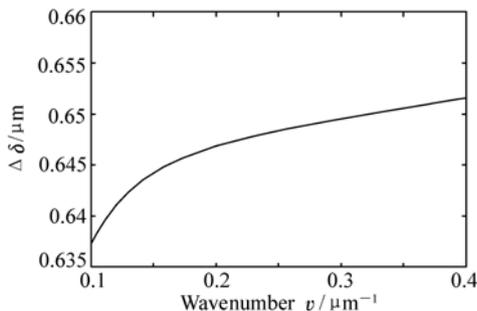


图 29 光程差偏移量的频率特性曲线

Fig. 29 Frequency character curve of OPD increment

光程差偏移量随着入射光信号频率的增加而增加,光信号的频率越高,光程差的偏移量越大。因此,厚度偏差引起的光程差偏移量的频率特性会引起不同频率干涉图像的混叠;同时会改变复原光谱中各条谱线之间的相对强度,高频谱线会受到严重的衰减,一些弱的光谱可能会被淹没。厚度偏差引起的光程差偏移量的色散特性会导致干涉光强信号产生一个相位延迟,如图 30 所示。

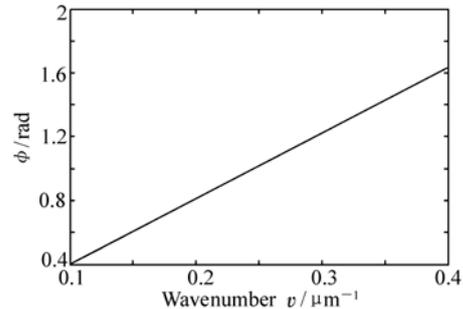


图 30 相位延迟的频率特性曲线

Fig. 30 Frequency character curve of phase delay

频率越高的光信号,相位延迟越大,其光谱失真程度较大。当相位延迟达到 π 时,干涉图像的相位错动了半个周期,从而引起干涉图像对比度反转。发生对比度反转的高频光信号的干涉图像会抵消低频光信号干涉图像的信息。因此,为了避免干涉图像对比度反转的发生,分束器与补偿板的厚度差应该满足 $\Delta b \leq \frac{1}{4 \cdot BW[\sqrt{n^2(\lambda_{\min}) - \sin^2\theta} - \cos\theta]}$ 。

由于系统加工精度的限制,分束器与补偿板会存在一定的楔形误差,从而导致出射光束相对于入射光束产生一定角度的偏折。对于干涉图像,楔形误差会导致干涉条纹发生弯曲,并且降低干涉图像的对比度。对于复原光谱则会导致光谱频率的压缩,致使谱线向低频方向频移,因此降低复原光谱的光谱精度与光谱分辨率^[28]。谱线向低频方向频移会导致复原光谱中出现相位误差,当分束器与补偿板的楔角 $\alpha = 0.6^\circ$ 时,相位误差随光程差的变化曲线如图 31 所示。

当复原光谱中的相位误差达到 π 时,干涉图像发生对比度反转。发生对比度反转之后的干涉

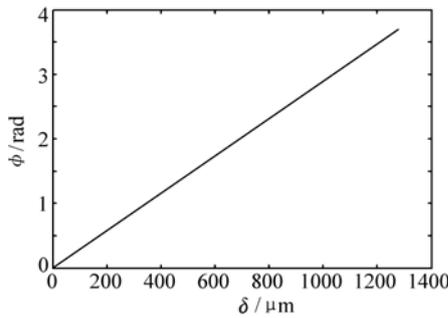


图31 相位误差与光程差之间的关系曲线

Fig. 31 Relationship curve between phase error and optical path difference

图像对光谱复原不再有贡献,从而导致最大光程差的减小,进而引起光谱分辨率的降低。由相位误差 π 得到其所对应的最大光程差,从而便可以得到光谱分辨率。因此,由系统的光谱分辨率指标,分束器与补偿板的楔角误差应满足 $\alpha \leq$

$$\frac{\cos\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} - \cos\theta} \sqrt{\frac{\Delta\nu}{4\nu_{\max}}}$$

对 ZnSe 基底的红外分束器和补偿板设计了其红外膜系结构,并对加工好的分束器与补偿板进行了光强透过率测试,测试结果表明,在 3 ~ 10 μm 的波段范围之内,分束板的光强透过率位于 45% ~ 55% 之间,补偿板的光强透过率大于 98%,如图 32 所示。

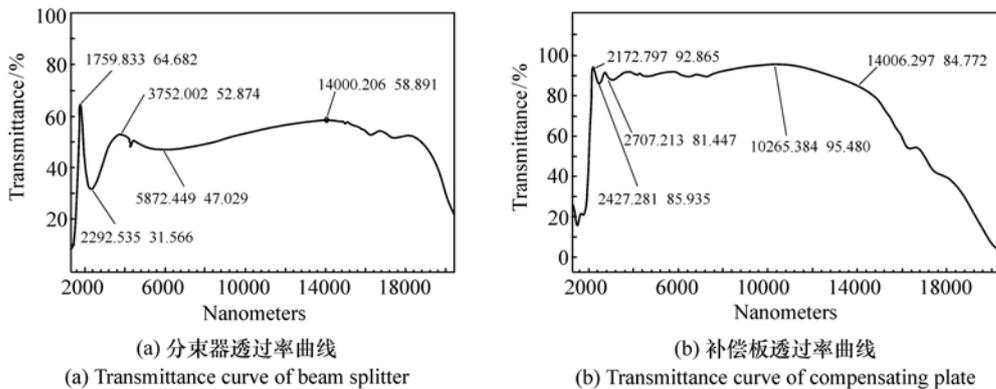


图32 分束器与补偿板的光强透过率曲线

Fig. 32 Transmittance curves of beam splitter and compensating plate

4.4 准直系统的分析、设计与制作

从光源发出的光经会聚系统和准直系统后转变为平行光。由于光学系统含有像差,使得由准直系统出射的光产生一定的发散角,从而会引起多级微反射镜对光程差的调制产生偏差。由于扩展光源的尺寸只有 2.5 mm,系统的视场也只有 0.98° ,因此轴外点像差较小,只需考虑轴上点像差即可。只要轴上点像差校正好,轴外点像差也很小^[29-31]。准直系统采用的是三片式物镜结构,中间为负透镜,两侧为正透镜。正负透镜组合可以消色差。准直系统的设计参数及设计结果如图 33 ~ 36 所示。由设计结果可以看出轴上点像质较好,传递函数值较高。

对准直系统的支撑结构进行了机械结构的设

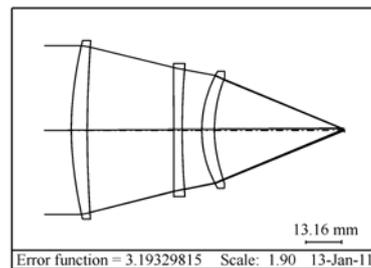


图33 准直系统的结构图

Fig. 33 Optical layout of collimation system

计,并对各个光学镜片进行了加工制造。对准直系统中各单元透镜进行了镀膜,镀膜后透镜的光强透过率均大于 98%。

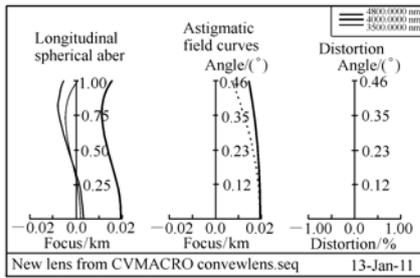


图 34 准直系统的横向像差

Fig. 34 Transverse aberration of collimation system

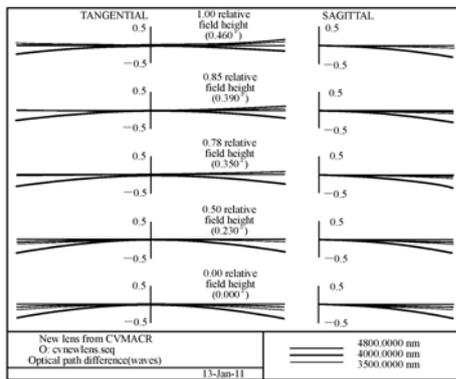


图 35 准直系统的波像差

Fig. 35 Wavefront aberration of collimation system

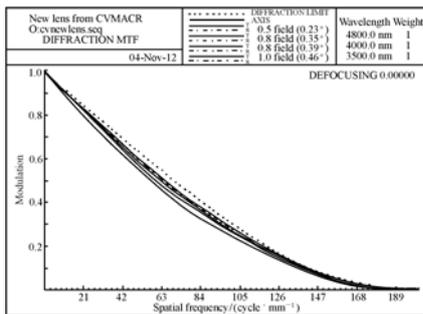


图 36 准直系统的传递函数

Fig. 36 MTF of collimation system

4.5 缩束系统的分析、设计与制作

设一个反射面元只能覆盖 4×4 pixels, 缩束系统的放大倍率为 $\beta = 0.12$ 。对于缩束系统, 其对复原光谱的影响主要来自于弥散斑的尺寸。当弥散斑尺寸较大, 图像分辨率较低, 相邻两个像素之间的光信号会发生相互干扰^[29,31]。缩束系统

采用的是双远心光路结构, 分为前组镜头和后组镜头。由于 RMS 弥散斑尺寸对系统影响较大, 因此在系统设计的时候, 要控制 RMS 弥散斑尺寸, 使其小于一个像元的大小。缩束系统结构参数及

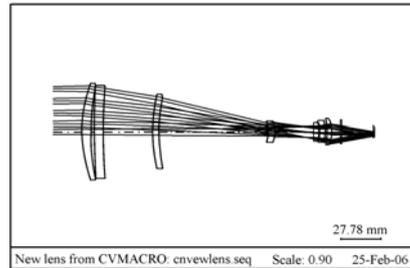


图 37 缩束系统的光学结构图

Fig. 37 Optical layout of constricted system

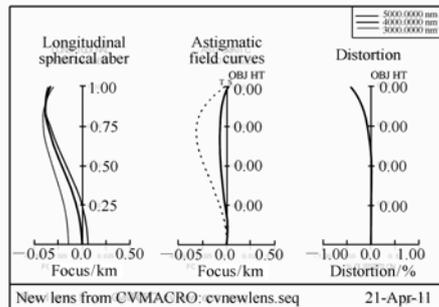


图 38 缩束系统的横向像差

Fig. 38 Transverse aberration of constricted system

设计结果如图 37 ~ 40 所示。由图可知, 各像差均满足设计要求。

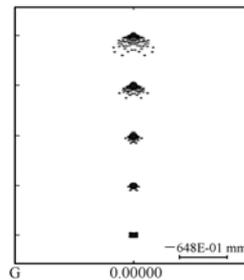


图 39 缩束系统的点列图

Fig. 39 Spot diagram of constricted system

对缩束系统的支撑结构进行了机械结构的设计。并对缩束系统中各单元透镜进行了加工制造和镀膜, 镀膜后透镜的光强透过率均大于 99%。

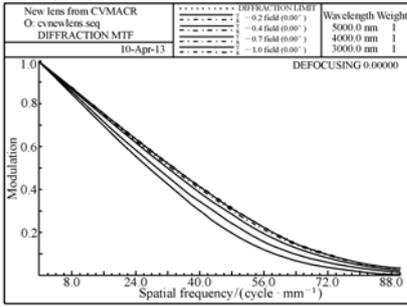


图 40 缩束系统的传递函数

Fig. 40 MTF of constricted system

4.6 光源和探测器的定制与定标

分别采用氮化硅陶瓷光源和碳硅棒光源作为系统光源,氮化硅陶瓷光源升温快、体积小、正面发光为平面型,且发光均匀,发光部位主要集中在光源顶部。碳硅棒光源由水冷套对碳化硅芯棒进行冷却,通过两侧的电极对碳化硅芯棒进行加热从而向外辐射能量,发光部位位于光源中部。为了降低机芯组件的尺寸和功耗,采用斯特林循环微制冷机进行制冷,焦平面工作温度 110 K, NETD ≤ 30 mK。

由于傅里叶变换光谱仪在探测像面不同像元处接收到的是受光程差调制的干涉光信号,因此探测器的暗电流和响应非均匀性(不同像元之间响应不一致和对不同波长的响应不一致)对光谱复原会产生较大的影响;从干涉光信号的输入到获得目标光谱的过程中要经过傅里叶变换,因此光谱仪各个系统单元的误差,如光学系统像差、采样信号的零点漂移和截断、电子线路的噪声等,都会使实际的干涉图偏离理想干涉图,并且通过傅立叶变换关系对复原光谱产生影响。本系统先通过实验、图像处理等方法消除或减小上述误差对复原光谱的影响,通过对干涉图过零采样数据的处理,运用相位校正算法,消除非零点采样造成的影响,再进行辐射和光谱校正过程,从而得到定标参数。

4.7 系统杂散光分析

首先对该微型空间调制 FTIR 的光机结构进行系统建模,将该仪器分为照明系统、干涉系统和探测系统 3 个模块^[14],如图 41 所示,其中 1 为照

明系统,2 为干涉系统,3 为探测系统。

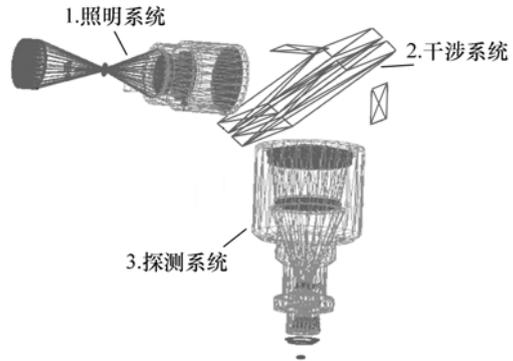


图 41 微型空间调制 FTIR 的结构建模

Fig. 41 Model of micro-FTIR in simulation environment

首先计算该系统的点源透过率 PST,从而确定系统的杂散光水平。对成像光阑口径分别为 3、5、7 和 8 mm 四种情况时,计算系统的点源透过率,计算结果如图 42 所示。

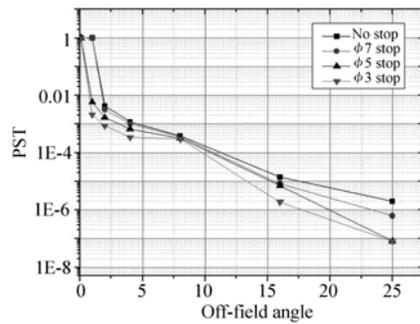


图 42 不同光阑口径下点源透过率随离轴角变化
Fig. 42 PST versus off-field angle at different stop diameter

当离轴角为 2°时,不同光阑口径下点源透过率均在 10⁻³左右,因此,需要对杂散光来源及分布比例进行分析计算。通过分析,探测器表面的杂散光主要有 3 个来源:光学元件透射面的反射引入的鬼像、机械结构散射杂散光和机械部件的红外辐射杂散光。

对于光学元件透射面的反射带来的鬼像杂散光,过低的透过率会带来严重的鬼像问题,计算表明,能量占探测器接收总能量 0.05% 以上的鬼像来源如下:补偿板透射面反射带来的鬼像,占接收总能量的 19.2%;分束器透射面反射带来的鬼像,占接收总能量的 9.4%;准直镜左透射面反射

带来的鬼像,占接收总能量的 0.33%;成像镜上透射面反射带来的鬼像,占接收总能量的 0.16%。

对于机械结构散射引入的杂散光,首先采用光线追迹法找出光源直接照射表面和关键表面,追迹结果显示,光源直接照射表面位于准直镜筒内部,而关键表面位于成像镜筒内部。通过计算表明,机械结构散射杂散光能量占总杂散光能量的 0.048%。

对于机械结构红外辐射引入的杂散光,只有来自关键表面的红外辐射光可以直接到达探测器,因此只需考虑关键表面的红外辐射功率。计算表明,关键表面辐射杂散光能量占探测器接收总能量的 0.28%,其中 55% 来自光阑后表面。

由以上分析知各个杂散光来源对探测器处杂散光的贡献,其中鬼像能量约占总杂散光能量的 99%。因此,抑制杂散光应主要从抑制鬼像着手。

5 干涉图像处理与光谱复原

5.1 干涉图像处理

对于采集的干涉图像,首先需要对于干涉图像进行分割,将其拆分为 32×32 块对应不同采样光程差的干涉图元^[32]。采用区域分离的方法对干涉图像进行二叉树分解,先将干涉图像分解为 2×2 个区域,然后对每一个区域利用相似性准则进行检测,根据检测结果再将每个区域分解为 2×2 个区域,并继续应用相似性准则检测每一个区域,分解过程重复迭代,直到将干涉图像分解为 32×32 个区域为止,从而将干涉图像分解为 1 024 个干涉图元,如图 43 所示。

对含有 1 024 个采样点的干涉图序列进行寻址,寻找干涉图序列中灰度值最大的数据点,并将其标定为零光程差位置。找到零光程差采样点之后,就可以对于干涉图序列标定相应的光程差序列,从而实现干涉图序列与光程差序列之间的对应,如图 44 所示。

由于干涉图序列采样长度的限制,干涉图序列会在采样长度处突然截止,这就会导致复原光谱中谱线发生展宽,谱线两侧出现旁瓣振荡,从而降低系统的光谱分辨率与光谱信噪比。因此,需

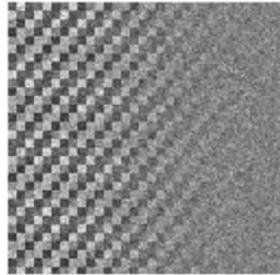


图 43 干涉图像

Fig. 43 Interferogram image

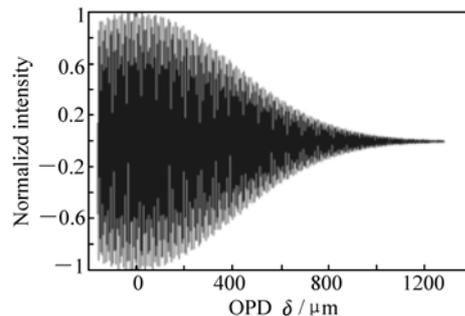


图 44 干涉图序列与光程差序列的对应关系

Fig. 44 Interferogram sequence versus OPD

要利用一个渐变的窗函数对突然截止的干涉图序列进行切趾来抑制复原光谱中谱线两侧的旁瓣振荡。系统采用过零光程差采样的方式,将整个干涉图序列拆分为小双边干涉图序列和大单边干涉图序列。对小双边干涉图序列利用三角形窗函数进行切趾,对大单边干涉图序列利用梯形窗函数进行切趾。

5.2 相位校正与光谱复原

由于多级微反射镜等光学元件制作精度与系统装调精度的限制,实际干涉图序列的采样位置相对于理想位置会存在一定的偏移,这就会导致复原光谱中附加有相位误差,因此需要对复原光谱进行相位校正^[32]。

进行相位校正利用零光程差一侧的大单边干涉图序列获得附加有相位误差的光谱,利用零光程差两侧的小双边干涉图序列获取相位误差,从而对误差光谱进行相位校正。对小双边干涉图序列进行离散傅里叶变换,将获得低光谱分辨率的相位误差。为了获得高光谱分辨率的相位误

差,可以采用插值法、补零法和延拓法3种提高光谱分辨率的方法。

插值法是将低光谱分辨率的相位误差进行插值运算,从而获得高光谱分辨率的相位误差。对小双边干涉图序列进行离散傅里叶变换后得到光谱序列,对光谱序列的相位函数作插值运算进行样条曲线拟合与二次采样,便可得到高光谱分辨率的相位误差。

补零法是将小双边干涉图序列进行补零,使其与大单边干涉图序列具有相同的长度。对小双边干涉图序列作补零处理,虽然不能提高光谱的实际分辨率,但可以提高光谱的表现分辨率,使其与大单边干涉图序列具有相同的光谱分辨率。

延拓法是对小双边干涉图序列进行周期延拓,使其与大单边干涉图序列具有相同的光谱分辨率。将小双边采样点进行周期延拓,然后取主值序列,就可以得到延拓后的小双边干涉图序列。

对大单边干涉图序列进行离散傅里叶变换将获得附加有相位误差的光谱的振幅与相位,再对

小双边干涉图序列利用插值、补零或延拓方法获得具有相同光谱分辨率的相位误差,从而便可以实现对复原误差光谱的相位校正。

为了实现更高精度的光谱相位校正,可以利用干涉图卷积法进行相位校正。通过对小双边干涉图序列进行离散傅里叶变换得到复原光谱的相位函数,进而得到相位解调因子,然后再对相位解调因子作一次离散傅里叶逆变换,便可以得到与小双边干涉图序列具有相同采样点数的干涉图解调函数序列。在作干涉图解调运算时,以循环卷积来计算线性卷积。将大单边干涉图序列和干涉图解调函数序列延长至线性卷积后的序列长度,延长部分均填充为零值。将补零后的大单边干涉图序列与补零后的干涉图解调函数序列作循环卷积运算,便可以得到理想的干涉图序列。再对理想的干涉图序列作一次离散傅里叶变换,便可反演出理想的光谱信息。

利用插值法、补零法、延拓法和卷积法4种方法获得的复原光谱如图45所示,归一化的校正光

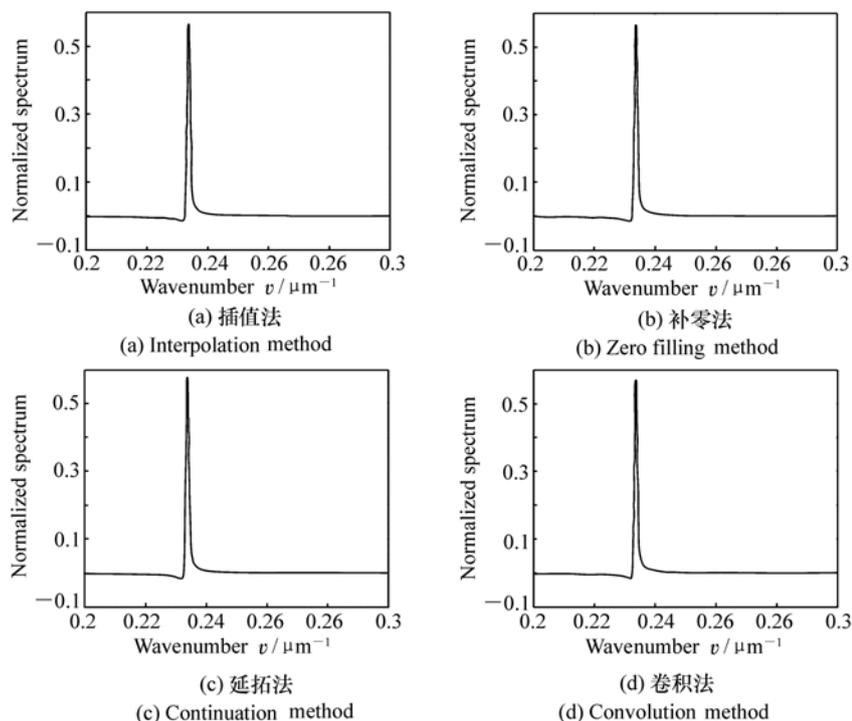


图45 利用不同的相位校正方法反演的光谱

Fig. 45 Recovered spectrum reversed by different phase correction methods

谱与理想光谱的标准偏差分别为 $\sigma_1 = 1.2730 \times 10^{-2}$, $\sigma_2 = 1.2728 \times 10^{-2}$, $\sigma_3 = 1.2572 \times 10^{-2}$, $\sigma_4 = 1.2088 \times 10^{-2}$ 。

将插值法、补零法、延拓法和卷积法进行比较,可以看出4种方法都可以对附加有相位误差的干涉图或光谱进行相位校正。其中卷积法的校正效果最好,但计算量较大;延拓法效果次之,然后是补零法,最后是插值法。因此,在实际工程应用过程中,根据不同的使用需求,可以选择合适的光谱反演算法进行干涉图数据的处理与复原光谱的反演。

6 原理样机与测试实验

利用机械设计软件对微型空间调制傅里叶变换红外光谱仪进行了二维结构布局与机械结构设计,微型光谱仪的结构布局如图46所示。

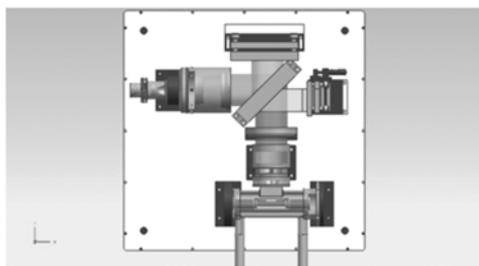


图46 微型傅里叶变换光谱仪二维结构布局

Fig. 46 Mechanical layout of micro-FTIR

由于系统装调精度的限制,两个多级微反射镜不可避免地会绕平行于坐标轴的轴线有一轻微的转动量,如图47所示。绕垂直于多级微反射镜轴线方向转动的影响可以忽略,而绕另外两个轴线方向转动会对系统采样带来较大的影响。当多级微反射镜绕X轴和Y轴方向产生倾斜时,平行于Z轴方向的光入射到多级微反射镜并被反射后偏离Z轴方向传播,从而使得光程差的分布发生变化,从而改变干涉图像的光强分布^[33]。

随着多级微反射镜倾斜角度的增加,系统光谱信噪比降低。故应根据系统光谱信噪比的性能要求,应尽量减小多级微反射镜的倾斜角度,提高系统光谱信噪比。

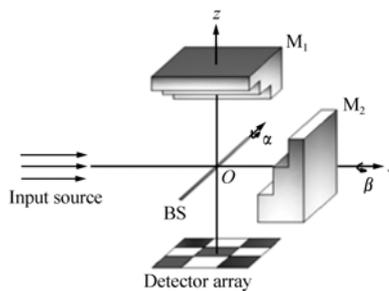


图47 干涉系统坐标示意图

Fig. 47 Sketch map of interferometric system

由于红外光不可见,因此在红外波段,充分借鉴传统光学系统的装调方法,利用有效的测试手段与检测仪器,应用基座的自对准标记或三维结构设计、微组装机方法、光学元件精确定位及系统计算机辅助装调方法,实现各个光学元件的精确对准,并保证各个光学元件的位置精度,进而实现红外光谱仪的模块化精密装调。整个系统主要分为光源照明模块、干涉模块和成像探测3个模块。

利用该光谱仪原理样机,进行了系统的图谱测试实验,图48为测试得到的干涉图。

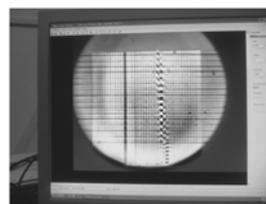


图48 测试得到的干涉图样

Fig. 48 Interferogram image from micro-FTIR

7 结论

微型空间调制 FTIR 以空间调制干涉系统为核心部件,利用两面多级微反射镜阵列对光程差进行调制,从而在二维空间获得干涉图像的采样阵列。由于采用空间调制干涉机构,因此系统具有微型化、轻量化、稳定性强、可靠性高、可进行实时探测与在线分析的优点。其主要特征包括:(1)微型空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪基于时间相干原理,采用空间调制方式,利用空间不

同位置获得不同光程差处的采样干涉图像。仪器采用两面多级微反射镜阵列对干涉图像进行空间采样,两面多级微反射镜正交摆放,程差互补。多级微反射镜的台阶数目由系统的光谱分辨率决定。(2)准直光学系统采用三片式结构,通过平场校正可以实现入射光场的均匀化;缩束系统采用远心光路结构,可以很好的实现像差的校正;分束器采用 ZnSe 基蒸镀分光膜系和增透膜系,分光膜层的反射率为 $(50 \pm 5)\%$,增透膜层的透过率大于 98% ;多级微反射镜可由 MOEMS 工艺完成。(3)光谱仪的光源为 SiC 材料,探测器为 MCT 焦

平面阵列,通过图像数据采集,以过零采样方式采集干涉图像,经过干涉图像信号分割拆分、加窗切趾、相位校正及快速傅里叶变换算法,实现由干涉图像到信号光谱的复原。(4)准直系统、缩束系统与红外分束器均按照设计指标完成了机械设计与加工检测,第一多级微反射镜利用 MOEMS 工艺完成了制备与测试,台阶高度标准差为 69.00 nm ,台阶表面粗糙度为 2.10 nm ;第二多级微反射镜台阶高度标准差为 $0.12\text{ }\mu\text{m}$,台阶表面粗糙度为 1.02 nm 。

参考文献(相关基金项目研究成果):

- [1] 孔廷梅,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.
KONG Y M, LIANG J Q, LIANG ZH Z, *et al.*. Developments of the micro modulating spectrometers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] KONG Y M, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al.*. Micro assembled Fourier transform spectrometer[J]. *SPIE*, 2009, 7283: 728304.
- [3] KONG Y M, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al.*. Novel micro Fourier transform spectrometer[J]. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2008, 14(1): 8-12.
- [4] LIANG J Q, LIANG ZH ZH, LV J G, *et al.*. Simulation and experiment of the static FTIR based on micro multi-step mirrors[J]. *SPIE*, 2011, 8191: 819104.
- [5] LV J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al.*. Design and manufacture of micro interference system in spatial modulation Fourier transform spectrometer[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 562-565: 973-978.
- [6] 孔廷梅,梁静秋,王波,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.
KONG Y M, LIANG J Q, WANG B, *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. (in Chinese)
- [7] 吕金光,梁静秋,梁中翥. 基于微光机电系统的傅里叶变换红外光谱仪[J]. 光学精密工程, 2011, 19(增刊): 85-91.
LV J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Infrared Fourier transform spectrometer based on MOEMS technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(supp): 85-91. (in Chinese)
- [8] 孔廷梅. 可见-近红外微型傅里叶变换光谱仪的设计与仿真研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009: 29-31.
KONG Y M. Design and simulation of the micro Fourier transform spectrometer based on MOEMS in visible-near infrared [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009: 29-31. (in Chinese)
- [9] 吕金光,梁静秋,梁中翥. 窄带傅里叶变换光谱仪中平稳高斯噪声的理论分析[J]. 物理学报, 2012, 61(7): 070704.
LV J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Theoretical analysis on stationary Gaussian randomnoise in narrowband Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(7): 070704. (in Chinese)
- [10] 付建国. 静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统总体设计与仿真研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 31-33.
FU J G. Optical system design and simulation for static Fourier-transform infrared spectrometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 31-33. (in Chinese)

- [11] 吕金光. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪系统设计与信息处理研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2013:33-35.
LÜ J G. System design and information processing of spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,2013:33-35. (in Chinese)
- [12] FENG C,WANG B,LIANG ZH ZH,*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.
- [13] 付建国,梁静秋,梁中翥. 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.
FU J G,LIANG J Q,LIANG ZH ZH. Analysis of diffraction in Fourier-transform infrared spectrometer based on step mirrors[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2010,30(12):3203-3207. (in Chinese)
- [14] 冯聪. 基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪杂散光分析[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2011,19-29:36-50.
FENG C. Stray-light analysis of Fourier transform infrared spectrometer based on multistep mirrors[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,2011,19-29:36-50. (in Chinese)
- [15] FENG C,LIANG J Q,LIANG ZH ZH. Spectrum constructing with nonuniform sample using least-squares approximation by cosine polynomials[J]. *Applied Optics*,2011,50(34):6377-6383.
- [16] 付建国,梁静秋,梁中翥. 扩展光源对微型 FTIR 光谱复原的影响分析[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(6):1723-1726.
FU J G,LIANG J Q,LIANG ZH ZH. Influence of extended light source on spectral reconstruction in a microFTIR[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2011,31(6):1723-1726. (in Chinese)
- [17] 吕金光,梁中翥,付建国,等. 基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪中准直误差的分析[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(10):2865-2869.
LV J G,LIANG ZH ZH,FU J G,*et al.*. Analysis of collimation error in Fourier transform infrared spectrometer based on step mirrors[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2011,31(10):2865-2869. (in Chinese)
- [18] 吕金光,梁静秋,梁中翥,等. 空间调制型傅里叶变换红外光谱仪光场的均匀性研究[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(1):259-263.
LV J G,LIANG J Q,LIANG ZH ZH,*et al.*. Study on uniformity of optical field in static Fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2012,32(1):259-263. (in Chinese)
- [19] 王波,梁中翥,孔延梅,等. 用于微型光谱仪的硅基多级微反射镜的设计与制作研究[J]. 物理学报,2010,59(2):907-912.
WANG B,LIANG ZH ZH,KONG Y M,*et al.*. Design and fabrication of micro multi-mirrors based on silicon for micro-spectrometer[J]. *Acta Phys. Sin.*,2010,59(2):907-912. (in Chinese)
- [20] LIANG ZH ZH,FU J G,FENG C,*et al.*. Design and demonstration of micro multi-step mirrors and light source in micro FTIR[C]. Proceedings of the 2011 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Kaohsiung,Taiwan,China,Feb.,2011.
- [21] 王波. 可见-近红外微型空间调制光谱仪关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010:67-77.
WANG B. Study of the key technology of the micro Fourier transform spectrometer in visible-infrared[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,2010:67-77. (in Chinese)
- [22] 郑莹,梁中翥,梁静秋. 红外光谱仪多级微反射镜模拟分析及制作研究[J]. 光学学报,2011,31(12):1222005.
ZHENG Y,LIANG Z Z,LIANG J Q. Simulation and fabrication of multi-micromirrors used in infrared spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*,2011,31(12):1222005. (in Chinese)

- [23] ZHENG Y, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Design and fabrication of step mirrors used in space-modulated Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1):884-892
- [24] 郑莹. 静态傅里叶变换红外光谱仪关键器件研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013: 72-78.
ZHENG Y. Study of key components used in static Fourier transform infrared spectrometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013:72-78. (in Chinese)
- [25] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 多级反射镜阵列 Monte Carlo 法误差合成与统计分析[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 220701.
LÜ J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Error synthesis and statistical analysis on stepped mirror array by Monte Carlo method[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(22):220701. (in Chinese)
- [26] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪干涉系统透射效率研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3):850-854.
LÜ J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, et al.. Study on transmission efficiency of interference system in spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(3):850-854. (in Chinese)
- [27] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 空间调制傅里叶变换光谱仪分束器色散特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(14):140702.
LÜ J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Study on chromatic dispersion of beam splitter in spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(14):140702. (in Chinese)
- [28] 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.
LÜ J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, et al.. Analysis of wedge error of beam splitter in spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10):1030001. (in Chinese)
- [29] 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.
FU J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2):0222006. (in Chinese)
- [30] 姜承志, 梁静秋, 梁中翥, 等. 准直系统对静态傅里叶变换光谱仪的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1):274-278.
JIANG C Z, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, et al.. Influence of collimation system on static Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(1):274-278. (in Chinese)
- [31] 付建国, 梁静秋, 梁中翥. 静态傅里叶变换红外光谱仪的公差分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6):0607002.
FU J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Tolerance analysis for a static Fourier-transform infrared spectrometer based on multi-micro mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6):0607002. (in Chinese)
- [32] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 空间采样傅里叶变换光谱仪光谱反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6):1694-1699.
LÜ J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Study on spectrum inversion of spatially modulated Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6):1694-1699. (in Chinese)
- [33] 郑莹, 梁静秋, 梁中翥. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪多级微反射镜倾斜误差分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7):1999-2002.
ZHENG Y, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. Analysis of multi-micromirrors tilt error in space-modulated Fourier transform infrared spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7):1999-2002. (in Chinese)

项目负责人团队照片



项目负责人简介:

梁静秋(1962—),女,研究员,博士生导师。1984年于吉林大学获学士学位。2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位。1984年~1993年从事半导体材料、工艺、微波器件及光电子器件研究。自1994年开始,一直从事微光机电系统(MOEMS)及微结构光学领域的科研工作。作为负责人主持了国家自然科学基金、国家攀登计划、国家863计划及吉林省科技发展计划项目等研究课题29项,作为骨干参与完成课题20余项,研究内容包括MOEMS微型干涉仪、傅里叶变换光谱仪、可编程波长信道选择器等微小光学系统研究,微型传感器、驱动器、微型可调谐红外滤光器、微型LED阵列、高能X射线聚焦组合透镜、光开关、光纤图像分割器等器件研究以及三维微细加工技术研究。发表学术论文200余篇;以第一发明人获得授权的中国发明专利22项,实用新型专利13项,并被评为2006年吉林省知识产权工作先进个人;培养博士、硕士研究生30余名。

研究团队介绍:

微光学器件与系统课题组成立于2004年,依托于长春光机所应用光学国家重点实验室,主要从事光通信、微显示、微成像、微传输、微型光谱仪及其在微系统与信息处理中的应用开发研究,先后承担国家及省部级科研项目40余项。主要研究方向包括:1)微小型傅里叶变换红外光谱仪及红外成像光谱仪;2)微型平面及柔性LED等微显示器件研究;3)MOEMS光开关及波长信道选择器等光通信器件研究;4)X射线组合透镜及微透镜阵列等微成像器件研究;5)光纤传像束及光纤变维器等微传输器件研究;6)计算电磁场与光子晶体的基础理论研究等。课题组是一支富有创新性和凝聚力的学术团队,近几年先后主持完成了国家自然科学基金6项(其中1项为仪器专项),国家863计划项目1项,国家重点

实验室自主基金 1 项,以及多项省市级科研课题等。课题组现有研究员 3 人,助理研究员 2 人,以及研究实习员 1 人。目前在读博士研究生 10 人,硕士研究生 6 人;培养已毕业博士、硕士研究生 30 余人。课题组具有良好的学术氛围,在 OPTICS EXPRESS、OPTICS LETTERS、APPLIED OPTICS、J. Opt. Soc. Am. B 等国内外著名学术期刊及 SPIE、IEEE 等国际学术会议上发表论文 100 多篇,其中被 SCI、EI 收录论文 80 余篇,并在相关国际学术会议上作邀请报告 1 次,承办国际学术会议一次。申请国家发明专利 60 多项,其中已授权 30 余项。

基金项目简介:

1. 项目名称:空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究
2. 项目类型:国家自然科学基金科学仪器基础研究专项基金项目
3. 批准号:No. 61027010
4. 项目的特色与创新之处:

(1) 提出将两个多级微反射镜阵列引入到傅里叶变换光谱仪中,代替传统光谱仪中的动镜,实现了光谱仪静态化。

(2) 将 MOEMS 加工及集成技术引入到光学系统的制作和装调中,可实现仪器的小型化。

(3) 提出了多级微反射镜的 MOEMS 制作方法,解决了传统光学仪器加工方法无法实现高精度微小多级台阶加工的问题,实现了宽光谱测量功能。