

# 高分辨率傅里叶变换光谱技术在短波段光学中的应用及进展\*

李志刚 齐文宗 刘颖 李福田

(中国科学院长春光学精密机械研究所,应用光学国家重点实验室 长春 130022)

**摘要** 讨论了傅里叶变换光谱技术向短波段光学扩展的必要性和主要技术难点,分别介绍了几种应用于紫外、真空紫外及软 X 射线波段的傅里叶变换光谱仪结构性能与原理,并进一步阐述了高分辨率傅里叶变换光谱仪在短波段光学中的应用。

**关键词** 傅里叶变换光谱仪,高分辨率,紫外,真空紫外,软 X 射线

## APPLICATIONS AND PROGRESS OF HIGH RESOLUTION FOURIER TRANSFORM SPECTROSCOPY IN SHORT WAVELENGTH OPTICS

Li Zhigang Qi Wenzong Liu Ying Li Futian

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

**Abstract** The need to extend Fourier transform spectroscopy to the short wavelength optical region and the main technical difficulties involved are discussed. The structure performance and principle of several kinds of Fourier transform spectrometers which are used in the ultraviolet, vacuum ultraviolet and soft X-ray regions are described. The applications of high resolution Fourier transform spectrometers are further elaborated.

**Key words** Fourier transform spectrometer, high resolution, ultraviolet, vacuum ultraviolet, soft X-ray

### 1 引言

傅里叶变换光谱技术广泛应用于红外及可见光波段,是分析物质原子和分子发射、吸收光谱的有效手段。傅里叶变换光谱仪是依靠记录由不同波长光程差所产生的干涉图,并且对其进行傅里叶逆变换,从而获得光源光谱的。快速傅里叶变换(FFT)算法、计算机及激光技术的进步带动了这一技术的飞速发展。红外傅里叶变换光谱仪已取代了光栅色散型光谱仪,成为红外波段实时光谱测量与分析的最佳选择。目

前,应用于短波段(紫外光以下波段)光谱测量的谱仪仍然以光栅光谱仪为主。在紫外光波段,获得 $10^5$ 量级的高分辨率则需凹面光栅焦距6—10m,体积、重量如此庞大的谱仪给应用带来极大不便。另外,使用凹面光栅光谱仪还会导致测量光谱线弯曲,而傅里叶变换光谱仪绝不会产生这样的结果。应用谐波振荡和混频技术的激光光谱法以及法布里-珀罗(F-P)标准

\* 国家自然科学基金和应用光学国家重点实验室基金资助项目

1998-10-19收到初稿,1998-12-22修回

具用于短波段光谱测量也可获得高光谱分辨率,但光谱测量范围窄,使用范围受限。天文数据分析、地球大气层观测、短波段激光、分析化学、同步辐射特性研究以及短波段辐射定标发展的迫切需要,已使小型化、高分辨率、高精度、宽光谱范围的短波段傅里叶变换光谱仪成为研究热点。

## 2 傅里叶变换光谱技术向短波段拓展的主要技术难点

傅里叶变换光谱仪是综合机械、光学与电子学系统的良好范例,这三个领域的技术都会直接影响高质量光谱的获得。但是随着光波长的缩短,傅里叶变换光谱技术的难度却随之加大,进展速度亦远不如在红外波段那样突飞猛进。其难点主要表现在机械、光学精度以及对计算机处理能力的更高要求。

### 2.1 机械精度的提高

傅里叶变换光谱仪的光谱分辨率是由最大光程差决定的。高分辨率光谱的获取依赖于大光程差,而谱仪测量波长精度取决于等间隔采样精度。根据奈奎斯特定理,避免光谱线混淆的条件是采样间隔小于或等于最小测量波长的二分之一。在短波段光谱测量中,既要保证大的光程差,还要保证采样精度。因此,对动镜移动的精度提出了更高的要求。在动镜扫描的整个过程中,其速度的均匀性、方向准直性均会给测量干涉图的质量带来影响。精度高、移动平稳、抗倾斜能力强的机械系统设计及加工至关重要。

### 2.2 光学元件面形精度与镀膜

瑞利判据要求干涉光学元件总面形精度误差小于最小测量波长的四分之一,这使得对短波段谱仪中分束器及反射镜等光学元件的加工面形要求更加苛刻。例如下面将提到的软 X 射线傅里叶变换光谱仪,若测量 20nm 波长光谱,则需要分束器与 4 块平面反射镜的面形精度误差在 1.25nm (约 1/500) 左右,这使得加工难度增大。短波段谱仪分束器结构设计及镀膜也是有待解决的关键技术。对软 X 射线的强吸收

会造成对光源辐射的无谓损失,软 X 射线多层膜的应用可以有效地提高光学元件在软 X 射线波段的反射率。1995 年,美国加利福尼亚 Lawrence Livermore 国家实验室 Da Silva 等人<sup>[1]</sup>设计了扭曲式极紫外 Mach-Zehnder 干涉仪,使用范围 3—30nm,镀制 30 层 Mo/Si 多层膜的平面反射镜在 15.5nm 波段反射率(入射角 2°)高达 60%。同样采用 Mo/Si 多层膜技术制作的 1.2cm × 1.2cm 分束器,其反射率为 20%,透射率为 15%。可见,软 X 射线傅里叶变换光谱仪的进一步发展仍有赖于软 X 射线多层膜技术的提高。

### 2.3 对计算机处理能力的要求

傅里叶变换光谱技术的采样信号处理部分本身就是建立在计算机数据处理基础上的。宽光谱短波段高分辨率测量对大光程、小采样间隔的要求必然会产生大数据量的干涉图数据,例如下面即将介绍的测量真空紫外波段的傅里叶变换光谱仪采样点就多达几百万个。为适应实时光谱分析的需要,处理这样大量的数据则需要处理能力很强的计算机。真空紫外傅里叶变换光谱仪曾使用 HP9000/300 工作站对干涉图数据进行快速傅里叶逆变换与相位校正<sup>[2]</sup>,现在的 586 型个人计算机处理这样多的数据也需要数小时。可见,计算机处理能力的提高是傅里叶变换光谱仪向短波段延伸的必要条件之一,高性能的小型化计算机为之带来更大的应用前景。

另外,为了实现高速扫描测量,建立精密伺服和快速高精度数据采集系统是电子学亟待解决的问题。总之,傅里叶变换光谱学向短波段的进展是与其他相关技术的发展密不可分的。

## 3 短波段傅里叶变换光谱仪研究现状

1971 年,法国学者 Luc 和 Gersterkorn 研制出第一台以光电倍增管为探测器、用于可见光至紫外波段光谱测量的高分辨率傅里叶变换光谱仪。此后,科学家们便开始将傅里叶变换光谱仪拓展至紫外、真空紫外以至软 X 射线波

段,许多类型的实验室及商业产品应运而生.下面主要介绍应用于紫外、真空紫外以及软 X 射线波段几种具有代表性的傅里叶变换光谱仪结构、原理和性能.

为避免采用难度较大的高精度机械扫描系统, Courtial 等人<sup>[3]</sup>设计并研制了小型高通量静态傅里叶变换紫外光谱仪,以氙灯为光源测量了有毒的  $H_2S$  和  $SO_2$  气体 210—250nm 波段范围内的吸收系数. 谱仪原理结构如图 1 所示,采用石英制作沃拉斯顿棱镜,组成两块棱镜的楔块楔形角分别为  $6^\circ$  和  $11.8^\circ$ ,透射波长可降至 190nm,棱镜孔径  $12\text{mm} \times 27\text{mm}$ . 布儒斯特平板偏振器将来自光源的光转换为线偏振光,利用两沃拉斯顿棱镜的双折射效应即  $o, e$  光程不同,提供各波长光程差,通过另一布儒斯特偏振器后,在具有 1024 个像元的一维阵列探测器接收表面形成空间域与其一致的光谱干涉图. 对记录探测器像元的信号值进行傅里叶积分变换,获得测量值. 该谱仪无移动部件,结构紧凑,使用方便. 受最大光程差和探测器尺寸限制, 200nm 处光谱分辨率约为  $0.7 \times 10^3$ ,测量波段较窄. 90 年代初, Harlander 和 Roesler<sup>[4]</sup>设计并研制的全反射式空间外差光谱仪是一种变型的傅里叶变换紫外光谱仪. 谱仪使用紫外衍射凹面光栅作为分束及色散元件,摒弃动镜扫描机构,采用空间阵列探测器接收干涉图. 但其分辨率由光栅光谱分辨率决定,测量光谱范围亦受探测器像元数制约.

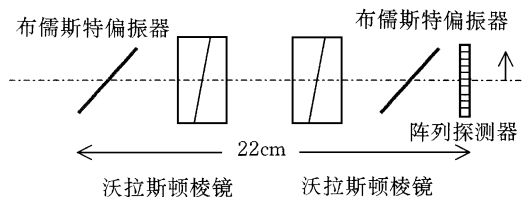


图 1 高通量静态傅里叶变换紫外光谱仪原理图

基于迈克耳逊干涉仪结构,英国帝国理工学院的 Thorne 与其合作者们<sup>[5]</sup>共同研制了双通道高分辨率傅里叶变换光谱仪(图 2),用于紫外至真空紫外光波段. 选取分束器表面的入射与反射光束夹角为  $10^\circ$ ,大大降低了偏振效应的影响. 取代传统平面反射镜的“猫眼”后向

反射器是一种远焦光学系统,它由可消减球差的抛物面反射主镜和焦平面处与之相对的小平面反射次镜共同组成,此种结构提高了动镜抗倾斜的能力. 他们还采用了分束-补偿耦合器,从而节省了补偿板. 为了保证干涉图质量,以高精度液压系统驱动置于 V 型导轨上的猫眼动镜,实现光程差的变化. 在扫描过程中,动镜扫描方向与光轴方向偏差角小于  $20^\circ$ ,动镜横向偏移不大于  $10\mu\text{m}$ ,通道 A 和通道 B 的干涉图信号同时由光电倍增管接收,通过稳频激光干涉信号电子学细分后触发、采集并记录于计算机硬盘,取两通道信号的交变成分相减后再进行处理,调制信号增强 2 倍,而光子噪声只增加  $\sqrt{2}$  倍,从而可以使信噪比之单通道测量提高  $\sqrt{2}$  倍. 谱仪放置于真空室内进行测量,采用熔石英制备分束器,使可测波长限达 170nm. 将材料变成  $MgF_2$  晶体会将短波限降至 120nm<sup>[6]</sup>. 该谱仪体积小 ( $1.5\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ ),最大光程差为 20cm,200nm 处光谱分辨率高达  $2 \times 10^6$  (足以分辨多普勒展宽),信噪比优于 1000.

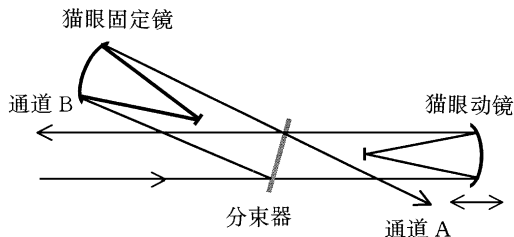


图 2 紫外至真空紫外波段的高分辨率傅里叶变换光谱仪原理图

美国 Lawrence Berkeley 实验室的 Howells 与 Frank 等人<sup>[7]</sup>正在研制 Mach-Zehnder 改进型软 X 射线傅里叶变换光谱仪,其结构如图 3 所示. 为提高对软 X 射线的反射率,选取适当掠入射角,而不再以  $45^\circ$  角入射. 以载有 4 块平面反射镜构成的 ABCD 菱形光学系统的矩形桌面作为谱仪主体,由单块金属挠性机构支撑,经液压驱动系统推进整个桌面沿固定方向直线运动,提供不同波长光程差的改变,最大光程差达到 1cm. 用光刻与多层膜技术选择在抛光后的矩形单晶硅片 (110) 表面,刻蚀出等间隔

25 $\mu\text{m}$  宽窄缝,制作透射栅格式分波前分束器.在第二块分束器后,两光束干涉并通过球面镜聚焦于探测器表面,形成干涉图.他们还对谱仪的性能作出了如下预估:测量波长范围 10—100nm,光谱分辨率  $5 \times 10^5$ ,信噪比为 330.此项研究设想为研制软 X 射线傅里叶变换光谱仪奠定了基础.

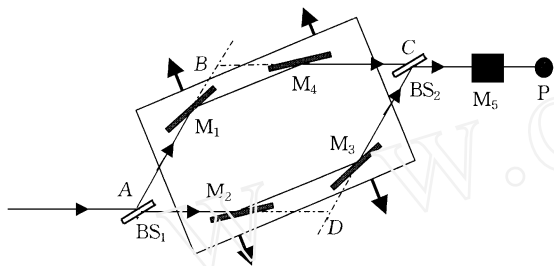


图 3 软 X 射线傅里叶变换光谱仪原理图  
(BS 为分束器;M<sub>1</sub>—M<sub>4</sub> 为平面反射镜;M<sub>5</sub> 为球面镜;  
P 为探测器)

#### 4 短波段傅里叶变换光谱仪的应用

傅里叶变换光谱仪具有的高分辨率、高通量、高波长精度、宽光谱测量范围等优点,为其在短波段发射、吸收光谱测量中展现出广阔的应用前景,其发展将对许多科学领域产生巨大的推动作用.

在短波段分子与原子光谱学研究中,傅里叶变换光谱仪用于研究物质超精细结构、同位素变换、能级寿命、跃迁几率及谱线形状,可获得光栅光谱仪很难分辨的高质量结果.傅里叶变换光谱仪测量波长的高精确性使其可用于分析短波段光源光谱特性,从事标准光源辐射波长与强度定标工作<sup>[8]</sup>.德国科学家 Schierle 将高分辨率傅里叶变换光谱仪与电感耦合等离子体源连接,精确测量了 33 种元素的 2229 条紫外(180—500nm)等离子体光谱线<sup>[2]</sup>.同步辐射具有宽广平滑的连续光谱,是方向性好、亮度高、偏振度高的理想光源,用途广泛.特别是在真空紫外和软 X 射线区域,为其他光源所不及.高分辨率傅里叶变换光谱仪小型化的优势,使其可以与大型同步辐射源结合起来,进行相

应的测试工作.

精确的原子数据不仅对于理论原子物理而且对于天文物理有着重要的现实意义.早在 80 年代末期,就有人提出将高性能阵列探测器应用于空间站内放置的成像紫外傅里叶变换光谱仪,测量二维空间光谱分布,用其研究太阳色球层的动态过程. Kurucz 曾指出,在整个太阳光谱中,近一半的光谱线(大都分布在红外与紫外区域)尚属未知.特别是随着新一代仪器的出现,例如用于哈勃太空望远镜上的 Goddard 高分辨率光谱仪所获得的高质量星光谱,已显示出有实验室光谱数据库的匮乏问题,特别是炽热星体中的单电离及双电离态光谱,观测某些星体中异常同位素分布也会遇到类似困难,这已成为天文物理学研究领域越来越突出的问题.由星体 Th 元素光谱可推知其年龄,但星光谱极其复杂,几乎周期表内的元素均有贡献,要想使 Th 光谱与其他元素的混合谱区分开来,则必须有非常精细的实验室光谱数据<sup>[9]</sup>.傅里叶变换光谱仪以其高分辨率和宽广的光谱范围对于改善实验室数据十分理想.英国帝国理工学院的 ICFTS 小组采用空心阴极光源和 Penning 光源测量了 Fe, Cr, V, Co, Pt, Ag, Pb 等金属中性或单电离态原子紫外至真空紫外波段的精细发射光谱线,从中记录了许多新的谱线和能级,丰富了天文物理学中重要的过渡族金属光谱数据<sup>[10]</sup>.

在大气物理学研究中,傅里叶变换光谱仪还可用于气体分子的吸收光谱测量,为地表臭氧层监测实验以及大气污染浓度的测量提供精确数据和预估.哈佛天文物理中心 Yoshino 等人利用紫外至真空紫外傅里叶变换光谱仪与氙灯及日本光子工厂的同步辐射源结合,分别测量了 O<sub>2</sub> 紫外波段<sup>[11]</sup>(270—240nm)和 NO, O<sub>2</sub> 真空紫外波段(195—160nm)吸收截面<sup>[12]</sup>.

美国 Lawrence Berkeley 实验室的 Howells 及其合作者们研制软 X 射线傅里叶变换光谱仪,主要用于研究 He 双电离阈附近能量范围 60—80eV 的吸收光谱.除此之外,软 X 射线傅里叶变换光谱仪还可应用于发现目前还只能依

靠理论计算获得的 He 原子共振精细谱线, 研究 He 原子亚稳态结构和电子与电子相互作用的强外场效应, 测量谱线的实际线型参数, 以及进一步研究软 X 射线波段其他原子更复杂的精细结构. 同分子束源配合, 软 X 射线傅里叶变换光谱仪将以前所未有的高分辨率对特殊分子态进行研究.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Da Silva L B *et al.* Appl. Opt. ,1995 ,28:6389—6392  
[ 2 ] Schierle C, Thorne A P. Spectrochim. Acta ,1995 ,50B: 27—50  
[ 3 ] Courtial J, Patterson B A, Hirst W *et al.* Appl. Opt. , 1997 ,36:2813—2817

- [ 4 ] Harlander J, Roesler F L. Proc. SPIE. ,1990,1235:622—632  
[ 5 ] Thorne A P. Anal. Chem. ,1991 ,63:57—65A  
[ 6 ] Thorne A P, Cox G, Smith P L *et al.* Proc. SPIE. ,1994 , 2282:58—64  
[ 7 ] Howells M R, Frank K, Hussain Z *et al.* Nucl. Instr. and Meth. ,1994 ,A347:182—191  
[ 8 ] Salit M L, Travis J C, Winchester M R *et al.* Appl. Opt. , 1996 ,35:2960—2970  
[ 9 ] Anne Thorne. Physica Scripta ,1996 ,T65:31—35  
[10] Anne Thorne. J. Anal. At. Spectrom. ,1998 ,13:407—411  
[11] Yoshino K *et al.* Can. J. Phys. ,1994 ,72:1101—1108  
[12] Yoshino K *et al.* Rev. Sic. Instrum. ,1995 ,66 (2) : 2122—2124

## 第 23 届国际纯粹物理与应用物理联合会代表大会简讯

中国物理学会派出代表团参加了第 23 届国际纯粹物理与应用物理联合会 (IUPAP) 大会. 本届大会于 1999 年 3 月 16—21 日在美国亚特兰大召开. 42 个国家共 80 余名代表和 30 余名观察员参加了会议. 中国物理学会代表团成员有周光召 (IUPAP 副主席)、陈佳洱、赵凯华、张泽和杨国桢. 陈芳作为观察员列席了会议.

会议主要议程为讨论各种提案, 以及选举执委会和各专业委员会成员. 按照惯例, IUPAP 大会的一部分为学术报告. 这次大会的学术活动与美国物理学会纪念 100 周年大会的学术活动结合在一起, 没有另行组织. 美国物理学会 100 周年纪念大会将有 1 万名左右代表参加, 云集了世界各地物理学界著名人士, 是一次内容十分广泛、水平很高的国际性物理盛会.

IUPAP 大会选举了杨国桢为下届 (1999—2002 年) IUPAP 副主席. 我国被选入各专业委员会的成员有 13 人, 其中大陆地区 10 人, 台湾地区 3 人, 名单如下:

大陆地区:

- C4 委员会 (宇宙线): 丁林培  
C6 委员会 (生物物理): 沈 炯  
C9 委员会 (磁学): 王鼎盛  
C11 委员会 (粒子和场): 黄 涛  
C12 委员会 (核物理): 孙祖训  
C13 委员会 (物理发展): 刘寄星  
C14 委员会 (物理教育): 赵凯华  
C15 委员会 (原子、分子和光物理): 徐克尊  
C17 委员会 (量子电子学): 王育竹  
C20 委员会 (计算物理): 杜祥瑞

台湾地区:

- C3 委员会 (统计物理): 胡进锐  
C5 委员会 (低温物理): 吴茂昆  
C10 委员会 (凝聚态物理结构和动力学): 郑天佐  
(中国科学院物理研究所 杨国桢供稿)