

文章编号: 0253-2239(2007)04-0643-4

# 一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪\*

简小华<sup>1</sup> 张淳民<sup>1</sup> 孙尧<sup>1</sup> 吴磊<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国兵器工业 205 研究所, 西安 710049)  
(<sup>2</sup> 西安应用光学研究所, 西安 710065)

**摘要:** 为了克服传统成像光谱仪稳定性差,干涉条纹杂乱复杂等缺点,提出了一种基于可调横向剪切量萨伐尔(Savart)偏光镜的新型偏振干涉成像光谱仪。具体分析推导了光线入射角变化对这种新型的可调横向剪切量萨伐尔偏光镜的光程差、偏振度以及对系统干涉条纹的影响;简要论述了这种新型偏振干涉成像光谱仪的工作机理和运行方式,从原理上论证了它具有重量轻、体积小、抗震性好、适用范围广、分束光线平行均匀分布、干涉图样清晰、处理简便等诸多优点,为新型可调横向剪切量的偏振干涉成像光谱仪的设计、研制、调试和工程化提供理论依据和实践指导。

**关键词:** 成像系统;干涉成像光谱仪;可调横向剪切量;萨伐尔偏光镜;光程差

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

## Novel Polarization Interference Imaging Spectrometer with Adjustable Lateral Displacement Savart Polariscopes

Jian Xiaohua<sup>1</sup> Zhang Chunmin<sup>1</sup> Sun Yao<sup>1</sup> Wu Lei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> School of Scienc, Xian Jiaotong University, Xian 710049)  
(<sup>2</sup> Xian Institute of Applied Optics, Xian 710065)

**Abstract:** To avoid the problems of the classical interference imaging spectrometer, such as poor stabilization, and intractable interference fringes, a novel polarization interference imaging spectrometer based on a new adjustable lateral displacement Savart polariscopes is developed. The effect of the incident angle on the optical path difference, state of polarization and interference fringes of the system is deduced in detail. The work principle and operation mode of this spectrometer are also analyzed, which proves that this interference imaging spectrometer has less weight, smaller capacity, better vibrational resistance, splitted beams with parallel and uniform distribution, and clear interference pattern, and can be widely used in many different fields. The theoretical and practical guidance is thereby provided for the study, design, and debugging or engineering of the new polarization interference imaging spectrometers with adjustable lateral displacement.

**Key words:** imaging system; interference imaging spectrometer; adjustable lateral displacement; Savart polariscopes; optical path difference

## 1 引言

自 20 世纪 80 年代初期美国宇航局喷气推进实验室(JPL)提出了成像光谱仪的概念至今,成像光谱技术已得到了飞速的发展和广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。早期出现的成像光谱仪大多基于色散棱镜或衍射光栅,称为色散型成像光谱仪。这类成像光谱仪原理

简单、性能稳定,但存在系统光通量小探测灵敏度低的不足,妨碍了它的进一步发展,对高灵敏度探测器的依赖和对光学系统的苛刻要求成为此类技术的瓶颈。经典的干涉成像光谱仪则基于迈克耳孙干涉仪,依靠精密动镜的匀速、直线往返运动获得干涉图,光路不受狭缝限制,其系统光通量比色散型成像

\* 国家自然科学基金重点项目(40537031)、国家 863 计划(2006AA12Z152)、国家自然科学基金(60278019,40375010)、陕西省科技计划攻关项目(2005K04-G18)和西安交通大学“985”信息电子平台资助课题。

作者简介: 简小华(1982-),男,浙江人,博士研究生,主要从事成像光谱技术研究。E-mail: 01095004@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 张淳民(1956-),男,陕西人,教授,博士生导师,主要从事空间光学及成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: acm@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-04-17; 收到修改稿日期: 2006-07-14

光谱仪可高两个数量级,但由于扫描时对镜面的倾斜和横移具有很高的要求,系统的稳定性大大降低,应用环境和条件也受到限制。为了克服精密动镜系统稳定性的难题,人们又提出了空间调制干涉成像光谱仪,并在航天遥感、风场探测等方面得到了重要的应用<sup>[3]</sup>。这种成像光谱仪的光路中也设置狭缝,其探测灵敏度不高,但与色散型光谱成像仪相比,由于其狭缝的宽度与光谱分辨力无关,因此,在空间分辨力要求不高的条件下,空间调制干涉成像光谱仪也可以具有较高的灵敏度。为了解决成像光谱技术中高稳定度与高灵敏度的矛盾,本文在对干涉成像光谱技术多年研究结果的基础上<sup>[4~7]</sup>,提出了一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪,采用转镜代替直线运动的精密动镜机构,具有较高的系统稳定性、探测灵敏度和探测速度,同时也克服了现有技术中存在的一些原理缺陷。

## 2 萨伐尔偏光镜结构与原理分析

分束装置是光学实验尤其是干涉光谱仪中常用的重要部件。传统的迈克耳孙干涉仪中,它由一个半透半反镜和两个反射镜组成。这种分束装置在防震条件好的场合能够有效地工作,但在环境干扰严重时,由于反射镜、半反镜及各自的支架振动状态(幅度、频率和振动方向)的不同,造成了分束光之间的相位抖动,降低了形成的干涉条纹的稳定度,严重时会使相关的实验不能进行。改进的常规可调分束角棱镜<sup>[8]</sup>(如罗雄棱镜、沃拉斯顿棱镜等)虽然能形成相对稳定的分光束,但分光束偏振性较差,光强分布不均,以及干涉图像复杂干涉数据不易处理等弱点极大地限制了其应用与发展。而本文描述的基于萨伐尔板的可调横向剪切量偏光镜产生的两线偏振光彼此平行,偏振度高相干性好,干涉图像简单干涉数据处理方便,其横向剪切量不但具有较大取值而且可调,这些明显的特点,无疑将拓宽横向剪切偏光器件的应用范围。

可调横向剪切量萨伐尔偏光镜是一种新型的分束装置<sup>[9]</sup>,它由如图 1 所示的光轴相互垂直且各与系统光轴成 45°角的两块等厚单轴负(正)晶萨伐尔板及  $\lambda/2$  相位延迟片组成。从光源发出的光经起偏后,入射到萨伐尔板的左板,分为寻常光(o 光)和非常光(e 光),o 光沿原方向传播,e 光偏折。当两束光通过  $\lambda/2$  板时,由于它们的偏振方向与  $\lambda/2$  板光轴都成 45°角,所以两束线偏振光出射  $\lambda/2$  板时振动

方向转动了 90°。射入第二块晶体板后,原 o 光变为 e 光,原 e 光变为 o 光,在萨伐尔板的后表面偏折后沿平行于入射光的方向射出,并由此形成一定的横向剪切量  $d$ ,为光线经成像系统形成干涉图样奠定了基础。

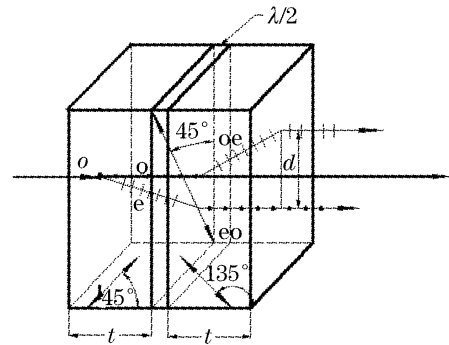


图 1 萨伐尔偏光镜结构组成与光学原理图

Fig. 1 Structure and optical principle of Savart polariscope

在图 2 中,光线从折射率为  $n_i$  的各向同性介质以 o 点为入射点入射萨伐尔偏光镜。入射光入射角为  $i$ ,入射面与  $zox$  平面(主截面)成  $\omega$  角。

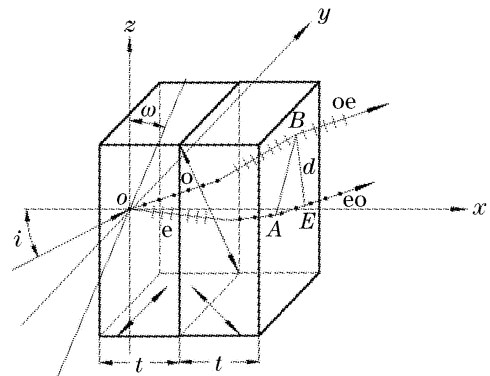


图 2 萨伐尔偏光镜光线追迹图

Fig. 2 Beam tracing diagram of Savart polariscope

通过计算可知经萨伐尔偏光镜后光线成为平行于入射光线且有一定间距的二光束<sup>[10]</sup>,其总的横向剪切量为

$$d = \overline{BE} = \sqrt{|\overline{AB}|^2 - |\overline{AE}|^2}, \quad (1)$$

总的光程差  $\Delta = L_{oe} - L_{eo} - n_i |\overline{AE}|$ ,分别将各参量代入:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{t n_{e2}^2(\theta)}{\sqrt{n_{e2}^2(\theta) - n_i^2 \sin^2 i}} - \frac{t n_{e1}^2(\theta)}{\sqrt{n_{e1}^2(\theta) - n_i^2 \sin^2 i}} - n_i |\overline{AE}| = \\ &= n_i \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} t (\cos \omega + \sin \omega) \sin i + \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} n_i^2 \frac{n_o^2 - n_e^2}{(n_o^2 + n_e^2)^{3/2}} t (\cos^2 \omega + \sin^2 \omega) \sin^2 i. \quad (2) \end{aligned}$$

更为详细的具体推导可参考文献[10]。以方解石晶体为例( $n_e=1.48640, n_o=1.65835$ ), 可得到图3所示的萨伐尔偏光镜光程差随  $i, \omega$  的变化曲线。

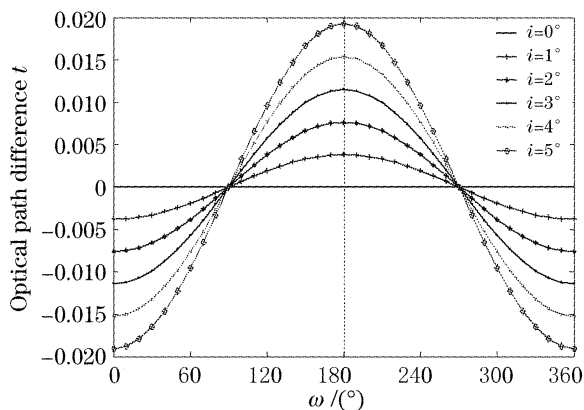


图3 光程差随  $i, \omega$  的变化曲线

Fig. 3 Variation of optical path difference versus the parameters of  $i$  and  $\omega$

结合图像可以直观地发现, 横向剪切量和光程差在  $\omega=180^\circ$  左右成对称分布, 这是因为视场补偿型萨伐尔偏光镜前后两个萨伐尔板的光轴方向在空间关于  $\omega=180^\circ$  完全对称所导致的。横向剪切量和光程差在入射角  $i \neq 0$  时围绕  $i=0$  做类似于正弦曲线的上下波动。横向剪切量在  $0^\circ, 180^\circ$  出现最小值, 在  $90^\circ, 270^\circ$  出现最大值。而光程差在  $0^\circ$  出现最小值, 在  $180^\circ$  出现最大值, 并在  $90^\circ, 270^\circ$  出现零光程差。这些都与两块萨伐尔板的光轴方向有直接关系。

根据可调分束角棱镜, 在光源以固定方向入射时通过旋转镜体改变入射角从而得到较大的分束角获得大光程差的原理<sup>[11]</sup>, 我们也可利用萨伐尔偏光镜光程差随入射角近似线性增长的特点, 在保持入射平面与主截面  $\omega$  不变的前提下, 旋转棱镜改变入射角  $i$  即可获取较大的光程差, 若在此条件下连续采样一定的干涉数据即可获取光源在一定光程差范围内的干涉数据, 适当处理即可获取光谱信息, 这也是我们设计的基于可调横向剪切量萨伐尔偏光镜的新型偏振干涉光谱仪的理论基础。

### 3 干涉成像光谱仪

图4是我们自主设计的基于双折射晶体(可调横向剪切量萨伐尔偏光镜)分光器的偏振干涉成像光谱仪的光路图。其中  $P_1$  和  $P_2$  为偏振方向互相垂直放置的两偏振片, 萨伐尔偏光镜固定在  $\omega=180^\circ$  的平面上, 并可在纸面方向上围绕镜体中心旋转摆动。初始时刻,  $P_1$  的偏振方向与萨伐尔偏光镜

左板主光轴成  $45^\circ$  角, 以确保两分光光束光强对称分布, 且初始光程差为零, 便于后期数据处理。

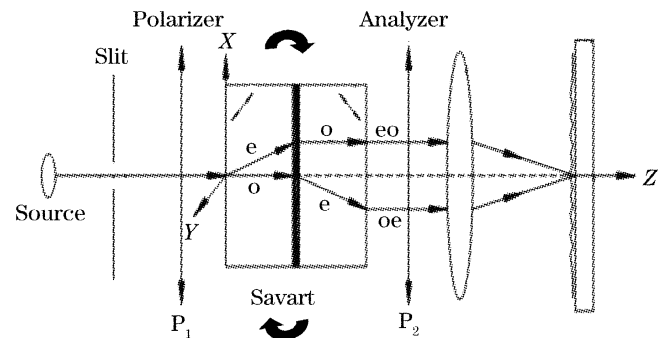


图4 新型可调横向剪切量偏振干涉成像光谱仪原理图  
Fig. 4 Theoretical model of the novel polarization interference imaging spectrometer with adjustable lateral displacement Savart polariscope

由上面的计算分析可知当  $\omega=180^\circ$  时系统可获得最大的光程差, 而光谱仪的分辨力一般与光程差成正比<sup>[12]</sup>, 从而有利于提高光谱仪的分辨力。光源(Source)发出的光通过狭缝后经起偏器变为沿偏振片偏振方向振动的线偏振光, 入射到萨伐尔偏光镜上后发生双折射, 成为两束线偏振光: 寻常光(o光)和非寻常光(e光), o光沿原入射方向传播, e光则发生偏折。而在进入萨伐尔偏光镜右板时, 由于光轴方向的改变, 原o光变成e光, 原e光变成o光。出射光变成两束有横向剪切量, 振动方向互相垂直且平行于原入射光传播方向的线偏振光, 经分析器后两束光振动方向一致, 经成像镜后在探测器表面相遇形成干涉条纹。旋转偏光镜, 通过旋转镜体使入射角在  $-i$  到  $i$  区间内往复连续变化, 虽然由于旋转使入射点发生变化, 但是根据萨伐尔偏光镜出射光线与入射光线平行传播的特点, 易知镜体旋转造成入射角改变(不同入射点)与光线入射角改变(同一入射点)造成的光程差分布是相同的, 即可获取如图3随转入射角变化的光程差分布, 并由此获得最终不同光程差下的干涉条纹。且由于入射角关于可调横向剪切量萨伐尔偏光镜中心平面(图4中的YZ面)具有良好的上下对称变化性, 因此通过适当的数据采集(单边或双边)<sup>[12]</sup>, 就可以得到一定光程差范围内的一组干涉数据, 由于这种干涉图像采集模式类似迈克耳孙干涉光谱仪, 因此数据之间关系清晰, 数据采集与复原处理可利用光程差非线性的转镜式傅里叶变换光谱仪的处理方式<sup>[13]</sup>, 相关实验表明这种转镜式傅里叶变换光谱仪中用转镜代替直线移动的精密动镜, 可有效提高光谱分辨力和时间分辨力<sup>[14,15]</sup>。此外, 由图3光程差随  $i, \omega$  的变化曲

线可知,当  $\omega$  一定时( $\omega \neq 180^\circ$ ),光程差始终与  $i$  成近似的线性关系,而对  $\omega$  的小幅变化不敏感,因此干涉成像光谱仪中萨伐尔偏光镜允许的倾斜误差容限较大,系统稳定性大大提高<sup>[16]</sup>。

## 4 结 论

可调横向剪切量萨伐尔偏光镜与可调分束角棱镜相比,其最大的优点在于保持了分束后的出射光线极高的偏振度,且分束光线保持彼此平行,光束强度分布对称均匀,克服了分束角型分束棱镜光线发散不易收集,干涉条纹杂乱复杂等缺点。而基于可调横向剪切量萨伐尔偏光镜的新型偏振干涉成像光谱仪,和传统的迈克耳孙干涉仪相比,其突出优点是装置的整体性强,消除了半反半透镜和反射镜之间的相对震动,同时由于两光束均出射于同一器件,对于工作平台和分束棱镜震动造成的两光束之间相位相对抖动也有很好的补偿作用,可得到相当稳定的干涉条纹,大大提高了光学系统的抗震性能。

其次由于使用了萨伐尔偏光镜,改传统干涉仪动镜相对移动为绕分束器中心旋转,采用转镜代替直线运动或摆动的精密动镜机构,具有较高的系统稳定性、探测灵敏度和探测速度,能够在与被探测目标相对静止的情况下,获取目标的两维空间信息和一维光谱信息。因此光谱仪具有体积小,重量轻,抗震性好等诸多优点。依靠转动镜体形成连续变化的光程差,在采用非线性补偿后<sup>[11]</sup>,可大大拓宽转镜的折射率、工作角等参量的选择余地,在工程设计中也具有很大的实际意义,极大地提高了干涉成像光谱仪的应用范围。

## 参 考 文 献

- 1 Chunmin Zhang, Jian He. The generalization of upper atmospheric wind and temperature based on the Voigt line shape profile[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(26): 12561~12567
  - 2 Chunmin Zhang, Baochang Zhao, Bin Xiangli *et al.*. Interference image spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement [J]. *Optik*, 2006, **117**: 265~270
  - 3 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 16~22 (in Chinese)
- 相里斌,赵葆常,薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. 光学

- 学报, 1998, **18**(1): 16~22
- 4 Chunmin Zhang, Baochang Zhao, Bin Xiangli. Novel wide field of view polarization interference imaging spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(33): 6090~6094
  - 5 Chunmin Zhang, Bin Xiangli, Baochang Zhao. Permissible deviations of the polarization orientation in the polarization imaging spectrometer[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2004, **6**(8): 815~817
  - 6 Chunmin Zhang, Baochang Zhao, Bin Xiangli. Analysis of the modulation depth affected by the polarization orientation in polarization interference imaging spectrometers [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(4~6): 221~225
  - 7 Chunmin Zhang, Bin Xiangli, Baochang Zhao. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(1): 21~26
  - 8 Zhu Huafeng, Song Lianke, Wang Xiuming. Study about splitting intensity ratio of a prism with variable beam splitting angle[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(5): 614~616 (in Chinese)
- 朱化凤,宋连科,王秀民. 可调分束角棱镜分束光强比研究[J]. 光学技术, 2003, **29**(5): 614~616
- 9 Zhang Chunmin, Xiangli Bin, Zhao Baochang *et al.*. The latest developments of technique of interference imaging spectrometer [J]. *Optica Technique*, 2000, **26**(3): 232~234 (in Chinese)
- 张淳民,相里斌,赵葆常等. 干涉成像光谱仪技术的新发展[J]. 光学技术, 2000, **26**(3): 232~234
- 10 Wu Lei, Zhang Chunmin, Yuan Yan *et al.*. Exact calculation of the lateral displacement and optical path difference of Savart polariscopes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 885~890 (in Chinese)
- 吴磊,张淳民,袁艳等. 萨伐尔偏光镜横向剪切量和光程差的精确计算[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 885~890
- 11 Guo Zhuanyun, Wang Yongjin, Zhang Tiequn. A novel adjustable cross angle beam splitter[J]. *Optical Instruments*, 1995, **17**(6): 27~30 (in Chinese)
- 郭转运,王勇竞,张铁群. 一种新型分束元件——可调交角分束棱镜[J]. 光学仪器, 1995, **17**(6): 27~30
- 12 Robert John Bell. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* [M]. Academic Press, Inc., 1972. 63~68
  - 13 Yang Xiaoxu, Zhou Sizhong, Xiangli Bin *et al.*. Studies on nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1388~1392 (in Chinese)
- 杨晓许,周泗忠,相里斌等. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1388~1392
- 14 Winthrop Wadsworth, Jens Peter Dybwad. Ultra high speed chemical imaging spectrometer[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3082**: 148~194
  - 15 Winthrop Wadsworth, Jens Peter Dybwad. Rugged high speed rotary imaging Fourier transform spectrometer for industrial use [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4577**: 83~88
  - 16 Yang Xiaoxu, Zhou Sizhong, Xiangli Bin. Studies of error limited of high speed rotary spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 338~341 (in Chinese)
- 杨晓许,周泗忠,相里斌. 转镜式干涉光谱仪中的误差容限研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(3): 338~341