

基于 MOEMS 扫描微镜的近红外光谱仪分光系统结构

罗 彪, 温志渝*, 温中泉, 陈 李, 钱蓉蓉

重庆大学新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室, 微系统研究中心, 重庆 400044

摘 要 针对近红外光谱仪由于红外 CCD 导致的红外光谱仪高成本问题, 提出用 MOEMS 微镜阵列进行光路结构改进, 并且解决了红外光谱仪成像像斑不规则从而难以采用 MOEMS 微镜阵列进行光谱扫描的问题, 设计了一种新的分光成像结构。该结构基于全息凹面光栅理论来规则光谱成像的像斑, 采用光学设计软件 ZEMAX 和针对特定像差评判标准的优化算法, 按照像斑规则化的要求设计并优化了光路结构。该光路结构中的平场全息凹面光栅工作波长范围为 $900 \sim 1\,400\text{ nm}$ 。对设计结果分析表明: 在宽度为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 缝光源情况下, 分光系统的理论分辨率优于 6 nm , 像斑的可用尺寸约为 $0.042\text{ mm} \times 0.08\text{ mm}$ 。验证实例表明, 该设计满足了像斑规则化的要求, 可以使用 MOEMS 微镜进行光谱反射扫描, 验证了新型实用化 MOEMS 微镜阵列光谱仪模型的可行性, 在最后对探测器所处位置与微镜最大偏转角的关系进行了分析。

关键词 近红外光谱仪; 平场凹面光栅; 像散; ZEMAX; 微镜

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)11-3154-04

引 言

近红外光是指介于可见光区与中红外光区之间的电磁波, 波长约为 $780 \sim 2\,500\text{ nm}$ ^[1,2]。通过近红外光谱分析可以定量或定性的确定特定物质的组分^[3], 这种分析方法具有所需分析时间短、分析样品使用量少和分析结果稳定性好等优点, 近红外光谱分析主要利用分子的倍频与合频吸收, 从重叠、变动和复杂的光谱中提取出微弱信息, 属于微弱信号与多元信息的处理, 难度很大^[4]。必须寻求一种高效率、低损耗的分光光学系统结构使得能够充分利用光谱信息。采用全息记录技术获得的变间距曲线槽凹面光栅, 兼有色散和成像

功能, 具有高效率、低杂散光、无鬼线、高信噪比、小 F 数的特点, 同时具有校正像差的能力, 可以在一定波谱范围内成消像差的平场谱面, 因此采用全息凹面光栅为核心的分光系统可构成只有一个光学作用面的光谱仪器, 大大提高了光谱利用率。但是近红外光栅光谱仪中采用的红外 CCD 等阵列探测技术存在成本高、探测质量较单元探测器差等问题。采用 MOEMS 技术制造的静电微镜阵列进行光谱像斑反射扫描, 实现采用单个探测器进行快速光谱扫描探测, 可有效提高光谱探测信号的质量, 降低近红外光谱仪的成本^[5]。并且随着近红外光谱波长变大, 像差校正越困难、像斑变大且形状趋向于不规则(如图 1 所示), 因此无法使用微镜阵列进行像斑的反射扫描(因为静电微镜阵列单元镜面的面积通常很

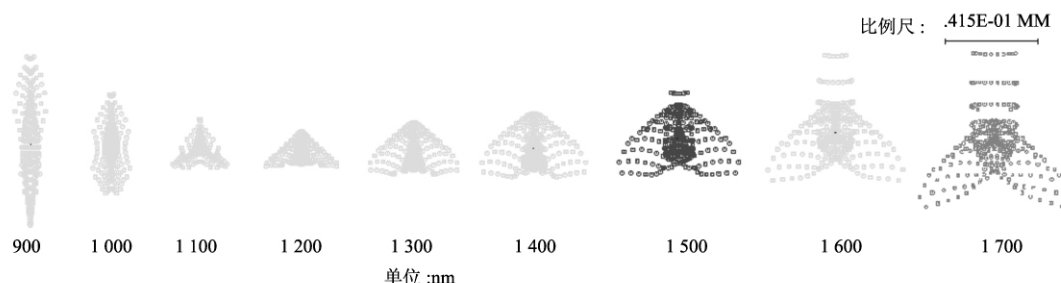


Fig 1 RMS spot of near-infrared spectrophotometer

收稿日期: 2010-10-19, 修订日期: 2011-03-22

基金项目: 国际科技合作与交流专项(863 计划)项目(2009DFB10440)和重庆市科技攻关计划项目(CSTC, 2008AC2006)资助

作者简介: 罗 彪, 1983 年生, 重庆大学光电工程学院博士研究生 e-mail: luobiaook@sina.com

* 通讯联系人 e-mail: wzy@cqu.edu.cn

小,而且为便于制造和控制,单元微镜的基本尺寸要求一致)。因此必须解决分光成像系统的像斑规则化问题,才能使用微镜阵列进行光谱反射扫描。本设计使用 ZEMAX 光学软件,并采用针对特定像差的评价标准和算法,对分光系统的结构以及凹面光栅的参数进行了优化设计,较好的解决了分光系统的像斑规则化问题。

1 原理和设计方法

凹面光栅是一种兼有分光和成像功能的光学元件,一般而言,由凹面光栅出射的光束截面呈椭圆形,但在两处退化为直线,称之为散焦线(分别称之为子午焦线和弧矢焦线)。在本设计中,结合子午焦线成像的特性和扫描微镜的特点,使用特定的优化标准对凹面光栅成像的像斑进行优化,使之规则化;然后在保留优化的像斑特性前提下,对整个光学结构进行平场化设计,从而有利于 MOEMS 微镜阵列的设计制造与控制。

根据前述的凹面光栅和微镜阵列的特点,光谱仪光学结构原理图如图 2 所示。狭缝可以近似看作是点光源;当光束入射到凹面光栅后,由于凹面光栅的分光成像作用,光谱成像后的平直谱面位于微镜阵列处,光谱像斑经过单元微镜或者多个单元微镜反射后到达单元探测器的光敏面(图 2 中以第 2 个微镜单元反射扫描为例,此时要求其他微镜单元处于不产生干扰光的偏置状态),依次改变扫描微镜的状态,从而采集到不同波长的光学能量信号,这些信号输入计算机后就可以进行光谱识别处理。

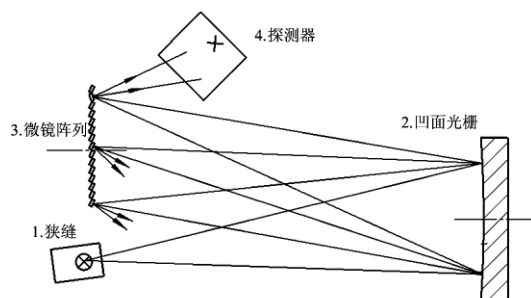


Fig 2 Structure of near-infrared spectrophotometer

全息凹面光栅的工作原理如图 3 所示,记录面为一半径 R 的球面,其中 $A_0(x, y, z)$ 为点光源,也就是待测光的入射点, $P(\xi, \omega, \tau)$ 为全息凹面光栅上的任意一点, $A'(x', y', z')$ 为光线 AOP 所对应的第 K 级衍射光线一点,即光谱信号的获取点。 $B_0(a_B, b_B, c_B)$ 及 $B'(a'_B, b'_B, c'_B)$ 是全息光栅的两个记录点。假设记录波长为 λ' , 工作波长为 λ , 则光程函数可以表示为

$$F = \langle A_0P \rangle + \langle PA' \rangle + mn\lambda \quad (1)$$

其中参数 n 是与记录条件相关的量,可以表示为

$$n = [(\langle B_0P \rangle - \langle PB' \rangle) - (\langle B_0O \rangle - \langle OB' \rangle)]/\lambda' \quad (2)$$

将光程函数用级数展开有

$$F = r_A + r_B + \sum_{i,j,k=0}^{\infty} F_{i,j,k} \omega^i \tau^j \chi^k \quad (3)$$

其中

$$F_{i,j,k} = M_{i,j,k} + m\lambda H_{i,j,k}/\lambda' \quad (4)$$

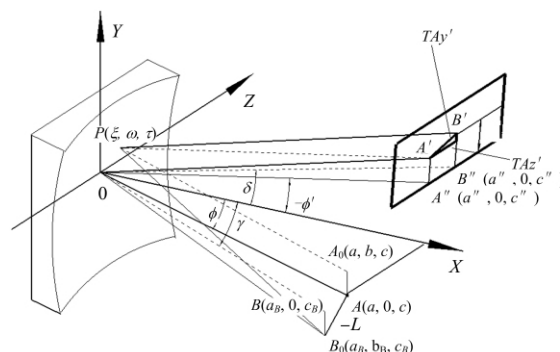


Fig 3 Schematic of flat-field holographic concave grating

高阶项 $F_{i,j,k} (i+j+k \geq 2)$ 表示入射光线经过凹面光栅分光成像以后不同类型的像差。由式(4)可知,在光源位置和像面位置一定的情况下,可以通过适当地选取记录点 B_0 和 B' 的位置,来减小某一像差系数,从而减小相应的像差,提高全息凹面光栅的成像质量。

在给定的 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ 工作波段内,为了消除某一像差,应该使对应的像差系数 $F_{i,j,k}$ 在给定的像面上的积分值达到最小,即要使积分值

$$\bar{F}_{i,j,k}^2 = \int_{\beta_{\lambda_1}}^{\beta_{\lambda_2}} [F_{i,j,k}(\alpha, \beta, r, r'; r, \delta, r_B, r_{B'}; R)]^2 d\beta \quad (5)$$

尽可能的小,这可以通过选择适当的球面基底半径 R 及两个记录点的位置参数 $\gamma, \delta, r_{B_0}, r_{B'}$ 来实现,这就是进行凹面光栅设计的基本理论论据。

在式(3)中, F_{200} 是水平聚焦条件,通常情况下优化设计时考虑优化成像点弥散圆的点列图直径。

2 光谱仪光学系统的设计与分析

2.1 系统设计的优化标准

在该设计在优化的过程中,首先忽略了对垂轴色差的校正,使得软件对每个视场都要计算一个独立的参考点,也使得评价函数独立优化各种色光,由此提高系统的分光效率。

此外,在优化函数的设计和在计算 PTV 标准下的 $X+Y$ 像斑评价函数时,有意改变相对 X 权重(relative X weight, 相对 X 权重是用来加在垂轴像差的 X 成分上的额外权重,这个权重的设计对其他评价函数没有影响),这个参数的控制对于那些有意形成间隙像的系统,特别是光谱仪系统,是十分有用的。如果相对 X 权重小于统一值,那么 Y 成分的权加得很重;如果这个相对 X 权重大于统一值,那么 X 成分得权加得很重;如果等于默认统一值,那么两个成分平等地加权基于这种评价函数标准的优化算法将努力减小 PTV 误差范围。经过 ZEMAX 光学设计软件对近红外波段的平场凹面光栅的光学系统级设计,使光谱成像面平场化,并且成像后像斑变得规则,因此后续微镜阵列的设计制造变得容易。优化过程中,依据优化函数(6)及成像质量和其他要素,不断

调整优化函数中的 W_i , T_i , 使得 MF^2 达到最小, 达到成像质量要求。式中 MF^2 为优化函数值; W_i 为不同像差的权重, T_i 为优化参数的目标值, V_i 为优化参数的当前值。

$$MF^2 = \frac{\sum_{i=1}^N W_i (V_i - T_i)^2}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (6)$$

在设计过程中, 主要关注象散的像差系数和该象散在优化函数中的权重。即着重注意软件中 ASTI 等优化操作数对成像结果的影响。

2.2 设计结果

按照前述的设计方法和上述操作对系统进行了优化设计, 由于经过凹面光栅分光成像后光谱的像斑是连续分布的, 在极大和极小波长处成像质量最差, 所以本设计重点考虑边界波长处的像斑外形, 得出如图 4 所示的点列图, 从中可以发现, 像斑较为规则(与图 1 比较)、紧凑。

Table 1 Optical parameters

缝宽 / μm	工作波长 /nm	物方数值 孔径	d / mm	成像面 长度/mm	分辨率 /nm
50	900~1 400	0.21	60	3.6	6

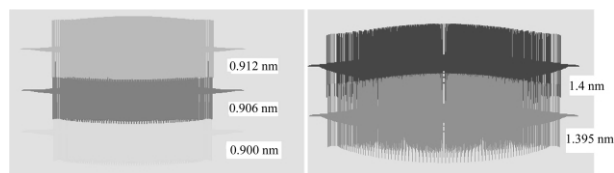


Fig 4 Spot fan

并且从图中还可以得出, 此系统成像像斑在纵向最大可以利用的尺寸为 0.043 mm, 最小可以利用的尺寸为 0.04 mm, 满足了使用微镜阵列进行光谱扫描的要求。所得设计的相关光路参数如表 1 和图 2 所示。

2.3 设计结果的验证与讨论

为了验证设计结果, 在图 3 中的成像面位置放置微镜阵列, 对成像斑进行反射扫描。图 5 示例的是通过微镜阵列(红色虚线方框内)对光谱进行逐个反射扫描的效果图。其中图 5(a)为第一个像斑被微镜反射扫描的效果图, 图 5(b)为第二个像斑被微镜扫描的效果图, 由图可知, 虽然在微镜边缘处存在漏光的现象, 但是由于所设计分光系统成像像斑的质量较好的满足了最初的要求, 使得微镜阵列可以对光谱进行反射扫描, 同时也验证了该分光成像系统可以达到设计的最初目的, 即完全可以使用高响应速度的微镜阵列进行瞬态光谱的扫描探测。图 5 中示例的是微镜微偏转角为 10° 的情况。

同时, 根据光学系统的设计结果并结合实际要求(如杂散光的影响), 可以分析得到单个微镜的最大偏转角度与探测器位置的关系。如图 6 所示, 考虑到如果微镜阵列两端处的两块微镜工作正常(即微镜阵列两端处的单面微镜可以将单色光反射至探测器上), 则该光谱仪也能正常工作, 所以

只考虑边沿处的极端条件。考虑通过光栅边沿的两条入射角为 φ'_1 , φ'_2 复色光线(最大波长 λ_1 , 最小波长 λ_2), 经过光栅常数为 a 的光栅衍射后得到的单色光分别入射到微镜阵列最边缘处的镜面上, 衍射角分别为 φ_1 , φ_2 。其关系由光栅方程(只考虑第一级光谱)可知

$$\lambda_1 = a \times (\sin\varphi_1 + \sin\varphi'_1) \quad (7)$$

$$\lambda_2 = a \times (\sin\varphi_2 + \sin\varphi'_2) \quad (8)$$

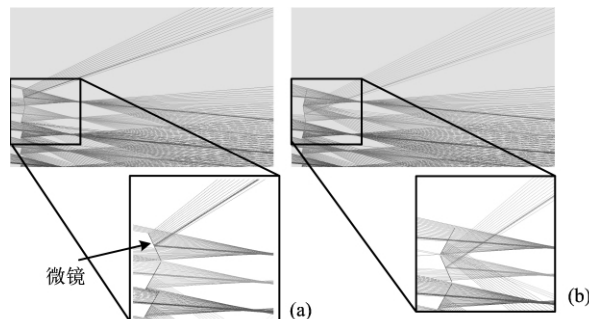


Fig 5 Mirror scanning

(a): The first pixel scan; (b): The second pixel scan

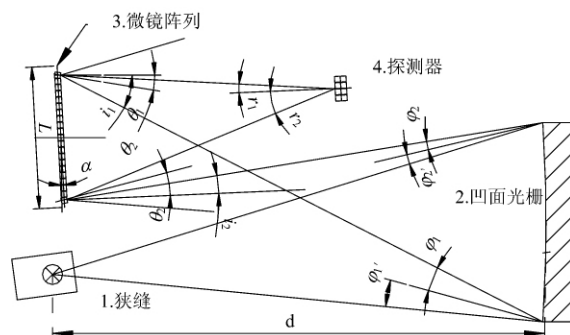


Fig 6 Angle of scanning mirror and the position of detector

当微镜阵列未工作时, 入射到微镜阵列上的入射光角度分别为 i_1 和 i_2 。

$$i_1 = \varphi_1 + \alpha \quad (9)$$

$$i_2 = \varphi_2 + \alpha \quad (10)$$

其中, α 为微镜阵列的倾角(也即光谱成像面相对于光栅基底面的转角)。由镜面反射定律可知, 反射角也为 $\varphi_1 + \alpha$, $\varphi_2 + \alpha$ 。

考虑极端条件, 既只有当边缘处的单个镜面分别达到最大偏转角 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_{\max}$ 时(θ_1 , θ_2 分别为边缘处两个微镜的偏转角), 单个像元的单色光才可以被反射至探测器 4 内, 假设探测器表面与微镜阵列表面平行(也即与光谱成像面平行), 那么可知

$$r_1 = i_1 - 2\theta_1 \quad (11)$$

$$r_2 = i_2 + 2\theta_2 \quad (12)$$

其中, r_1 和 r_2 为光线入射到探测器时的入射角。

根据前述的关系, 确定角度光线入射到探测器时的入射角与微镜最大偏转角的关系, 也即确定了反射扫描光束的公共空间

$$r_1 = \arcsin(\lambda_1/a - \sin\varphi'_1) + \alpha - 2\theta_1 \quad (13)$$

$$r_2 = \arcsin(\lambda_2/a - \sin\phi'_2) + \alpha - 2\theta_2 \quad (14)$$

由于狭缝,凹面光栅,微镜阵列的位置尺寸等参数是一定的,所以由式(13)和(14)便可以确定探测器的位置。

在实际应用中,可以将探测器置于所有反射扫描光束的公共空间,每次只对单一光谱像斑元进行扫描,光谱信号采集与处理电路在得到反射扫描微镜的位置信号、扫描次数信号(这两个信号由微镜控制电路模块发出)以及同一时间段内单元探测器本身响应的光强信号之后,进行连续光谱信号的识别,经过处理后得到准确的连续光谱信息。

3 结 论

本文采用凹面光栅的设计理论,使用光学设计软件 ZE-

MAX 用新的优化标准和算法对成像质量进行优化,再对凹面光栅进行平场化设计。在所设计的光谱范围内(900~1 400 nm)成像质量较好的达到了设计要求,分辨率达到 6 nm,同时也满足了微镜反射扫描的一般要求,为下一步进行微镜阵列的设计制造奠定了基础,也为制造低成本的近红外微镜阵列光谱仪做好了设计准备。

References

- [1] LU Wan-zhen(陆婉珍). Near Infrared Spectroscopy Analysis of Modern(现代近红外光谱分析技术·第2版). Beijing: China Petrochemical Press(北京:中国石化出版社), 2007. 306.
- [2] YAN Yan-lu(严衍禄). Analytical Basic Application of Infrared Spectroscopy(近红外光谱分析基础与应用). Beijing: China Light Industry Press(北京:中国轻工业出版社), 2005.
- [3] SONG Qiong, MA Guo-xin(宋琼,马国欣). Infrared(红外), 2006, 27(11): 31.
- [4] JI Hai-yan(吉海彦). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2001, (6): 25.
- [5] Thomas Otto, Ray Saupe, Reinhard Bruch, et al. IEEE, 2002, 49: 31.

Near Infrared Spectroscopy System Structure with MOEMS Scanning Mirror Array

LUO Biao, WEN Zhi-yu*, WEN Zhong-quan, CHEN Li, QIAN Rong-rong

National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, Micro-system Research Center of Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract A method which uses MOEMS mirror array optical structure to reduce the high cost of infrared spectrometer is given in the present paper. This method resolved the problem that MOEMS mirror array can not be used in simple infrared spectrometer because the problem of imaging irregularity in infrared spectroscopy and a new structure for spectral imaging was designed. According to the requirements of imaging spot, this method used optical design software ZEMAX and standard-specific aberrations of the optimization algorithm, designed and optimized the optical structure. It works from 900 to 1 400 nm. The results of design analysis showed that with the light source slit width of 50 μm , the spectrophotometric system is superior to the theoretical resolution of 6 nm, and the size of the available spot is 0.042 mm $\times$ 0.08 mm. Verification examples show that the design meets the requirements of the imaging regularity, and can be used for MOEMS mirror reflectance scan. And it was also verified that the use of a new MOEMS mirror array spectrometer model is feasible. Finally, analyze the relationship between the location of the detector and the maximum deflection angle of micro-mirror was analyzed.

Keywords Near infrared spectroscopy; Flat field concave grating; Astigmatism; ZEMAX; Micro-mirror

(Received Oct. 19, 2010; accepted Mar. 23, 2011)

* Corresponding author