第 41 卷 第 18 期/2021 年 9 月/光学学报 研究论文

光学学报

新型静态傅里叶变换光谱仪干涉系统仿真与分析

郑莹[1*]，吕金光[2]

[1]沈阳理工大学理学院，辽宁 沈阳 110159；

[2]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033

摘要 提出了一种新型静态傅里叶变换光谱仪(FTS)。在该光谱仪的干涉系统中，采用两个具有周期性结构的微反射镜代替马赫-曾德尔干涉系统的平面镜，不仅无任何驱动部件，还无回溯光产生，进而实现了 FTS 的静态化和高光通量。介绍了静态 FTS 的工作原理，建立了基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统模型，仿真得到了该干涉系统的干涉图和频域光谱图。与理想情况的结果相比，仿真得到的干涉图中条纹对比度下降且边缘区域较为严重，仿真得到的频域光谱图中主频峰值降低且基线噪声明显。分析表明，在光束倾斜入射时，两个微反射镜的阶梯式周期性结构不仅会造成干涉光场的能量分布不均匀和两束相干光束偏离，还会引起衍射效应。仿真结果表明，增加两个微反射镜子反射面的个数和子反射面的长度可以有效减小干涉图中信息的失真。进一步地，在满足光谱仪性能的前提下，减小两个微反射镜子反射面的阶梯间隔可获得理想的频域光谱图。

关键词 光谱学；傅里叶变换光谱仪；马赫-曾德尔干涉系统；微反射镜

中图分类号 O433.4 **文献标志码** A **doi**：10.3788/AOS202141.1830001

Simulation and Analysis of Interference System in Novel Static Fourier Transform Spectrometer

Zheng Ying[1*], Lü Jinguang[2]

[1] *School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning* 110159, *China*;

[2] *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

Abstract A novel static Fourier transform spectrometer (FTS) is proposed. The interference system of the spectrometer uses two micro mirrors with periodic structure to replace the plane mirrors in the Mach-Zehnder interference system, without any driving parts and generation of backtracking light, which realizes the static state and high optical flux of the FTS. In this paper, the working principle of static FTS is introduced, the Mach-Zehnder interference system model based on micro mirrors is established, and the interferogram and spectrogram in frequency domain of the interference system are obtained by simulation. Compared with the ideal results, the fringe contrast is reduced and the reduction in the edge area is more serious in the interferogram obtained by simulation, and the peak value of the main frequency is reduced and the baseline noise is obvious in the spectrogram in frequency domain obtained by simulation. The analysis shows that when the incident beam is inclined, the stepped periodic structure of two micro mirrors will not only cause the uneven energy distribution of the interference light field and the deviation of two coherent beams, but also cause the diffraction effect. The simulation results show that the distortion of information in interferogram can be effectively reduced by increasing the number of subreflectors of two micro mirrors and the length of subreflectors. Furthermore, the ideal spectrogram in frequency domain can be

收稿日期：2021-03-08；**修回日期**：2021-03-28；**录用日期**：2021-04-07

基金项目：国家自然科学基金(61805239)、中国科学院青年创新促进会基金(2018254)、沈阳理工大学引进高层次人才科研项目(1010147000805)、辽宁省教育厅面上青年人才项目、沈阳理工大学科研创新团队建设计划资助项目

通信作者：*opticszhy@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

obtained by reducing the step interval between the subreflectors of the two micro mirrors under the premise of satisfying the performance of the spectrometer.

Key words spectroscopy; Fourier transform spectrometer; Mach-Zehnder interference system; micro mirror

OCIS codes 300.6190; 300.6300; 120.4820; 230.4040

1 引 言

光谱仪可用于液体、固体或气体物质的定性和定量分析，在石油化工、环境检测、医药卫生以及军事侦察等领域得到了广泛的应用[1-3]。其中，基于调制原理的傅里叶变换光谱仪(FTS)具有高通量、高信噪比等优势[4-6]，进而受到了国内外研究者们的重视。此外，为了满足各个应用领域对 FTS 的在线监测和实时检测以及对迅变目标的光谱探测的需求，迫切需要实现 FTS 的微小型化、轻量化和静态化[7-9]。为此，国内外众多科研院校陆续对 FTS 进行研究，多以传统的迈克耳孙干涉仪结构为基础，通过引入棱镜[10]、角镜[11]或者多级微反射镜[12-14]等光学元件的方式来实现对干涉信息的空间调制。虽然光谱仪具备结构紧凑、体积小、重量轻等优点，但是干涉图的获取是基于迈克耳孙干涉原理的，这存在很多局限性。在迈克耳孙干涉中，光束要经过分束器两次，总有一半光通量返回入射端，这不仅造成了光通量的损失，限制了 FTS 的信噪比，还对杂散光的抑制提出了更高的要求。因此，本文提出了一种新型静态 FTS 结构。该结构在马赫-曾德尔干涉系统的基础上，用两个具有不同结构参数的微反射镜替代两个平面反射镜，实现了空域的同步采样。在入射光通量相同时，这种结构可以有效避免回溯光的产生，使得全部光通量都得到利用，大大提高了光谱仪的性能，尤其在光信号较弱的应用场合，如深空探测等，具有重要的意义。

基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统是整个光谱仪的核心结构，对实现光谱仪的性能至关重要。本文利用光学软件对马赫-曾德尔干涉系统进行了建模，将仿真得到的干涉图和频域光谱图与理想情况进行了比较，分析和讨论了干涉图对比度下降和频域光谱图失真的原因，并提出了有效的解决方法。

2 基本原理

图 1 是新型静态 FTS 示意图。新型静态 FTS 主要由前置光学系统、干涉系统和后置信号处理系统组成，其工作过程是：1)光源发出的光束经前置光学系统准直后得到平行光。2)平行光到达第一个分束器后被分成两束光，两束光被分别投射到两个微反射镜的反射面上。3)具有不同空间位置的反射面使得反射后光线的相位发生变化。4)反射光在第二个分束器处相遇，发生干涉。5)干涉图像分别被两个探测器接收。6)干涉图像经差分放大、傅里叶变换[15]等方式处理后得到相应的光谱曲线图。

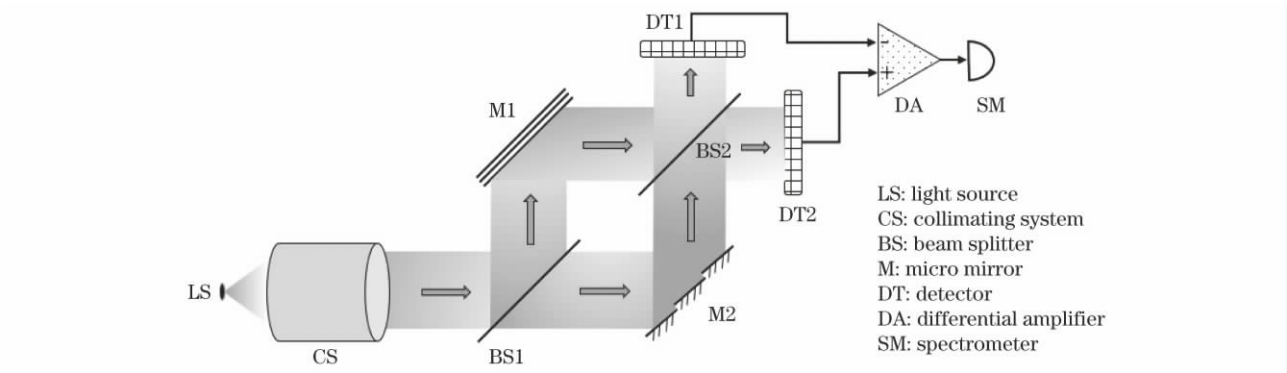

图 1 新型静态 FTS 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of novel static FTS

在新型静态 FTS 中，两个微反射镜呈阶梯状，都有 N 个子反射面，每个子反射面的长度为 l，宽度为 w。两个微反射镜的子反射面的阶梯间隔不同，第一微反射镜的子反射面的阶梯间隔为 h_1，第二微反射镜的子反射面的阶梯间隔为 h_2，两个微反射镜的结构参数遵循奈奎斯特采样定理和光程差互补原则。将两个微反射镜正交摆放，形成 N^2 个具有不同光程差的干涉图采样阵列，其中第 p 行第 q 列干涉图元对应的光程差为 $\delta_{p,q}=(Nq-p)\Delta$，$\Delta$ 为采样间隔。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 系统建模与仿真实验

3.1 干涉系统建模

图 2 是基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的简化模型。以第一个分束器 BS1 中心为原点，建立 XYZ 右手直角坐标系，第一个微反射镜 M1 和第二个微反射镜 M2 分别位于 Y 轴和 Z 轴上。图中不同灰度颜色代表不同的子反射面，两个微反射镜的子反射面和两个分束器表面均与水平面成 45°。在这个简化模型中，通过追迹一定量的光线，且合理匹配像素数目，探测器可接收到干涉信息，干涉信息经离散傅里叶变换运算后，可反演出频域光谱信息。

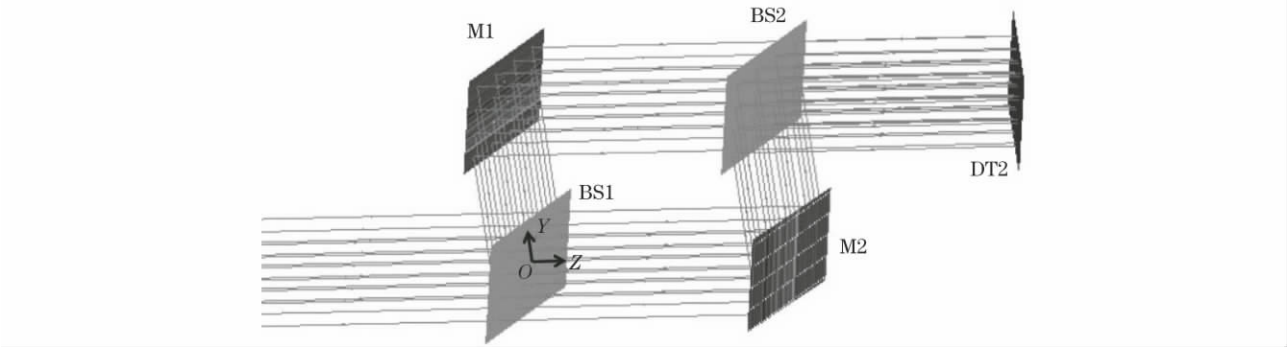

图 2 基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的简化模型

Fig. 2 Simplified model of Mach-Zehnder interference system based on micro mirrors

在该模型中，没有考虑任一光学元件引起的像差和缺陷，且沿着传播路径的任何孔径都足够大，不会对波前的传播产生显著的干扰。此外，假设两个分束器均处于理想情况下，即分光比为 50%。

3.2 仿真实验

假定入射光源为单谱线红外光源，波数 ν 为 2500 cm^{-1}。图 3 为当 $h_1=1.06$ μm 时基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的干涉图。其中，图 3(a)是理想干涉图，图 3(b)是仿真得到的干涉图。可以发现，仿真得到的干涉图中局部区域发生退化，特别是边缘区域，条纹对比度下降较为严重。

根据光程差与干涉光场空间分布的对应关系，对图 3 中的二维干涉图进行等间隔采样和快速傅里叶变换处理，而后对得到的频域光谱图进行归一化处理。图 4 为当 $h_1=1.06$ μm 时基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的频域光谱图。其中，图 4(a)是理想频域光谱图，图 4(b)是仿真得到的频域光谱图。可以发现，仿真得到的频域光谱图中光谱主频峰值下降，且在光谱基线上有起伏变化的噪声，系统的信噪比降低。

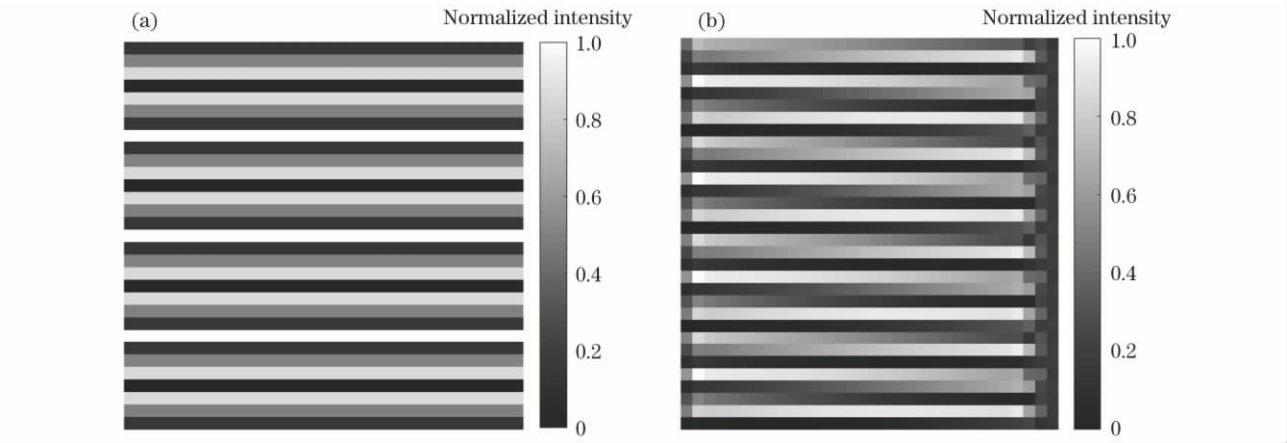

图 3 当 $h_1=1.06$ μm 时，基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的干涉图。(a)理想干涉图；(b)仿真得到的干涉图

Fig. 3 Interferograms of of Mach-Zehnder interference system based on micro mirrors when $h_1=1.06$ μm. (a) Ideal interferogram; (b) interferogram obtained by simulation

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

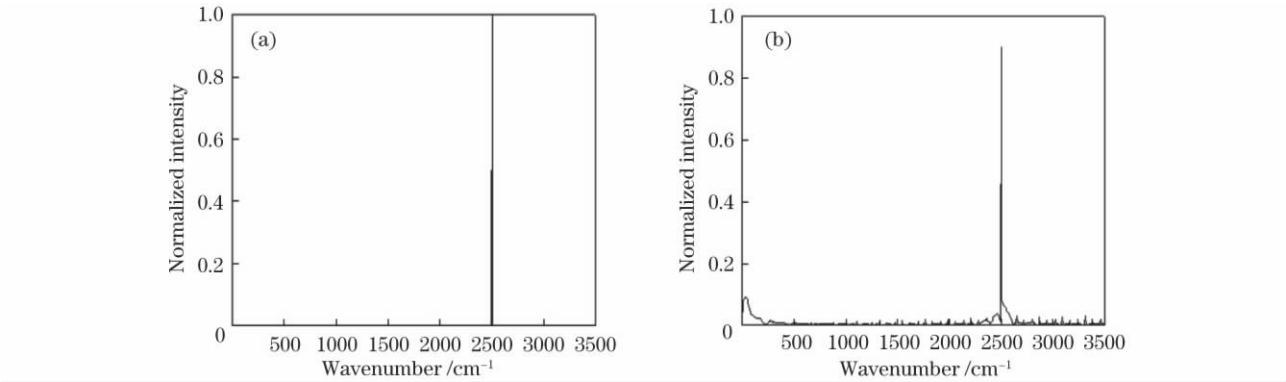

图 4 当 $h_1=1.06$ μm 时，基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的频域光谱图。(a)理想频域光谱图；(b)仿真得到的频域光谱图

Fig. 4 Spectrograms in frequency domain of Mach-Zehnder interference system based on micro mirrors when $h_1=1.06$ μm. (a) Ideal spectrogram in frequency domain; (b) spectrogram in frequency domain obtained by simulation

4 分析与讨论

在基于迈克耳孙干涉原理的 FTS 中，经分束器分束后的两束光大多是垂直入射到反射镜的反射面上的，利用动镜驱动方式[16]或反射镜特有的结构[10-14]可实现干涉系统在不同光程差下的采样。而在静态 FTS 中，经第一个分束器分束后的两束光是以 45°角入射到两个正交摆放的微反射镜各个子反射面上的。图 5 是当 $N=3$ 时第二个微反射镜 M2 上的光线追迹示意图。图 5 中 1、2、3 分别代表第二个微反射镜的三个子反射面。在入射光线不变的基础上，将第二个微反射镜绕中心线旋转 90°，并将子反射面的阶梯间隔由 h_2 改为 h_1，即可得到第一个微反射镜 M1 的光线追迹图。从图 5 可以看出，第二个微反射镜在光束斜入射的情况下，除 1 处的反射面外，其余子反射面的反射光束宽度均相同，且相邻反射光束不连续。微反射镜的阶梯状周期性结构必然会带来一定的衍射效应，为忽略子反射面宽度大小带来的衍射效应的影响[17-18]，在仿真实验中，设定微反射镜子反射面的宽度大于所研究波段最大波长的 100 倍。因此这里的衍射效应主要体现在边缘反射面处，边缘反射面光场的突然截止所产生的衍射条纹加重了微反射镜边缘反射光束较宽导致的边缘效应对干涉光场的影响。

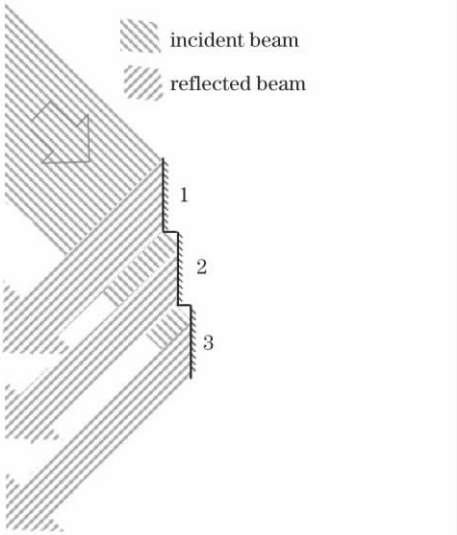

图 5 当 $N=3$ 时，第二个微反射镜 M_2 上的光线追迹示意图

Fig. 5 Schematic diagram of ray tracing on the second micro mirror M_2 when $N=3$

为了抑制边缘效应对干涉光场分布的影响，需要将边缘反射光束对干涉光场的影响转移，让边缘反射面具有与其他子反射面相同的反射光束宽度和衍射效应。可采取的方法是在不改变零光程差位置的前提下，在两个微反射镜中增加 M 个子反射面，并扩大子反射面的长度为 $l+Mw$，使得原有的干涉光场阵列被附加的干涉图像所包围。在对新得到的干涉图信息进行光谱复原时，只对原有的干涉图信息进行运算。图 6 为当 $h_1=1.06$ μm时，不同 M 下第二个微反射镜各个子反射面反射的能量分布图。可以看出，原有边缘反射面引起的边缘效应被转移到附加的子反射面上。由此可以推出：继续增加子反射面个数和子反射面长度，可以保证探测器接收到的原有结构各个子反射面的反射光束能量基本一致。

图 7 是当 $h_1=1.06$ μm，$M=6$ 时，仿真得到的基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的干涉图和频域光谱图。与图 3(b)相比，可以发现，增加子反射面个数和子反射面长度可有效抑制边缘效应引起

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

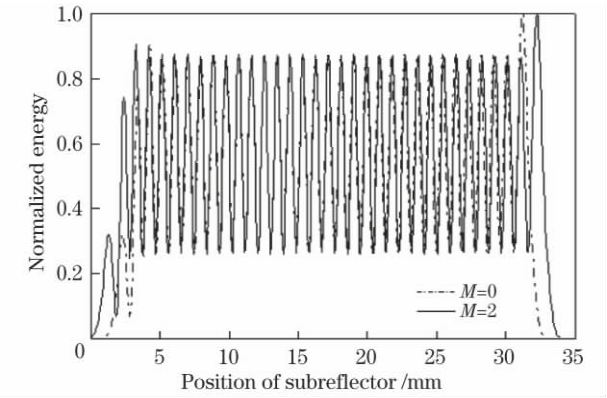

图 6 第二个微反射镜 M_2 上各子反射面反射的能量分布

Fig. 6 Energy distributions reflected by subreflectors on the second micro mirror M_2

的干涉信息失真现象。与图 4(b)相比，可以发现，增加子反射面个数和子反射面长度后的频域光谱图中只存在主频谱线，基线噪声和零频处的噪声均消失。

图 7(b)表明增加子反射面个数和子反射面长度可以在很大程度上抑制边缘效应对频域光谱图的影响，但与图 4(a)中的理想频域光谱图相比，图 7(b)中的主频谱线存在一定展宽，该现象与子反射面的阶梯间隔有关。从对图 5 的分析可知，阶梯间隔的存在使得微反射镜子反射面的反射光束不连续，且子反射面阶梯间隔越大，连续性越差。根据光谱仪的工作原理，N^2 个光程差空间阵列分布及大小是由两个微反射镜的相对位置和阶梯间隔决定的，在光束斜入射到两个微反射镜的子反射面上时，经子反射面反射的两束相干光存在偏离，且子反射面阶梯间隔越大，两束相干光的偏离越大。图 8 是当 $h_1=0.5$ μm，$M=6$ 时，基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的理想频域光谱图和仿真得到的频域光谱图，可以看出，仿真得到的光谱图比较接近理想情况。

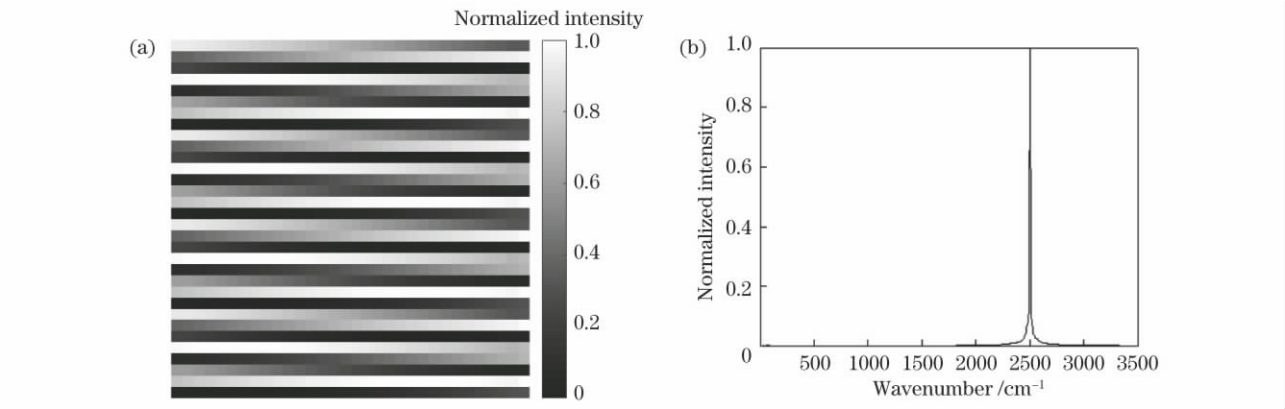

图 7 当 $h_1=1.06$ μm，$M=6$ 时，仿真得到的基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的干涉图和频域光谱图。(a)干涉图；(b)频域光谱图

Fig. 7 Interferogram and spectrogram in frequency domain of Mach-Zehnder interference system based on micro mirrors by simulation when $h_1=1.06$ μm and $M=6$. (a) Interferogram; (b) spectrogram in frequency domain

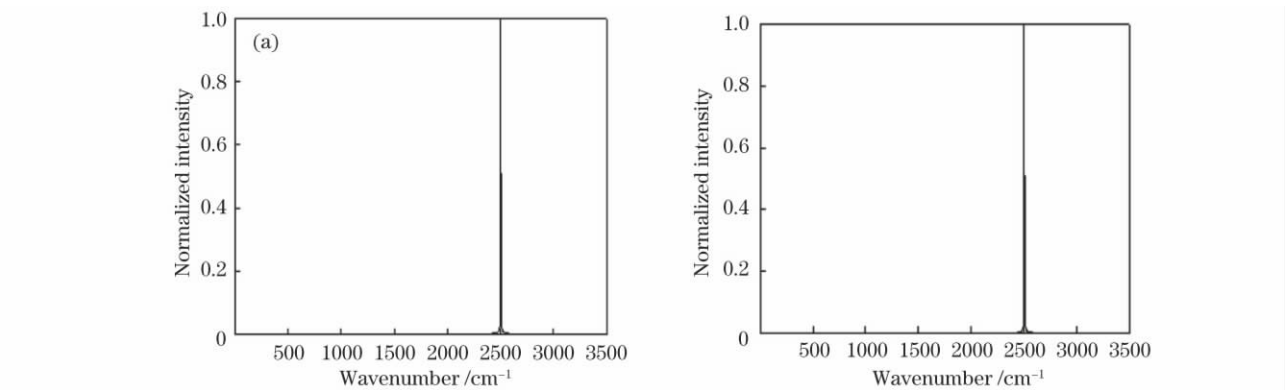

图 8 当 $h_1=0.5$ μm，$M=6$ 时，基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统的频域光谱图。(a)理想频域光谱图；(b)仿真得到的频域光谱图

Fig. 8 Spectrograms in frequency domain of Mach-Zehnder interference system based on micro mirrors when $h_1=0.5$ μm and $M=6$. (a) Ideal spectrogram in frequency domain; (b) spectrogram in frequency domain obtained by simulation

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

综上所述，根据光谱仪的工作波段，在两个微反射镜的结构参数满足奈奎斯采样定理和系统分辨率设计要求的基础上，遵循光程差互补原则，缩小微反射镜子反射面的阶梯间隔并增加两个微反射镜的子反射面个数和子反射面长度，可以有效解决边缘效应和主频谱线展宽问题，最终可以得到一个满足光谱仪设计要求的干涉系统结构。但两个微反射镜反射面个数的增加可能会使制作工艺的难度加大。因此，在干涉系统设计的过程中，两个微反射镜的结构参数除了必须满足奈奎斯采样定理和系统性能的要求，还要兼顾两个微反射镜工艺实现的难易程度，进而确定最终合适的结构参数。

5 结　　论

提出一种基于马赫-曾德尔干涉系统的 FTS。在该光谱仪的干涉系统中，采用两个具有周期性结构的微反射镜代替马赫-曾德尔干涉系统的平面镜，不仅无任何驱动部件，还无回溯光产生，进而实现了 FTS 的静态化和高光通量。在光谱仪基本工作原理的基础上，利用光学软件建立基于微反射镜的马赫-曾德尔干涉系统模型。仿真的干涉图中干涉条纹对比度下降，边缘处下降尤为严重。仿真的频域光谱图中主频峰值下降，基线噪声明显。造成这些现象的原因是：1)入射光束是斜入射到微反射镜各个子反射面上的。2)微反射镜的特有结构决定了各个子反射面的反射光束宽度不同、相邻反射光束不连续以及两束相干光束存在偏离。3)微反射镜本身存在的衍射效应。

通过仿真发现，增加子反射面个数和子反射面长度可以有效抑制边缘效应，大大提高系统的信噪比，但存在主频谱线展宽的现象。主频谱线展宽现象又与子反射面的阶梯间隔密切相关。因此，根据光谱仪的工作波段，在两个微反射镜的结构参数满足奈奎斯采样定理和系统分辨率设计要求的基础上，遵循光程差互补原则，缩小微反射镜子反射面的阶梯间隔并增加两个微反射镜的子反射面个数和子反射面长度，可以有效解决边缘效应和主频谱线展宽问题，最终可以得到一个满足光谱仪设计要求的干涉系统结构。

参 考 文 献

[1] Du S, Zhang G Y, Han X X, et al. Design of wide-spectrum high-resolution spectral analysis system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 083003.
杜杉，张国玉，韩欣欣，等. 宽光谱高分辨率光谱分析系统设计[J]. 激光与光电子学进展，2019，56(8)：083003.

[2] Zhong H. Design and analysis of micro-spectrometer with high resolution and wide spectral range[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 153004.
钟卉. 高分辨率宽光谱范围微型光谱仪的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(15)：153004.

[3] Liu L X, He D, Li M Z, et al. Identification of Xinjiang jujube varieties based on hyperspectral technique and machine learning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1111002.
刘立新，何迪，李梦珠，等. 基于高光谱技术与机器学习的新疆红枣品种鉴别[J]. 中国激光，2020，47(11)：1111002.

[4] Schardt M, Murr P J, Rauscher M S, et al. Static Fourier transform infrared spectrometer[J]. Optics Express, 2016, 24(7): 7767-7776.

[5] Yu F, Wen Q, Lei H J, et al. Research progress in key technologies on near infrared micro spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100003.
庾繁，温泉，雷宏杰，等. 微型近红外光谱仪关键技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(10)：100003.

[6] Li Z G, Wang S R, Li F T. Fourier transform spectrometer for ultraviolet and vacuum ultraviolet regions[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(4): 459-462.
李志刚，王淑荣，李福田. 紫外-真空紫外傅里叶变换光谱仪[J]. 光学学报，2001，21(4)：459-462.

[7] Wallrabe U, Solf C, Mohr J, et al. Miniaturized Fourier transform spectrometer for the near infrared wavelength regime incorporating an electromagnetic linear actuator[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 123/124: 459-467.

[8] Sardari B, Davoli F, Özcan M. A simple configuration for static Fourier transform infrared spectrometers[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9899: 98990T.

[9] Gao J H, Liang Z Z, Liang J Q, et al. Spectrum reconstruction of a spatially modulated Fourier transform spectrometer based on stepped mirrors[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(6): 1348-1356.

[10] Huang C Y, Wang W C. Birefringent prism based Fourier transform spectrometer[J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1559-1561.

[11] Lian Y S, Liao N F, Lü H, et al. A novel spatial modulation Fourier transform spectrometer with adjustable spectral resolution[J]. Spectroscopy and

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Spectral Analysis, 2014, 34(11): 3136-3140.
廉玉生，廖宁放，吕航，等. 一种光谱分辨率可调的新型空间调制傅里叶变换光谱仪[J]. 光谱学与光谱分析，2014，34(11)：3136-3140.

[12] Zheng Y, Liang Z Z, Liang J Q. Simulation and fabracation of multi-micromirrors used in infrared spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222005.
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.

[13] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Analysis and restraint of alignment error by stepped micro-mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0330003.
吕金光，梁静秋，梁中翥，等. 多级微反射镜对准误差的分析与抑制[J]. 光学学报，2016，36(3)：0330003.

[14] Wang H L, Lü J G, Liang J Q, et al. Design and analysis of medium wave infrared miniature static Fourier transform spectrometer[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(6): 060702.
王洪亮，吕金光，梁静秋，等. 中波红外微型静态傅里叶变换光谱仪的设计与分析[J]. 物理学报，2018，67(6)：060702.

[15] Kauppinen J, Partanen J. Fourier transforms in spectroscopy[M]. Berlin: Wiley, 2001.

[16] Yu K, Lee D, Krishnamoorthy U, et al. Micromachined Fourier transform spectrometer on silicon optical bench platform[J]. Sensors and Actuators A, 2006, 130/131: 523-530.

[17] Moeller K D. Miniaturized wavefront-dividing interferometers without moving parts for field and space applications[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1992: 130-139.

[18] Fu J G, Liang Z Z, Liang J Q. Analysis of diffraction in Fourier-transform infrared spectrometer based on step mirrors[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(12): 3203-3207.
付建国，梁中翥，梁静秋. 基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪衍射效应分析[J]. 光谱学与光谱分析，2010，30(12)：3203-3207.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net