

文章编号: 0253-2239(2001)04-459-04

紫外-真空紫外傅里叶变换光谱仪*

李志刚 王淑荣 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: 研制了新型的由分束耦合器、“猫眼”后向反射光学系统、稳频激光辅助采样系统和光电探测器等组成的紫外-真空紫外傅里叶变换光谱仪, 光谱测量范围为 170 nm~ 600 nm, 300 nm 处分辨率高于 1.5×10^5 。光谱仪结构紧凑, 可精确探测紫外-真空紫外波段物质的发射及吸收光谱, 尤其适合与同步辐射源对接完成相关的光谱分析。

关键词: 紫外; 真空紫外; 傅里叶变换光谱仪; 光谱分辨率

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A

1 引 言

高精度、高分辨率的光谱数据对原子与分子物理学、天体物理学、光谱学以及分析化学等学科领域的研究都是十分重要的。近年来, 在红外波段的材料吸收及发射光谱测量中, 红外傅里叶变换光谱仪已取代了传统的光栅色散型光谱仪, 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。为获得 10^5 量级的高分辨率, 谱仪体积极为庞大, 移动困难, 还会带来温控、减振等一系列问题。随着紫外-真空紫外波段对物质吸收、发射光谱测量精度要求的不断提高, 原子与分子光谱学、天文数据分析、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、宽光谱范围的紫外至真空紫外、甚至软 X 射线波段的傅里叶变换光谱仪成为研究热点^[1-2]。特别是利用高分辨率傅里叶变换光谱仪小型化的优势, 将为与大型同步辐射源结合起来进行相应光谱测试创造诸多便利。本工作的目的是研制供实验室光谱测量分析用的高精度、高分辨率的小型紫外-真空紫外傅里叶变换光谱仪原理样机。

2 光谱仪结构

带有“猫眼”准直后向反射光学系统的紫外-真空紫外傅里叶变换光谱仪光路设计如图 1 所示。该光谱仪由前置光学系统、分束耦合器、“猫眼”后反

器、光电倍增管、动镜精密导轨副、气动液压推进系统、稳频激光辅助采样系统、电子学信号处理系统以及计算机等组成, 可记录动镜行程范围 200mm 内的双边干涉图。

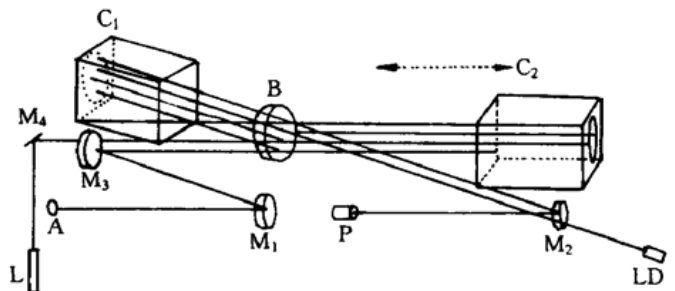


Fig. 1 Optical layout of UV-VUV Fourier Transform Spectrometer. A: the entrance aperture of source; B: beamsplitter/recombiner pair; C₁ and C₂: catseye retroreflector; P: photomultiplier; L: the reference laser; LD: laser detector; M₁: the collimating mirror; M₂: focusing mirror; M₃ and M₄: folding mirror

由圆孔光阑出射的待测光源光辐射经焦距为 500 mm 的准直物镜 M₁ 和平面反射镜 M₃ 反射后, 形成直径为 20 mm 的平行光束。经分束耦合器 B 分成两束, 分别入射至“猫眼”定镜 C₁ 和“猫眼”动镜系统 C₂, 后向 180° 角反射后再分别经 B 的同一位置透射、反射后汇合成一束干涉光束。曲率半径为 1000 mm 的球面反射镜 M₂ 将其反射会聚于光电倍增管 P 的光电阴极处。动镜沿光轴方向的水平直线运动改变干涉光束间的光程差, 从而实现光谱信号的振幅调制, 所对应的光谱干涉图函数可表示为:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) [1 + \cos(2\pi\sigma x)] d\sigma = C + \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) d\sigma, \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(69878027)资助项目。

收稿日期: 1999-12-21; 收到修改稿日期: 2000-02-21

其中 $I(x)$ 为光强, $B(\sigma)$ 为波数 σ 的光谱对应的光谱线强度, x 为两光束的光程差, C 为常数。根据傅里叶变换公式, 将干涉图函数进行傅里叶反变换, 即可还原获得光源的解谱信息:

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cos(2\pi\sigma x) dx. \quad (2)$$

光电倍增管接收光谱干涉图后将之转化为电信号输出, 由电子学系统带通滤波、放大处理后, 经 A/D 变换为数字信号记录于计算机硬盘。由计算机软件程序对采集的数字信号进行切趾、相位校正及快速傅里叶变换处理后, 获得光源测量光谱。

与传统的迈克耳孙干涉仪比较, 该谱仪结构上的一个重要特点是来自光源的入射光与分束器表面法线的夹角为 5° , 较之 45° 角入射不仅压缩了谱仪的体积, 而且大大降低了因大角度反射带来的光偏振效应对光谱测量的不良影响。“猫眼”光学系统 C_1 和 C_2 结构相同, 是由焦距 240 mm、相对孔径 $f/4$ 的抛物面反射主镜和一块置于主镜反射焦平面处的小平面反射次镜共同组成。对于入射平行光的 180° 后向反射而言, “猫眼”结构较之广泛采用的平面反射镜及角反射镜有更高的抗倾斜能力^[3]。镀有紫外-真空紫外半反半透膜的分束耦合器由紫外熔石英制成, 替代了传统谱仪中采用的分束器和补偿板, 由于采用一体化结构降低了调节难度, 提高了整体性能。熔石英材料截止透射波长为 170 nm, 从而决定了谱仪的短波限。分束耦合器基底是直径为 68 mm、厚度 7.5 mm 双面光学抛光的石英圆盘, 平行度小于 $0.5''$ 。如图 2 所示, 在基底两面各光胶两块直径 63 mm、厚度 10 mm 有小角度 ($20''$) 楔形的经双面光学加工的半圆石英元件, 此结构可补偿相干光束的偏移, 还能有效地削弱光学元件自身后表面反射光对测量的干扰。参考激光和测量信号光同样经过由分束耦合器、“猫眼”镜等组成的光学系统, 激光干涉信号与待测光源干涉信号携有相同的光程差信息, 因而已知光波长的稳频激光可以作为谱仪光谱测量的标尺, 提供光程差的准确定位。此结构不需另外构造一台参考谱仪, 节约了仪器占用空间, 降低了设计的复杂性和成本。

谱仪中反射光学元件表面均采用高真空镀膜机蒸镀 Al 金属反射膜, 为防止空气中 Al 膜表面氧化形成 Al_2O_3 氧化层导致对真空紫外光辐射的严重吸收, 在膜层表面覆盖了一层 MgF_2 膜阻止氧化层的形成, 可增强反射膜性能稳定性。经水冷空阴极光

源 Seya-Namioka 单色仪、样品室、光电探测系统和数据采集处理系统组成的紫外-真空紫外反射率计测试, 在波长大于 120 nm 波段, 所镀制的反射镜正入射条件下可以获得高于 80% 的高反射率, 从而有效地减少了光源的能量损耗。

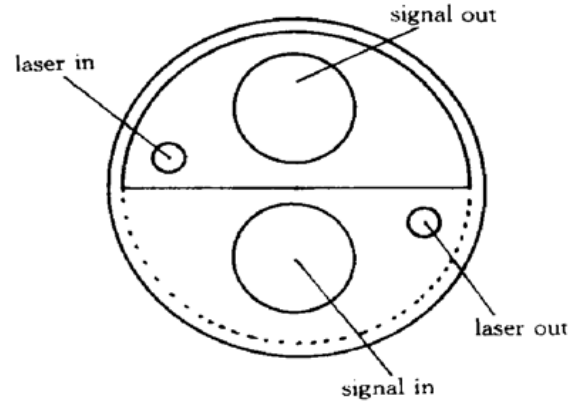


Fig. 2 Schematic of the optically contacted beamsplitter/recombiner. The broken line shows the orientation of second semi-circle optical component made of fused silica
光源光阑孔直径 D 与谱仪光谱分辨率 R 由如下关系式确定^[4]:

$$R = M \Delta \lambda \approx 8F^2/D^2, \quad (3)$$

F 为光源准直物镜焦距。本谱仪最小光阑直径为 0.8 mm, 最高光谱分辨率为 3.125×10^6 。“猫眼”动镜和精密直线滚动导轨滑块机械连接, 为防止动镜倾斜, 导轨直线度在 200 mm 行程内达 $2 \mu m$ 。为避免电机传动丝杆产生蠕动爬行现象和减少对环境的干扰, 我们设计并研制了小型高精度电控气动液压装置作为傅里叶变换光谱仪“猫眼”动镜的推进系统。液压系统由无氧氮气缸、电磁阀、气液转换器、精密调速阀、液压油缸和电控箱等部分组合而成。动镜平移的速率通过气体减压阀对高压氮气瓶输出压力的调节来确定, 经光栅尺测量动镜移动速率在 $1 \times 10^{-3} \text{ mm/s} \sim 5 \text{ mm/s}$ 时的速率均匀度好于 1%。因采用了稳频激光监控等间隔采样, 该速率均匀度能很好地满足采样测量要求。

该谱仪可置于体积 $1.2 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 、真空度在 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 以下的真空室内进行真空紫外波段发射和吸收光谱的精确测量。选用合适的光电倍增管, 采用氟化镁晶体加工制作分束耦合器后, 预期可将该谱仪测量短波限降至 125 nm。

3 实验结果及讨论

为确立谱仪在实际光谱测量中的适用性和光谱分辨率, 以 PHILIPS 93146E 型汞灯为光源测量了 Hg 的发射光谱。光谱测量实验中, 选用日本

HAMAMATSU 公司 R928 型侧窗光电倍增管, 光谱使用范围 185 nm~ 900 nm, 辐射灵敏度峰值波长 400 nm, 阳极负载电阻 300 kΩ, 工作电压- 500 V~ - 1000 V。光电倍增管接收光谱干涉图并转换为电信号, 通过由射极跟随器、一级放大器、带通滤波器(300 Hz~ 3000 Hz)、二级放大器组成的预处理电路后, 形成光源干涉图模拟输出信号, 引至 12 位 A/D 模拟信号输入端。实验中的参考激光光源是利用双稳频横向塞曼效应氦氖气体激光(频率稳定性高于 2×10^{-10}), 经由多层介质膜偏振棱镜分光而获得的, 偏振度大于 99%。光电三极管接收参考激光干涉信号后, 应用电子学自动增益控制(AGC)和锁相环(PLL)倍频技术处理参考激光干涉图信号^[5], 可产生 1~ 15 倍频激光干涉方波脉冲信号, 以此同步触发 A/D 转换器记录光电倍增管的测量干涉图电信号, 并将其转换为数字信号存储于计算机硬盘, 形成离散的光源干涉图数据文件, 以备分析处理。

将光谱仪置于防振平台上, 调节高压氮气输出气压, 控制液压油缸活塞杆推进动镜速度保持在 0.1 mm/s 左右。光源前置光阑孔直径 0.8mm, 汞灯工作电压 94 V, 工作电流 400 mA, 光电倍增管工作电压- 700 V, 选择参考激光干涉信号倍频数为 8 (采样间隔 79.1 nm) 的条件下, 测量了单次采样光源光谱干涉图。经过计算机软件对采集数据平滑、切趾、相位校正及快速傅里叶变换处理后, 得到的低分辨率光源光谱如图 3 所示, 其对应的动镜行程为 5 mm。在紫外至可见区, Hg 元素较强的线谱发射占统治地位。可精确地辨认出 Hg I 和 Hg II 的 579.07 nm、576.96 nm、546.08 nm、435.83 nm、404.66 nm、366.33 nm、365.48 nm、365.02 nm、334.15 nm、313.18 nm、312.57 nm、302.15 nm、

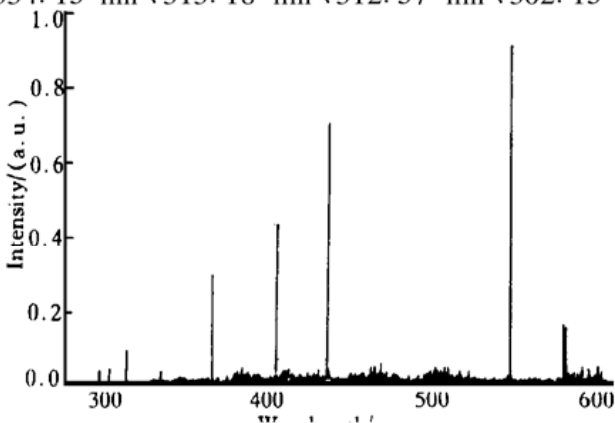


Fig. 3 Emission spectrum from 280 nm to 600 nm of Philips 93146E mercury lamp at 400 mA, computed from the discrete interferogram measured by UV - VUV Fourier transform spectrometer

296.73 nm、289.36 nm 等发射谱线。在对离散干涉图数据的处理过程中, 使用了四阶 Blackman-Harris 窗函数^[6]作为切趾函数, 采用最小二乘法拟合多项式对光源傅里叶变换光谱进行相位校正^[7]。光谱测量强度与反射镜反射膜、分束耦合器半反半透膜、光电倍增管的光谱响应和电子学系统的频率响应特性等因素有关, 因而只有在对谱仪进行光谱辐射定标后, 其测量值才会真实地反应出待测光源的光谱强度。在未进行辐射定标前, 测得的光谱强度为参考值, 而光谱线波长的精确测量可准确实现。

图 4 给出强谱线 365.0 nm 附近三条较弱谱线(理论波长值分别为 365.4839 nm、366.2883 nm 和 366.3281nm^[8]) 的高分辨率谱图, 动镜行程约 84mm, 所对应的测量峰值波长为 365.48477 nm、366.29013 nm 和 366.32977 nm, 测量偏差分别是 9×10^{-4} nm、 1.8×10^{-3} nm 和 1.6×10^{-3} nm。

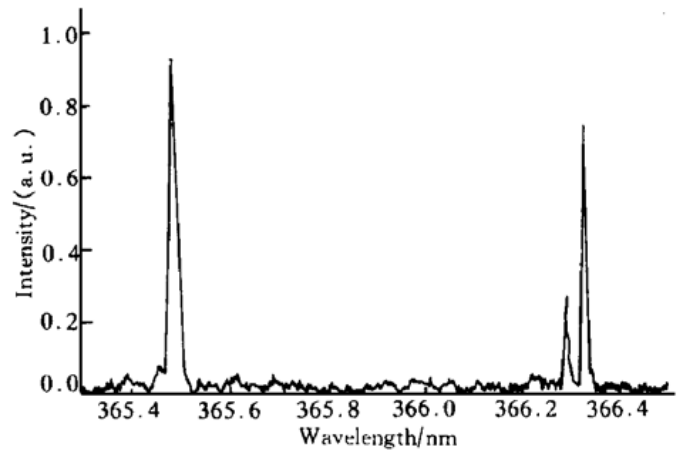


Fig. 4 Three emission spectral lines with high resolution near 365.0 nm of Philips 93146E mercury lamp at 400 mA

图 5 是理论波长为 312.5670 nm、313.1551 nm 和 313.1842 nm 的三条线谱, 动镜行程 84 mm, 对应测量峰值波长为 312.56778 nm、313.15546 nm 和 313.18384 nm, 测量偏差分别是 8×10^{-4} nm、 4×10^{-4} nm 和 4×10^{-4} nm。解谱结果得到, 313.18

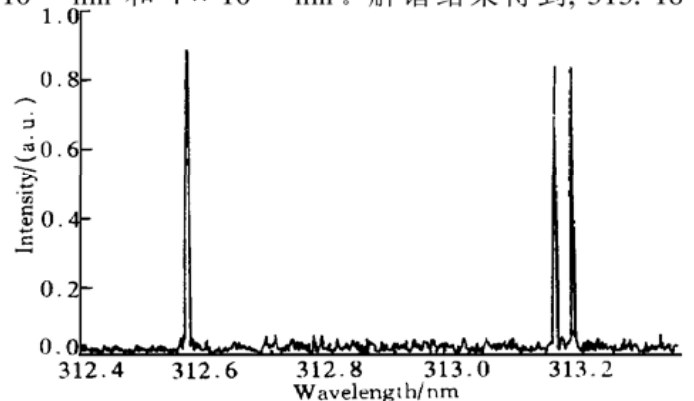


Fig. 5 Three Hg I spectral lines near 313 nm of mercury lamp. The half width of the maximum of 313.18 nm line is about 2×10^{-3} nm

nm 谱线的光谱半宽约为 2×10^{-3} nm, 推算得出谱仪在 300 nm 处的光谱分辨率大于 1.5×10^5 。为减低光谱自吸效应, 将汞灯工作电压降至 28 V, 工作电流保持在 140 mA, 光电倍增管工作电压 - 800 V, 其它条件不变的情况下, 测得的 253.65 nm 谱线结果如图 6 所示, 动镜行程为 22 mm。

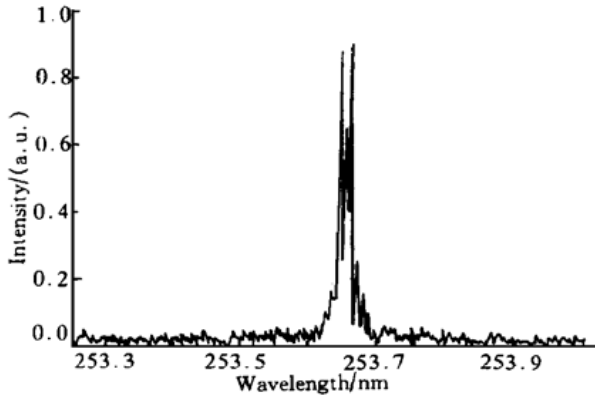


Fig. 6 Spectrum of the 253.65 nm line from a mercury lamp at 140 mA.

结论 研制了带有“猫眼”光学系统和新型分束耦合器的高分辨率、高精度、宽光谱范围、小型紫外-真空紫外傅里叶变换光谱仪。汞灯光谱测量表明, 该谱仪在 300 nm 波长处的光谱分辨率高于 1.5×10^5 。该谱仪的优点是结构紧凑、调节方便、效率高, 性能可与数米长的大型光栅光谱仪媲美。因此, 可方便地与同步辐射源对接, 完成紫外-真空紫外光波段的高分辨率光谱测量。目前, 该谱仪进一步的研究及

真空环境下实验仍在进行之中。

感谢王立朋高级工程师在实验过程中的大力协助和有益的探讨。

参 考 文 献

- [1] Thorne A. Fourier transform Spectrometry in the vacuum ultraviolet: Application and progress. *Phy. Scr.*, 1995, **T65**: 31~ 35
- [2] Howells M R, Frank K, Hussain Z *et al.*. Toward a soft X-ray Fourier-transform spectrometer. *Nucl. Instr. & Meth. (A)*, 1994, **347**(1): 182~ 191
- [3] Beer R, Marjaniemi D. Wavefronts and construction tolerances for a cat's-eye retroreflector. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(7): 1191~ 1197
- [4] Bell R J. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*. New York: Academic Publishing House, 1972. 141~ 152
- [5] Burton N J, Mok C L, Parker T J. Laser controlled sampling a Fourier spectrometer for the visible and ultraviolet using a phase-locked loop. *Opt. Commun.*, 1983, **45**(6): 367~ 371
- [6] Harris F J. On the use of windows for Harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proc. IEEE*, 1978, **66**(1): 51~ 83
- [7] 李志刚, 王淑荣, 李福田. 紫外傅里叶变换光谱仪干涉图数据处理. *光谱学与光谱分析*, 2000, **20**(2): 203~ 205
- [8] Reader J, Corliss C H, Wiese W L *et al.*. Wavelengths and transition probabilities for atoms and atomic ions: Part I. Wavelengths. Washington: Center for Radiation Research, National Measurement Laboratory, National Bureau of Standards, 1980. 86~ 87

Fourier Transform Spectrometer for Ultraviolet and Vacuum Ultraviolet Regions

Li Zhigang Wang Shurong Li Futian

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

(Received 21 December 1999; revised 21 February 2000)

Abstract: A novel ultraviolet and vacuum ultraviolet Fourier transform spectrometer consisting of beamsplitter/recombiner, cat's-eye retroreflectors, a sampling system with frequency stabilized laser and photoelectric detectors has been developed. The measuring range is in the wavelength region from 170 nm to 600 nm. The spectral resolution of transformed spectrum at 300 nm is better than 1.5×10^5 . The emission and absorption spectrum of materials in the ultraviolet and vacuum ultraviolet regions can be measured with high resolution. It is especially suitable for spectral experiments in combination with synchrotron radiation source.

Key words: ultraviolet; vacuum ultraviolet; Fourier transform spectrometer; spectral resolution