

高光谱分辨率横向剪切静态干涉光谱仪*

苏丽娟^{1,2} 相里斌¹ 袁艳¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 提出一种基于新型的分光方法的横向剪切分束器, 分析了该分束器结构的分光原理, 并对其用于干涉光谱仪中的效果进行了分析计算. 该分束器同体积条件下较目前的分束器可以产生十倍以上的剪切量, 应用到干涉仪中可以在获得高光谱分辨率的同时不增大仪器的体积和重量. 同时, 该分束器分光时, 无光能返回光源, 较 Sagnac 型分束器对光能的利用率提高了近一倍; 相对变形 Mach-Zehnder 型结构易实现实体化.

关键词 干涉光谱仪; 横向剪切分束器; 高光谱分辨率; 高通量

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

0 引言

干涉成像光谱仪 (Fourier Transform Spectrometer, FTS) 可分为时间调制干涉成像光谱仪和空间调制干涉成像光谱仪两大类. 时间调制干涉成像光谱仪是在迈克尔逊干涉仪基础上形成的, 它有两点不足: 需要高准确度的动镜驱动系统; 实时性不好. 空间调制干涉成像光谱仪形成的干涉图在空间域而不是在时间域, 从而避免了运动部件, 因而具有稳定性好、光谱测量的实时性和高通量等优点, 越来越受到国内外光谱学界的重视.

80 年代出现了许多基于静态双光束干涉仪的无动镜干涉成像光谱仪. 典型的静态双光束干涉仪有基于振幅分割的静态 Michelson 干涉仪, 变形 Mach-Zehnder 干涉仪, Sagnac 干涉仪和基于波前分割的 Fresnel 双镜干涉仪, 等等^[1~5]. 这些静态干涉仪产生的干涉图是空间分布的强度信号, 因此有可能实现对时变或脉冲辐射的实时监测; 它们没有运动部件和扫描机构, 使得仪器的结构变得简单、紧凑和稳定, 同时也减小了仪器的体积和重量, 降低成本. 但是以上几种静态干涉成像光谱仪的光谱分辨率通常比较低.

针对这些缺点, 本文提出一种基于新型的横向剪切分束器的静态双光束干涉光谱仪, 其采用可以产生很大的横向剪切量的新型横向剪切分束器, 从而其可以达到很高的光谱分辨率; 并对光能的利用率相对 Sagnac 型干涉仪提高近一倍, 同时具有比 Sagnac 型干涉仪结构更加紧凑, 又不失稳定性的优点, 使其在航空、航天遥感及物质成分分析等领域具

有广阔的应用前景.

1 原理

1.1 横向剪切静态干涉光谱仪的基本原理

图 1 是基于新型横向剪切分束器 (Lateral Shearing Beam-splitter, LSB) 的新型横向剪切静态干涉光谱仪 (Lateral Shearing Interferometer, LSI Stationary Fourier Transform Spectrometer, Stationary FTS) 的原理图. 它主要由前置光学系统 (Fore-Optic)、狭缝 (Slit)、横向剪切分束器 (LSB)、傅里叶变换透镜 (Fourier Transform Len)、柱面镜 (Cylindrical Len)、探测器 (CCD) 及数据处理系统 (Signal Processing System) 组成.

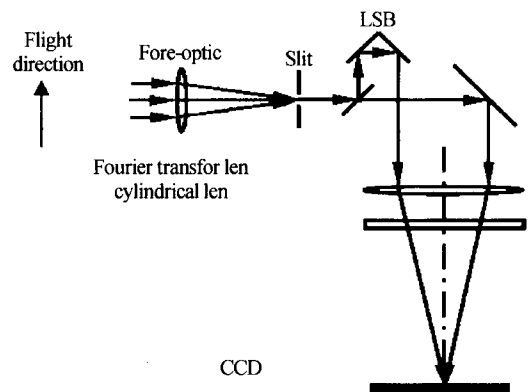


图 1 静态干涉光谱仪原理

Fig. 1 Schematic diagram of the stationary FTS

图 2 为图 1 的等效光路图. 图中, l 为从横向剪切分束器出射的两束相干光之间的横向剪切量, f 为傅里叶透镜的像方焦距, x 为干涉图中探测器上某采样点到零光程差点的偏移量, 则任意点的光程差为

$$\delta = l \sin \beta = l \frac{x}{f} \quad (1)$$

所以当波数范围为 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$, 其干涉光与人

* 嫦娥工程资助项目

Tel: 010-82339421 Email: tauruse_s@126.com

收稿日期: 2005-09-14

射光谱分布间的关系式为

$$I(\delta) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \exp(-i2\pi\nu\delta) d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \exp\left(\frac{-i2\pi\nu xl}{f}\right) d\nu \quad (2)$$

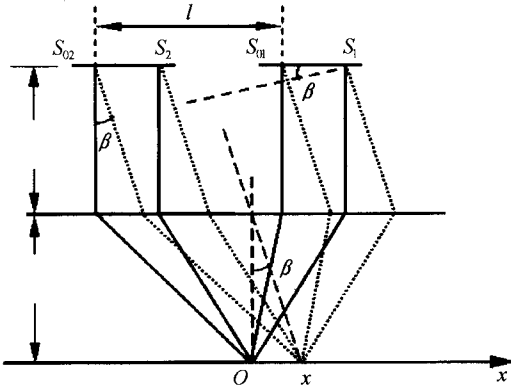


图2 静态干涉光谱仪的等效光路
Fig. 2 Schematic diagram of the stationary FTS

1.2 横向剪切分束器的原理

横向剪切分束器是横向剪切静态干涉光谱仪的核心部件。Sagnac干涉光谱仪的横向分束器叫三角形循环光路横向剪切分束器，又称 Sagnac 分束器。这种分束器可以做成实体，结构紧凑稳定。但是，在这类分束器中，两束相干光要分别经过分束面两次，有一半的光能返回光源，降低了对能量的利用率。而变形 Mach-Zehnder 干涉光谱仪中，它的分束器原理中两束相干光都只经过分束面一次，没有光能返回光源，提高了光能的利用率。然而，它不能做成实体，结构不紧凑，不稳定，不适用于野外大干扰情况下的使用。此外，要产生高的光谱分辨率，需要很大的剪切量，而对于上述结构来说，如果要实现大剪切量必须将分束器做得很大，从而会导致整个干涉光谱仪的结构很大，不适于航空航天及野外的应用。因此上述分束器做成的干涉光谱仪的光谱分辨率都比较低。

本文提出的是一种高光谱分辨率、高能量利用率、结构紧凑的新型横向剪切分束器。这种分束器产生横向剪切量的分光原理如图 3。

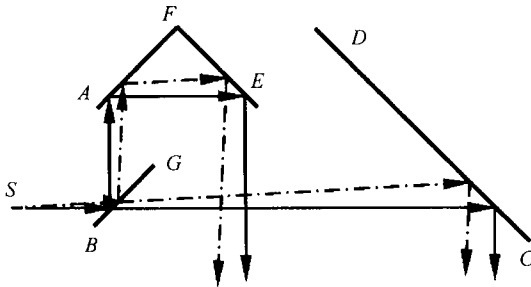


图3 横向剪切分束器光路
Fig. 3 Schematic diagram of the lateral shearing beam-splitter

图中从 S 点出射的光，入射到分束面 BG，被分为两束相干光沿不同的路径传输，从而两者之间产生横向剪切量。从图中可以看出，光只经过分束面一次，无光能返回光源，因而能量的利用率相比 Sagnac 型分束器提高了近一倍。

其实体示意图如图 4。其中 $\angle BAF = 135^\circ$ ，

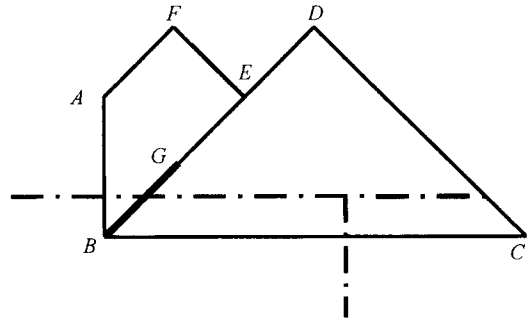


图4 横向剪切分束器实体
Fig. 4 Block diagram of the lateral shearing beam-splitter
 $\angle AFE = \angle BDC = \angle BEF = 90^\circ$, $\angle ABE = \angle DBC = \angle BCD = 45^\circ$. 取 $l_{AF} = l_{EF} = a$, $l_{BD} = l_{CD} = 3a$ 时: 易知可以产生的剪切量为

$$l = 2\sqrt{2}a \quad (3)$$

很显然，这个分束器能产生非常大的横向剪切量，且产生的横向剪切量与仪器的本身尺寸大小有关。和普通的 Sagnac 型和直角型分束器相比，在要求产生同样大小的剪切量时，该分束器可以做到很小，从而使干涉光谱仪整体体积大大缩小。

2 横向剪切分束器参量分析

2.1 入射光角度与可入射孔径的关系

如图 5，设入射光线 1 与水平线的夹角为 α (为最大角)，

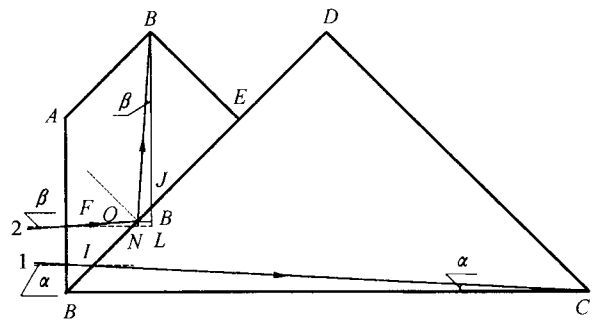


图5 横向剪切分束器分析
Fig. 5 Analytical diagram of the lateral shearing beam-splitter

为了保证入射到端面 CD，临界情况下， l_{IB} 为

$$l_{IB} = l_{BC} \tan \alpha \quad (4)$$

设入射光线 2 与水平线的夹角为 β (最大角)，为了保证光线先入射到 AF 面上再反射到 EF 面上，其临界情况如图所示。

$$l_{AH} = l_{FL} - \frac{\sqrt{2}}{2}a \quad (5)$$

$$l_{FL} = l_{FK} + l_{KL} \quad (6)$$

$$l_{FK} = l_{FG} \cos \beta = \frac{l_{EF}}{\cos(45+\beta)} \cos \beta = \frac{a}{\cos(45+\beta)} \cos \beta \quad (7)$$

因为

$$l_{HN} = l_{HL} - l_{NL} = \frac{\sqrt{2}}{2}a - l_{NL}$$

$$l_{NL} = l_{FG} \sin \beta = \frac{l_{EF}}{\cos(45+\beta)} \sin \beta = \frac{a}{\cos(45+\beta)} \sin \beta$$

所以

$$l_{HN} = \frac{\sqrt{2}}{2}a - \frac{a}{\cos(45+\beta)} \sin \beta$$

$$l_{KL} = l_{GN} = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}a - \frac{a \sin \beta}{\cos(45+\beta)} \right] \tan \beta \quad (8)$$

把式(6)、(7)和(8)代入式(5)中得

$$l_{AH} = -\frac{\sqrt{2}}{2}a + \frac{a \cos \beta}{\cos(45+\beta)} + \left[\frac{\sqrt{2}}{2}a - \frac{a \sin \beta}{\cos(45+\beta)} \right] \tan \beta \quad (9)$$

综上所述,为了保证最后能获得两束相干光从分束器出射,要满足下列关系

$$l_{IB} > l_{BC} \tan \alpha = 3\sqrt{2}a \tan \alpha \quad (10)$$

$$l_{AH} > -\frac{\sqrt{2}}{2}a + \frac{a \cos \beta}{\cos(45+\beta)} + \left[\frac{\sqrt{2}}{2}a - \frac{a \sin \beta}{\cos(45+\beta)} \right] \tan \beta \quad (11)$$

则可入射的范围为

$$l_{IH} = l_{AB} - l_{IB} - l_{AH} = 3\sqrt{2}a \left(\frac{1}{2} - \tan \alpha \right) + \frac{a \cos \beta}{\cos(45+\beta)} \left[\frac{\sqrt{2}}{2}a - \frac{a \sin \beta}{\cos(45+\beta)} \right] \tan \beta \quad (12)$$

取 $\alpha = \beta = U'$, U' 为入射孔径角,则可得

$$l_{IH} = 3\sqrt{2}a \left(\frac{1}{2} - \tan U' \right) + \frac{a \cos U'}{\cos(45+U')} \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2}a - \frac{a \sin U'}{\cos(45+U')} \right] \tan U' \quad (13)$$

令: $\xi = \frac{l_{IH}}{a}$, 则

$$\xi = 3\sqrt{2} \left(\frac{1}{2} - \tan U' \right) + \frac{\cos U'}{\cos(45+U')} \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sin U'}{\cos(45+U')} \right] \tan U' \quad (14)$$

只有满足 $\xi = \frac{l_{IH}}{a} > 0$, 才可以避免波面不相交而造成无法产生干涉. U' 得极限值在 6.3° 附近, 入射光孔径角不可以大于此值.

2.2 镀膜临界要求

BD界面上要镀上分束膜, 它的镀膜范围也有一定的要求. 从图5中可以确定分镀膜的分界位置为G点所在位置. 在BG段镀分束膜, 在EG段镀增透膜.

$$l_{EG} = l_{EF} \tan(45+\beta) = a \tan(45+\beta) \quad (15)$$

$$l_{BG} = l_{BE} - l_{EG} = 2a - a \tan(45+\beta) \quad (16)$$

3 讨论

如图6, $M = 2L \tan U'$, $U' = U$ 为前置镜的孔径角. L 为狭缝(Slit)到分束器端面上的距离. 设 $L = 10 \text{ mm}$, $U' = 5^\circ$, 则 $M = 2L \tan U' = 1.75 \text{ mm}$, 要求满足 $l_{IH} > M$, 可以保证最后产生光束干涉, 故取 $l_{IH} = 1.80 \text{ mm}$.

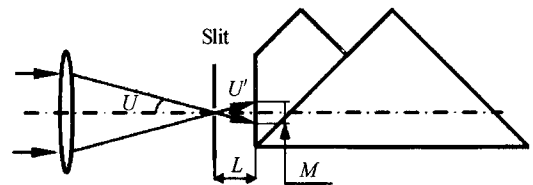


图6 静态干涉光谱仪前端

Fig. 6 Schematic diagram of front part of the stationary FTS

将 $U' = 5^\circ$ 代入式(14), 得 $\xi = 0.15$. 则 $a = \xi l_{IH} \approx 12 \text{ mm}$, 相应的剪切量

$$l = 2\sqrt{2}a \approx 34 \text{ mm}$$

设探测器采用单边过零 228 元采样, 像元尺寸 $s = 0.036 \text{ mm}$, 傅里叶变换透镜焦距 $f = 120 \text{ mm}$, 则最大光程差

$$L = \frac{lN_s}{f} = \frac{34 \times 228 \times 0.036}{120} \approx 2.325 \text{ mm}$$

可得光谱分辨率

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2L} = \frac{1}{2 \times 2.325} = 0.215 \text{ mm}^{-1} = 2.15 \text{ cm}^{-1}$$

这个光谱分辨率, 相对 Sagnac 型 100 cm^{-1} 的分辨率要提高近 2 个数量级.

4 结论

本文提出了一种基于新型横向剪切分束器的高分辨率静态干涉光谱仪结构. 该分束器结构可以产生具有很大的横向剪切量的两束相干光, 具有高光谱分辨率, 而且光束只经过分束面一次, 没有光能返回光源, 从而能量利用率大大提高, 可用于物质成分分析等领域. 此外, 这种横向剪切静态干涉光谱仪便于加工制造, 结构紧凑稳定, 抗干扰能力强. 同样的剪切量要求下, 可以做到是 Michelson 型、Sagnac 型或 Wollaston 棱镜型体积的四分之一, 非常适合航空、航天应用.

参考文献

- Okamoto T, Kawata S, Minami S. Fourier transform spectrometer with a self-scanning photodiode array. *Applied Optics*, 1984, **23**(2):269~273
- Junttila M L. Stationary fourier transform spectrometer. *Applied Optics*, 1992, **31**(21):4106~4112
- Junttila M L, Kauppinen J, Ikone E. Performance limits of stationary fourier spectrometers. *J O S A (A)*, 1991, **8**(9):1457~1462
- Leon S C. Broad source fringe formation with a fresnel biprism and a Mach-Zehnder interferometer. *Applied Optics*, 1987, **26**(24):5259~5265
- Hirschberg J G, Elli K. Pentaferometer: A solid sagnac interferometer. *Applied Optics*, 1999, **38**(1):136~138
- Xiangli B, Gao Z, An B Q. Static imaging fourier transform spectrometer. *Proc SPIE*, 1998, **3502**:1~34
- 相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术. *光学学报*, 1998, **18**(1):16~22
Xiangli B, Zhao B C, Xue M Q. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1):16~22
- 董瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪中的横向剪切干涉仪的空间光线分析. *光子学报*, 1999, **28**(10):901~905
Dong Y, Xiangli B, Zhao B C. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(10):901~905
- 董瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪中的横向剪切干涉仪. *光子学报*, 1999, **28**(11):991~995
Dong Y, Xiangli B, Zhao B C. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(11):991~995
- 相里斌. 傅里叶变换光谱仪中的主要技术环节. *光子学报*, 1997, **26**(6):549~554
Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6):549~55

A new Lateral Shearing Interferometer Stationary Fourier Transform Spectrometer of High Spectrum Resolution Resolving Power

Su Lijuan^{1,2}, Xiangli Bin¹, Yuan Yan¹

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

² Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039

Received date: 2005-02-16

Abstract A new lateral shearing beam-splitter based on a new method to split light is proposed. The principle of its structure is elaborated and analyzed, and the results of its application in FTS have been discussed. When the structures of beam-splitters are in the same size, this structure can generate ten times of the spacing more than generated by others. When it is applied to FTS, the FTS can reach high resolving power without increasing the size of the structure and the weight of it. There is no light to return to the source when the beam-splitter splits the light, so the energy of light in this method would be almost twice of that of the Sagnac method. Furthermore, compared with the Mach-Zehnder method, the realization of this method is easier. Its structure is compact and stable, can be used in the domain such as aviation, astronautics remote and sensing, and also works well in the material ingredient analysis field.

Keywords Fourier Transform Spectrometer (FTS); Lateral shearing beam-splitter; High resolving power; High throughput



Su Lijuan was born in 1981. She received her B. S. degree from the University of Science and Technology of China (USTC) in 2003. And now she is studying as a graduate student in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences.