

扩展光源对微型 FTIR 光谱复原的影响分析

付建国^{1,2}, 梁中翥¹, 梁静秋^{1*}

- 1. 应用光学国家重点实验室, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
- 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 分析了基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪(FTIR Fourier transform infrared spectrometer)中扩展光源对光谱复原的影响, 计算了干涉强度与光源立体角之间的关系。分析表明, 扩展光源存在的立体角导致系统的相干长度变短, 光谱分辨率降低。当扩展光源的立体角小于 0.001 时, 系统的分辨率接近理论设计值。减小光源尺寸会降低系统的光通量。因此, 需要在设计中结合系统信噪比的要求, 选取合适尺寸的扩展光源。

关键词 傅里叶变换红外光谱仪; 误差分析; 扩展光源; 分辨率

中图分类号: O438.2 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)06-1723-04

引言

微型空间调制傅里叶变换红外光谱仪由于没有动镜驱动系统, 结构紧凑, 因而适合于实时检测与在线监测, 将在大气环境检测, 水污染检测等领域得到广泛应用^[1-7]。图 1 为一种基于多级微反射镜的微型空间调制傅里叶变换红外光谱仪, 这种光谱仪利用两个固定的多级微反射镜取代了传统的时间调制傅里叶变换光谱仪的动镜与定镜。两个多级微反射镜正交摆放, 可以在空间不同位置产生光程差, 并呈矩阵分布^[8]。

由于傅里叶变换红外光谱仪采用扩展光源, 所存在的立体角使准直后的平行光束存在一定的视场角^[9,10]。有一定视场角的平行光束在干涉系统中产生的光程差除了与两个多级微反射镜之间距离有关外, 还与平行光的视场有关, 从而导致多级微反射镜空间调制的光程差与理论设计存在差异, 降低系统光谱分辨率。目前尚未有相关依据能给出这种光谱仪对立体角的最大容限, 因此有必要对其进行详细分析。

本文通过对该光谱仪扩展光源的理论分析, 计算了干涉强度与立体角的关系, 给出了该系统对扩展光源立体角的最大容限。可以以此为依据, 结合光谱仪的性能参数, 在光学系统设计中扩展光源提出要求。

1 基本原理

图 1 是基于多级微反射镜的微型傅里叶变换红外光谱仪的示意图, 核心部件为两个正交摆放的多级微反射镜, 可以实现光程差的空间调制。光源出射的光经透镜准直, 然后被分束器分为两束, 两束光分别被多级微反射镜反射后在分束器上相干。若多级微反射镜台阶数为 m , 则光束在空间上分为 m^2 份。若小台阶高度为 d , 则大台阶高度为 md 。若 x 和 y 分别为两个多级微反射镜的台阶序数, 则 (x, y) 对应的光程差为 $= 2d(my - x)$ 。图 2 为以 3×3 阵列为例的空间调制光程差分布示意图。记录光程差与干涉强度, 将其做傅里叶变换可得复原光谱。

波数为 σ 的光波在反射面 (x, y) 上的干涉光强表达式为

$$I(\sigma, x, y) = \frac{1}{2m^2} B_0(\sigma) (1 + e^{i2\sigma d(my-x)}) \quad (1)$$

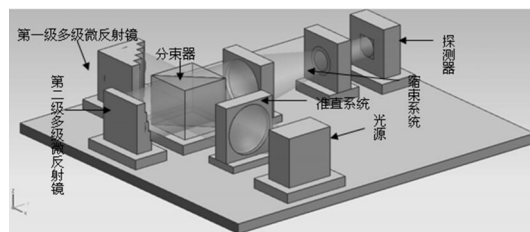


Fig 1 Scheme of a Fourier transform spectrometer based on step mirror

收稿日期: 2010-09-13, 修订日期: 2010-11-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2009AA04Z315)和国家自然科学基金项目(60977062, 61027010)资助

作者简介: 付建国, 1984年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: jianguofu1984@163.com

* 通讯联系人 e-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

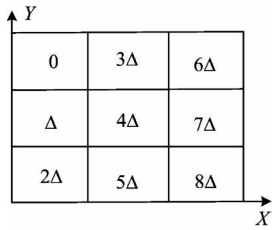


Fig 2 Scheme of OPD and division of energy with 3x3 step mirrors

其中, $B_0(\omega)$ 为光源光谱亮度, 舍去第一项的常数项并将各波数单色光干涉图函数积分, 以间隔 $\Delta = 2d$ 离散采样, 可得到整个光谱范围的干涉强度函数 I_D

$$I_D(x, y) = \int_0^{\max} \frac{1}{2m^2} B_0(\omega) e^{i2\omega(mx-y)} d\omega \quad (2)$$

对频域进行离散量化, $\omega = \frac{1}{\max}$, 所以 $n = \frac{n}{m^2} (n = 0, 1, \dots, m^2 - 1)$, 在这些频率上, 对干涉强度做离散傅里叶变换可得离散光谱

$$B_0(\omega_n) = \sum_{k=-n}^{m^2-n} I_D(k) e^{-i\frac{2\pi k}{m^2} n} \quad (3)$$

采用过零单边采样方法来降低系统的原始数据量并减轻系统其他环节的压力, 即 $k = -n, \dots, 0, \dots, m^2 - n$, 其中 n 为过零采样量, 它决定了系统装配的精密位置。

2 扩展光源对光谱复原的影响

设从扩展光源发出的光线进入准直透镜时存在的视场角为 θ , 则经过准直所得的平行光线与光轴的夹角也为 θ (如图 3), 此时通过干涉系统的光程差将不再是 $\delta = 2d(mx - y)$, 而是光程差 $\delta_e = 2d(mx - y) / \cos(\theta)$ (如图 4)。所以对于扩展光源, 立体角内 d 内发出的波数为 ω 的干涉图信号为

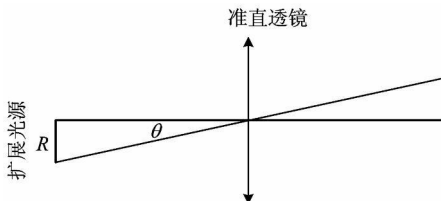


Fig 3 Field of angle (FOV) produced by the extended light source

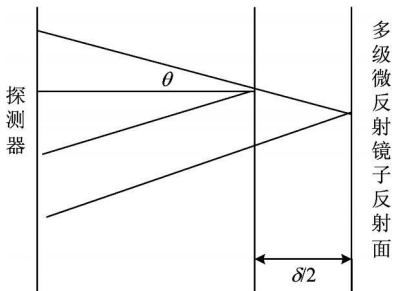


Fig 4 Optical path difference produced by the step mirrors

$$dI = 2RT B_0(\omega) \cos(2\omega \delta_e) d\omega \quad (4)$$
 式中 R 为反射率, T 为透射率, $B_0(\omega)$ 为功率谱密度。在立体角 θ 内, 整个光谱范围的干涉强度为

$$I_D(x, y) = \int_0^{\theta} 2RT B_0(\omega) \cos(2\omega \delta_e) d\omega \quad (5)$$

扩展光源的立体角 θ 与视场角的关系为

$$\theta = 2(1 - \cos(\alpha)) \quad (6)$$

以 α 代入 θ 可得

$$\alpha = 2 / (2 - \theta) \quad (7)$$

为了讨论的方便, 我们假定 $R = T = 0.5$, $B_0(\omega)$ 是波数为 ω_0 的单色光源, 并用狄拉克函数代替 $B_0(\omega)$

$$B_0(\omega) = \frac{1}{2} [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] \quad (8)$$

$$I_D(x, y) = \frac{1}{4} \int_0^{\theta} [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] \cos(2\omega \delta_e / (2 - \theta)) d\omega \quad (9)$$

假设该系统的台阶个数为 $m = 32$, 则最大光程差 $\delta_{\max} = 1278 \mu\text{m}$, 理论上能够实现的最大分辨率为 789 cm^{-1} 。若波数 $\omega_0 = 333 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_0 = 3 \mu\text{m}$), 立体角分别为 $\theta = 0.2$ 与 $\theta = 0.001$, 通过软件计算可得干涉强度 I_D 与光程差的关系图以及探测器上的光强分布图。

图 5 与图 6 分别是使用立体角为 0.2 的扩展光源得到的干涉强度与光程差的关系图与探测器上的光强分布图。图 7 与图 8 是使用立体角为 0.001 的扩展光源得到的干涉强度与

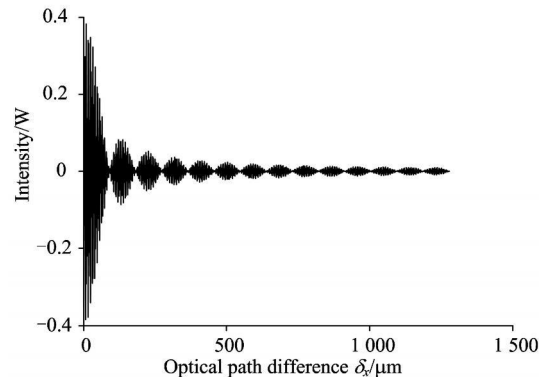


Fig 5 Relationship between intensity and OPD ($\theta = 0.2$)

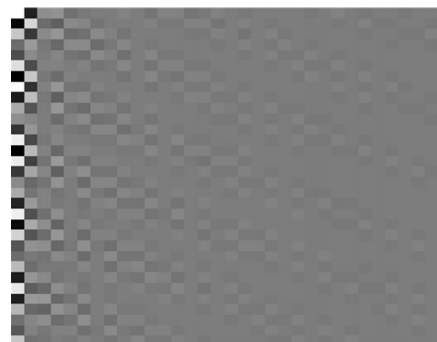


Fig 6 Intensity distributed on the detector ($\theta = 0.2$)

光程差的关系图与探测器上的光强分布图。通过对比可知：立体角较大的系统所得的干涉强度随着光程差的增大调制度变小，说明系统的相干长度短，相干性差。当系统的相干长度变短时，系统的光谱分辨率降低。

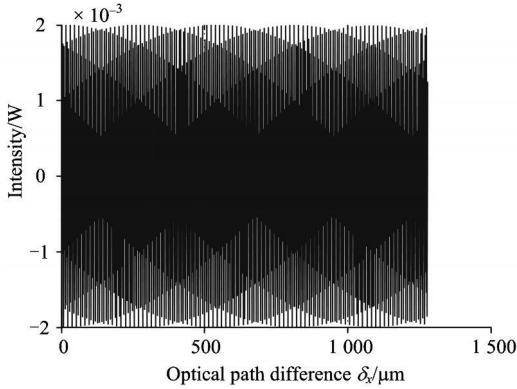


Fig 7 Relationship between intensity and OPD ($\theta = 0.001$)

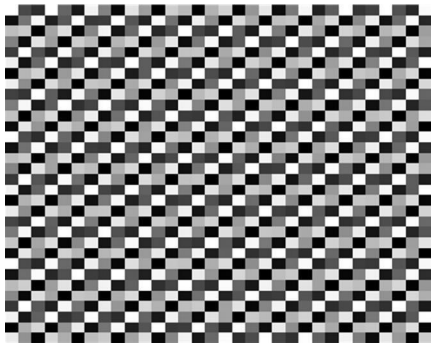


Fig 8 Intensity distributed on the detector ($\theta = 0.001$)

将式(9)代入式(3)中，即对干涉图做傅里叶变换，可以得到光谱复原图。图 9 是使用辐射波长为 $3 \mu\text{m}$ 、立体角为 0.2 的扩展光源获得的光谱复原图，计算光谱半高宽所得光谱分辨率 σ 为 125 cm^{-1} 。图 10 是使用立体角为 0.001 的扩展光源获得的光谱复原图，计算得到光谱分辨率 σ 为 11 cm^{-1} ，接近理想点光源时的分辨率。

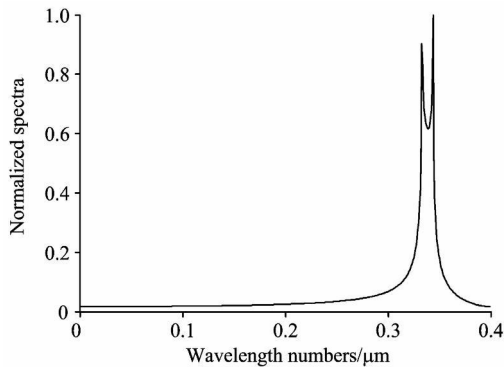


Fig 9 Spectrum reconstruction with extended light source ($\theta = 0.2$)

光谱复原图中光谱宽度变宽，分辨率降低，而且光谱出现了双峰，有多余信号出现，可见扩展光源对光谱复原的结果有一定的影响。

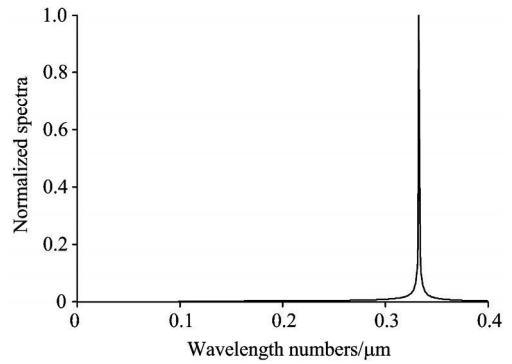


Fig 10 Spectrum reconstruction with extended light source ($\theta = 0.001$)

为了提高系统的分辨率，需减小扩展光源的立体角。而立体角较小的系统的光通量小。在实际系统中，由于存在暗电流，杂散光等噪声，较弱的信号将导致信噪比降低，严重时会使光谱复原失真。由此可见，需要综合考虑两方面因素来选择光源。

由图 3 可知，立体角的大小由光源尺寸及准直透镜焦距决定。光源尺寸越小，准直透镜焦距越大，则立体角越小。例如：当扩展光源的立体角为 0.001 时，由公式 $\theta = 2(1 - \cos \alpha)$ 可得扩展光源的最大视场角 $\alpha = 0.0178 \text{ rad}$ 。若准直透镜焦距为 70 mm ，则光源的半径 $R = 70 \times 0.0178 = 1.25 \text{ mm}$ 。在基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪中，可通过光阑来限制光源的半径从而改变扩展光源的立体角。

3 系统光源设计

依据以上的分析，我们选用尺寸为 $5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 的碳化硅黑体辐射光源，通过会聚透镜将光源成像在光阑处，光斑尺寸为小于 3 mm 。设计准直物镜焦距 80 mm ， 3 mm 口径的视场角为 0.0187 rad ，对应的立体角为 0.0011 。通过光阑控制立体角的大小，使其在 0.001 上下变换，可以满足系统的不同需求。

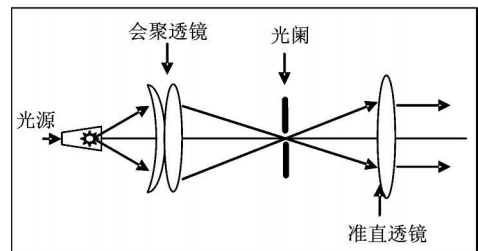


Fig 11 Scheme of structure of light source

4 总结

对比图 9 与图 10 可以发现，立体角较大的扩展光源的

由于傅里叶变换光谱仪所使用的扩展光源存在一定的立

体角,使得经过准直透镜后所得的平行光存在一定的视场角。这种具有视场角的光线产生的光程差与视场角为零时的平行光产生的光程差不同,导致光源的相干长度变短,系统的分辨率降低。通过本文的计算分析,找到计算扩展光源对光谱分辨率影响的方法。计算结果表明,当立体角小于 0.001 时,系统的光谱分辨率接近理论设计值。结合系统对

信噪比的要求,选择了合适尺寸的红外扩展光源,通过光阑调节,既满足了系统对光谱分辨率的要求,又满足了系统对光通量的要求。本文的计算方法及结果可以用于类似光谱仪器系统的光学系统设计及其优化。

致谢:衷心感谢吕金光、冯聪在光谱仪计算模型的处理中对作者的有益讨论和帮助。

References

- [1] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu, et al(孔延梅, 梁静秋, 梁中龢, 等). Semiconductor Optoelectronics(半导体光电), 2008, 29(1): 1.
- [2] SHI Jun-feng, HU I Mei, WANG Dong-sheng, et al(史俊锋, 惠梅, 王东生, 等). Optical Technique(光学技术), 2003, 29(1): 13.
- [3] Padgett M J, Harvey A R. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(4): 2807.
- [4] Courtial J, Patterson B A, Harvey A R, et al. Applied Optics, 1996, 35(34): 6698.
- [5] Marian Hanf, Steffen Kurthb, Detlef Billep, et al. Microwave and Optical Technology, 2003, 5445: 128.
- [6] SHI Sha-jin, SHEN Wei-min, GU Hua-jian, et al(时善进, 沈为民, 顾华俭, 等). Laser Journal(激光杂志), 2000, 21(3): 16.
- [7] SHEN Wei-min, SHI Sha-jin(沈为民, 时善进). Semiconductor Optoelectronics(半导体光电), 2001, 22(6): 408.
- [8] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, WANG Bo, et al(孔延梅, 梁静秋, 王波, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(4): 1142.
- [9] SHI You-bin, CHEN Chun-lei, HUANG Zhen-yong, et al(石友彬, 陈春雷, 黄振永, 等). Journal of Applied Optics(应用光学), 2008, 29(2): 271.
- [10] Kitade A. Infrared Physics, 1985, 25(5): 715.

Influence of Extended Light Source on Spectral Reconstruction in a Micro FTIR

FU Jian-guo^{1,2}, LIANG Zhong-zhu¹, LIANG Jing-qiu^{1*}

1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The influence of extended light source on spectral reconstruction in the FTIR (fourier transform infrared spectrometer) based on step mirrors was discussed in the present paper. The relationship between coherent intensity and solid angle was calculated. It was found that the coherent length became shorter and the spectrum resolving power became lower as a result of solid angle produced by the extended light source. The spectrum resolving power of system could reach the value as the theoretic design if the solid angle of extended light source is smaller than 0.001 . The radiance will reduce if the size of extended light source is shortened. Therefore, a suitable size of extended light source can be chosen, considering the requirement of SNR in the optical design.

Keywords Fourier transform infrared spectrometer; Error analysis; Extended light source; Spectrum resolving power

(Received Sep. 13, 2010; accepted Nov. 5, 2010)

* Corresponding author