# 基于多级组合棱镜提高激光中心波长检测精度的研究

## 刘晓东,张志杰

中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西太原 030051

摘 要 为了在保证抗干扰能力不下降的条件下提高对激光中心波长的检测精度,设计了多级组合棱镜系统,并提出了多级组合棱镜的干涉条纹拼接处理方法及相位耦合的计算公式。通过计算多级组合棱镜的干涉图强度、光程差函数及光谱分辨率,分析了采用三块子棱镜的组合结构的光谱获取,给出了用于分段干涉条纹拼接的处理方法及步骤,最终光谱分辨率可达2.875 cm<sup>-1</sup>。实验采用3块材料一致的30 mm×28 mm× 10 mm 的棱镜构成多级组合棱镜,对635.0 nm 标准激光进行相干处理。实验数据显示,分段的子棱镜分别采集得到了连续的光谱信息,再采用干涉条纹拼接处理方法后,经傅氏变换得到的光谱分布与标准光谱基本一致,而光谱分辨率得到了明显的提高。

关键词 光谱分析;多级组合棱镜;干涉条纹拼接;光谱分辨率 中图分类号:O436.3 文献标识码:A DOI:10.3964/i.issn.1000-0593(2011)08-2298-04

## 引 言

随着光谱分析的应用越来越广泛,目前传统的实验室光 谱分析设备已经不能满足日益增长的探测要求,尤其是在户 外遥测等领域,要求光谱探测系统要具备高稳定性、强的抗 干扰能力<sup>[1-3]</sup>。为了解决机械扫描型光谱仪抗干扰能力差, 不适合在户外进行实时探测等缺点,国内外对静态相干技术 进行了大量的研究,特别是随着高速探测器件的发展,以探 测器阵列空间扫描的静态调制干涉技术备受关注。空间调制 型光谱仪由于其结构紧凑、无机械扫描器件、抗干扰能力强 等优点,在遥测、遥感、瞬态光谱检测等领域受到广泛的应 用<sup>[4-6]</sup>。其中具有代表性的静态干涉方法<sup>[7-9]</sup>主要有:一是以 Sagnac 结构为原型的三角共光路光栅光谱仪,二是静态迈克 尔逊型空间调制光谱仪,三是以双折射晶体为分光元件的偏 振型傅里叶变换光谱仪。

偏振型傅里叶变换光谱仪按分光元件可分为两类:一是 基于 Savart 板的横向剪切傅里叶变换光谱仪<sup>[10]</sup>;二是基于 沃拉斯顿棱镜角剪切的傅里叶变换光谱仪<sup>[11]</sup>。由于光谱分 辨率是最大光程差的倒数,所以为了获得更高的光谱分辨 率,需要增大最大光程差,或者增大空间扫描的有效路径。 美国宾尼福利亚州州立大学 Daninel Komisarek<sup>[12]</sup>提出了用 沃拉斯顿棱镜阵列代替单个沃拉斯顿棱镜,以增加光程差, 提高光谱分辨率的方法,结构角选取 1°,保证较好的成像质 量。Carlomagno<sup>[13]</sup>也做了相关的定性研究,对棱镜阵列的结 构设计做出了仿真计算。北京交通大学全雷<sup>[14]</sup>等采用同样 的方法,选取 20°的结构角,在放弃成像的条件下大幅提高 了光谱分辨率。

多双折射棱镜拼接技术在不改变棱镜基本尺寸的条件下 可以有效的增大光程差,但是棱镜的拼接不是一个完整的连 续光程差变化过程,很可能会造成干涉条纹不匹配,从而使 傅里叶变换得到的光谱数据失真。所以采用该技术最大光谱 分辨率时,多个子棱镜间的静态干涉条纹的拼接处理方法成 为了双折射棱镜阵列型光谱仪性能优劣的核心问题之一。本 文在分析了双折射棱镜阵列探测原理的基础上,深入地研究 了子棱镜结构角、冗余量、及干涉具尺寸之间的关系,最终 设计了子棱镜间干涉条纹拼接的处理方法,使分段的干涉条 纹又具有了连续性。

## 1 多级组合棱镜设计

#### 1.1 双折射棱镜

双折射棱镜由两个直角的子棱镜组成<sup>[15]</sup>,其光轴相互 正交,如图1所示。光从棱镜1的直角边入射,到达分束面 (BS)时,被分为相互垂直的两束线偏振光。

由于 o 光和 e 光在相同的介质里折射率不相同,而所走 几何路径相同,所以产生光程差。则从距离双折射棱镜零光 程差位置起 l 处,其光程差为

收稿日期: 2010-08-25, 修订日期: 2010-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(60572019)和山西省自然科学基金项目(2009011023)资助

作者简介:刘晓东,1979年生,中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室讲师 e-mail: liuxiaodong\_1@163.com

$$r = 2l(n_{\rm o} - n_{\rm e})\tan\theta \tag{1}$$

式中, n。和 n。为棱镜晶体分别对于 o和 e 光的折射率, θ为 子棱镜角。根据上述公式可以看出, 双折射棱镜的最大光程 差与结构角、棱镜长度有关。所以为了增大光谱分辨率, 可 以通过增大棱镜有效长度和增大结构角的方式实现。



Fig. 1 Wollaston prism

### 1.2 多级组合棱镜

由于最大光程差与结构角的正切是正比关系,所以通过 增大结构角提高光谱分辨率的方法是有限的,同时,增大结 构角会使出射棱镜的分束角β也增大,这样会影响干涉条纹 的成像,为有效采集带来困难。而单纯的增大沃拉斯顿棱镜 的长度是不现实的,不但受到材料尺寸的限制,大部分仪器 也不能无限制的扩大。采用多级组合双折射棱镜的结构可以 是棱镜长度分段增加,这样总体积并没有多大变化,而光程 差得到了较大的提高,具体结构如图2所示。



棱镜阵列的每个子棱镜的结构角都一样,同时,组成沃 拉斯顿棱镜的倾斜楔形板的斜边是垂直的,即 *AB* (*CD*)。如 图 2(a)所示,通过增大棱镜尺寸增大光程差,而实际应用当 中不能无限的增大棱镜尺寸,所以采用图 2(b)中阵列的方式 使沃拉斯顿棱镜的有效长度分段延长,从而实现增大光程差的目的。阵列中的每个子棱镜必须有重叠,因为要提供连续的光程差变化才能达到不丢失光谱数据的效果,所以子棱镜间的重叠为干涉条纹提供了冗余,以便干涉条纹拼接过程中 保证光程差的连续性。

# 2 系统设计及干涉条纹的拼接

以双折射棱镜组为主要干涉器件的光谱仪如图 3 所示, 系统含准直系统、起偏器、双折射棱镜组、检偏器、聚焦系 统、面阵 CCD 等组成。光源的辐射光经准直系统整形后通过 起偏器,起偏器的偏振方向和双折射棱镜组中子棱镜的光轴 成 45°。则出射后的偏振光束在分束面处变为两束相互正交 的偏振光,分别为寻常光(o 光)和非寻常光(e 光),其振动频 率、能量均相等。由于子棱镜间的偏振方向是相互垂直的, 所以 o 光和 e 光之间发生反转,即光束偏振性质转变。最终, 通过选用偏振方向和起偏器一致的检偏器将出射的偏振光转 换成可以形成相干效果的两束等能量的偏振光。最后,由聚 焦系统汇聚在面阵 CCD 上,形成多组干涉条纹。在波长( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ )范围中,有干涉图的强度为

$$I(x) = 2B_0 + 2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda) \cos 2\pi \mu x \, \mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

### 其中, $B_0$ 为光谱初始强度,x为光程差, $\lambda$ 为波长。



Fig. 3 Spectrometer of multi-level combination prisms

若一个双折射棱镜的最大光程差为 X,则 n 个子棱镜组成的 双折射棱镜组的总光程差也会线性的增加,其对应的光谱分 辨率有

$$R \propto \frac{1}{nX} \quad n = 1, 2, 3, \cdots \tag{3}$$

理论上光谱分辨率提高了 n 倍。

实际棱镜阵列以三块子棱镜拼接而成,结构角  $\theta$ 选择 5°,单个子棱镜的几何尺寸为 35 mm×7 mm×10 mm(长× 宽×高),棱镜阵列的材料选用方解石( $n_o - n_e = 0.1705$ ), 则有拼接后的理想等效棱镜长度为

$$L = (d - 2c)n \tag{4}$$

其中, *c* 为图 2(a)中冗余量, *d* 为图 3 中棱镜长, *n* 为子 棱镜个数(*n*=3)。则由式(4)可得该沃拉斯顿棱镜阵列的理 想光谱分辨率为

$$R = \frac{1}{opd} = 2n(d-2c)(n_o - n_e)\tan\theta$$
(5)

将 n=3, c=1 mm,  $n_o-n_e=0$ . 170 5,  $\alpha=5$ °带入式(5), 有光谱分辨率为 2. 875 cm<sup>-1</sup>。

干涉条纹拼接处理方法步骤如下:

(1)通过子棱镜个数、长度、结构角等参数计算单个棱 镜和棱镜阵列的光程差,由光程差推导光谱分辨率,依据光 谱分辨率和 CCD 像元尺寸确定在棱镜中干涉条纹的宽度。

(2)根据光谱探测范围和结构角求解干涉条纹相位变化 规律,为子棱镜边沿的干涉条纹相位拼接提供依据。

(3)结合棱镜中干涉条纹的宽度和相位变化规律计算理 想情况下的冗余量 c,为了确保干涉条纹有重叠并且相位变 化一致,实际冗余量取理想情况的 150%。

(4)将采集到的干涉条纹进行图像处理,校正斜条纹, 使所有子棱镜的干涉条纹都正交于采样线,然后拼接各个子 棱镜间的干涉条纹。最终连接所有干涉条纹数据,作为一个 大棱镜的总有效长度进行傅里叶变化求解光谱分布。

### 3 实验

#### 3.1 仪器

沃拉斯顿棱镜阵列的子棱镜尺寸为  $35 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10$ mm,材料方解石 $(n_o - n_e = 0, 1705)$ ,结构角为 $5^\circ$ ,测试激光 采用635, 0 nm半导体激光器。

#### 3.2 结果分析

图 4 为采用沃拉斯顿棱镜阵列及面阵 CCD 探测器采集 得到的干涉条纹图样。如图所示每个子棱镜的干涉条纹并不 一致。每个棱镜的干涉条纹不与长边垂直的主要原因是工艺 上不能使棱镜加工的完全平整,同时由于每个棱镜的结构角 也可能存在误差,所以每个棱镜的干涉条纹方向都会存在一 定的偏差。

通过干涉条纹拼接处理方法将每段的干涉条纹先校正成 垂直棱镜长边的干涉条纹,然后根据探测波长和相位变化规



律计算冗余量的理论值,减去重叠的冗余量将分段的干涉条 纹连接在一起,最终通过傅里叶变换求得光谱分布如图 5 所 示,其中图 5(a)为标准光谱,图 5(b)为采用干涉条纹拼接处 理方法后的光谱分布,图 5(c)为未采用干涉条纹拼接处理方 法而直接拼接的光谱分布图。

由图 5 可知,(a)中标准光谱的主峰高,旁瓣少而均匀, 对应最大值位置的波数为 635.0 nm,与激光光谱所给波长 值误差非常小。(b)中的采用干涉条纹拼接处理方法实现分 段干涉条纹的拼接,然后傅氏变换得到的光谱相比标准光谱 略差,对应主峰(光谱归一化幅度)低,波长位置为 633.9 nm。(c)中对分段干涉条纹不做处理,直接拼接形成整体的 干涉条纹进行傅里叶变换,得到的光谱分布失真比较严重。 主峰大幅降低,出现一个明显的旁瓣,这个峰值也被展宽 了,对应最大值位置的波长位置为 629.7 nm。三幅图说明采 用干涉条纹拼接处理方法对分段干涉条纹进行预处理可以有 效地改善由于干涉条纹拼接造成的光谱失真。





(a): Standard spectrum; (b): Multi-level combination prisms spectrum; (c) One prism spectrum

## 4 结 论

在分析了沃拉斯顿棱镜光程差形成机理的基础上,得到 了提高沃拉斯顿棱镜光谱分辨率的方法为增大棱镜有效尺寸 和增大结构角。由于增大结构角会带来干涉条纹质量下降的 问题,故系统采用沃拉斯顿棱镜阵列的方式增大棱镜有效长 度,从而实现提高光谱分辨率的目的。计算了沃拉斯顿棱镜 阵列干涉图的强度、光程差函数和光谱分辨率,实验采用 3 块子沃拉斯顿棱镜组成,每个子棱镜尺寸为 30 mm×7 mm ×10 mm,最终求得光谱分辨率可达 2.875 cm<sup>-1</sup>。给出了用 于分段干涉条纹拼接的干涉条纹拼接处理方法及步骤,通过 对标准 635.0 nm 激光进行相干处理、傅里叶变换等证明该 方法可以有效地改善由干涉条纹拼接造成的光谱失真。

#### References

- [1] WU Hai-ying, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang(吴海英,张淳民,赵葆常). Acta Physica Sinica(物理学报). 2009, 58(2): 930.
- [2] WU Wen-di, WANG Zhao-bing, WANG Hai-long(吴闻迪,王召兵,王海龙). Optoelectronics Letters, 2008, 5(3); 28.
- [ 3 ] Thomas S Spisz, Patricia K Murphy, Christopher Chemical and Biological Sensing 🛄 , 2007, 6554: 1.
- [4] CHEN Xi-yuan, SHAN Ming(陈西园,单 明). Applied Laser(应用激光), 2003, 23(3): 161.
- [5] ZHANG Xu, WU Fu-quan, PENG Han-dong(张 旭, 吴福全, 彭捍东). Laser Journal(激光杂志). 2008, 29(1): 21.
- [6] CHEN Xin-rong, CHEN Lin-sen, ZHU Shi-qun(陈新荣,陈林森,朱士群). Applied Laser(应用激光). 2002, 22(5): 476.
- [7] XU Yu-xian, CAI Xin, ZHANG Zhi-li(徐毓娴,蔡 昕,张志利). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2001, 9(2): 131.
- [8] Daniel Komisarek, Karl Reichard, Shizhuo Yin. Science Direct, 2004, 10(16): 85.
- [9] DENG Hong-yan, WU Fu-quan, TANG Heng-jing(邓红艳, 吴福全, 唐恒敬). Laser Journal(激光杂志), 2005, 26(4): 42.
- [10] CHEN Xi-yuan (陈西园). Optical Technique(光学技术), 2004, 30(5): 540.
- [11] WU Hai-ying, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang(吴海英,张淳民,赵葆常). Acta Physica Sinica(物理学报). 2009, 58(3): 1642.
- [12] Daniel Komisarek. Doctor of Philosophy. The Pennsylvania State University, 2003.
- [13] Carlomagno G M, Rapillo A. Springer Berlin/Heidelberg, 1986, 4(6):332.
- [14] TONG Lei, GAO Zhan(全 雷,高 瞻). Optical Technique(光学技术), 2008, 34(1): 57.
- [15] MU Ting-kui, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang(穆廷魁,张淳民,赵葆常). Acta Physica Sinica(物理学报), 2009, 58(6): 3877.

# Improving Laser Center Wavelength Detection Accuracy Based on Multi-Level Combination Prisms

LIU Xiao-dong, ZHANG Zhi-jie

National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract In order to improve the spectral resolution of birefringence prism under the conditions of ensuring the quality of interference fringes image, the system used multi-level combination prisms and designed the method of interferometer fringes splice. According to calculation of the interferometer fringes intensity of multi-level combination prisms, the optical path difference function and the spectrum resolution, the present paper analyzed that the least spectrum resolution is 2, 875 cm<sup>-1</sup> in multi-level combination prisms of four prisms structure. The method of interferometer fringes splice was designed to splice the section interferometer fringes, and in experiment the size of multi-level combination prisms is 30 mm  $\times$  28 mm  $\times$  10 mm. The standard 635 nm laser for getting the interferometer fringes was dealed with. Experimental data show that the detection spectrum distribution of the 635, 0 nm laser was distorted by the direct splicing of the interference fringes, while the detection spectrum distribution of the 635, 0 nm laser was consistent with the standard spectrum by the method of interferometer fringes splice. So the method can effectively avoid spectrum distortion by interferometer fringes splice in multi-level combination prisms.

Keywords Spectrum analysis; Multi-level combination prisms; The splice of interferometer fringes; Spectrum resolution

(Received Aug. 25, 2010; accepted Dec. 30, 2010)