

新型等效斜楔设计

张 瑞^{1,2,3}, 王志斌^{1,2,3}, 温廷敦^{1,2,3}, 王耀利^{1,2,3}, 李克武^{1,2,3}

- (1. 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对现有的静态斜楔干涉具无法实现零光程差, 并且对被测光的空间相干性要求较高, 进而影响光谱反演的准确性和复杂性问题, 提出了一种新型等效斜楔干涉具, 该等效斜楔由两种折射率不同的材料构成, 两个反射面完全垂直, 干涉的两束光是由同一束光分开而得, 因此对光的空间相干性无太高要求, 并且可以实现零光程差。理论推导了该斜楔不同位置的光程差公式和光谱反演公式, 并且设计了该等效斜楔, 其最大光程差可达 168.3 μm , 对光谱测量过程进行了仿真分析, 结合最大光程差和所测光谱波段分析了线阵 CCD 的像元数要求。采用 532 nm 单纵模激光器和 632.8 nm 氦氖激光器进行了实验分析, 实验结果得到中心波长误差小于 0.2%。

关键词: 等效斜楔; 折射率; 零光程差; 光谱; 色散

中图分类号: TN247; TJ95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2716-05

Design of novel equivalent static wedge

Zhang Rui^{1,2,3}, Wang Zhibin^{1,2,3}, Wen Tingdun^{1,2,3}, Wang Yaoli^{1,2,3}, Li Kewu^{1,2,3}

- (1. State Key Laboratory For Electronic Measurement Technology, Taiyuan 030051, China;
2. Key Lab of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;
3. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Existing static wedge interferometer can not achieve zero optical path difference, and it requires a strict spatial coherence of light, thereby affecting the accuracy and complexity of spectral inversion. Therefore, a novel equivalent static wedge was proposed. It consists of two different refractive index material, and two reflective surfaces perfectly vertical. Because interference of two beams of light is derived from a beam of light, it is not strictly required about spatial coherence. Moreover, it contains zero optical path difference. By deducing and analyzing the optical path difference of the arbitrary wedge position, the formula of spectral inversion was deduced. Then the wedge was designed and processed by using two materials which were different refractive index, and its maximum optical path difference could reach 168.3 μm . And the process of spectral inversion was simulated. Combining maximum optical path difference with the measured spectral band, the requirement of the linear CCD pixel count was analyzed.

收稿日期: 2015-01-22; 修订日期: 2015-02-27

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金(61127015); 国际科技合作项目(2013DFR10150)

作者简介: 张瑞(1987-), 男, 博士生, 主要从事光谱成像技术方面的研究。Email: ruizhanghy@163.com

导师简介(通讯作者): 王志斌(1966-), 男, 教授, 主要从事光电及光谱成像技术的研究。Email: wangzhibin@nuc.edu.cn

The wedge was analyzed by experiments which use 532 nm and 632.8 nm lasers. The results show that the spectral inversion center wavelength error is less than 0.2%.

Key words: equivalent wedge; refractive index; zero optical path difference; spectral; dispersion

0 引言

光谱测量在环境监测、农业、生化分析、食品检测、军事科学等领域中有很高的应用价值^[1-10]。在光谱仪中,根据测量光谱原理的不同主要分为3种^[11-51]:分光色散型(如光栅型、棱镜型、AOTF型等);时间调制型(如迈克尔逊干涉型);空间调制型(如斜楔干涉型^[9])。静态斜楔型具有结构简单、抗干扰能力强、可应用于复杂环境下等优点,但传统的斜楔由于结构的限制,无法实现零光程差,干涉信号更无法实现过零光程差采样;并且产生干涉的两束光来自空间不同的位置,这对被测光的空间相干性要求较高,传统斜楔的这些缺点对光谱反演的精度和速度(无法使用FFT反演光谱)有很大影响。文中通过改进传统斜楔结构,提出新型等效斜楔设计方法。

1 新型等效静态斜楔干涉具

1.1 静态斜楔傅里叶变换光谱测量基本原理

基于静态斜楔的傅里叶变换光谱测量原理如图1所示。入射光通过斜楔产生干涉信号,并通过柱面镜被线阵 CCD 探测,通过对探测的干涉信号傅里叶变换获得被测光谱。

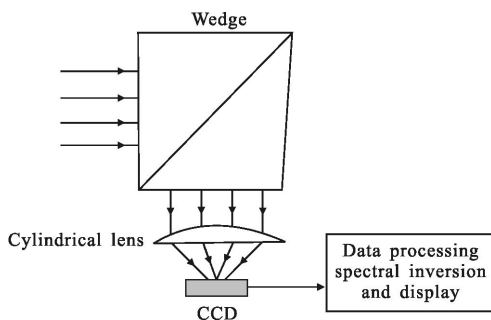


图1 静态斜楔傅里叶变换光谱测量原理图

Fig.1 Schematic of static wedge Fourier spectrum measurement

1.2 新型等效静态斜楔分析

如图2(a)所示,传统斜楔是由1路光和2路光在 ox 轴上 C 点干涉,由于是不同的两路相遇干涉,

这对被测目标的空间相干性要求较高;并且由于传统斜楔的一个反射面有一定的小倾斜角 α (这也是产生光程差的原因),没有零光程差干涉信号,无法根据干涉信号关于零光程差对称的特点实现相位校正,这样会影响测量的精度。为此文中提出改进的新型等效斜楔结构,如图2(b)所示。

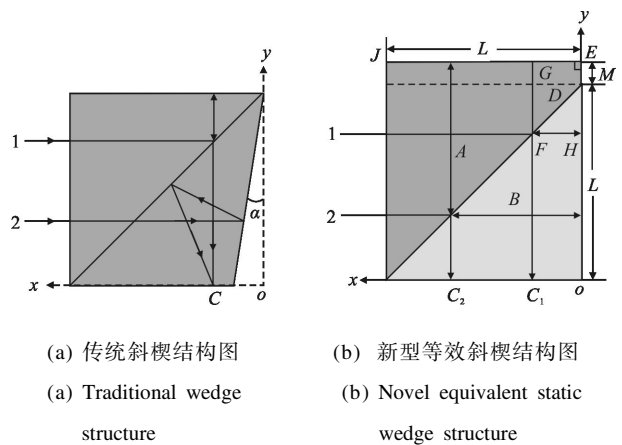


图2 斜楔结构图

Fig.2 Wedge structure

新型等效斜楔与传统斜楔相比主要有三点改进:(1)产生光程差的原理不同,传统斜楔的光程差主要由倾斜 α 角的反射面产生,而新型等效斜楔是由两种折射率不同的材料(图2(b)中的材料A和材料B)组成,因此光程差主要由折射率的不同产生;(2)两个反射面互相垂直,这样可以保证同一光路分成的两束光在 ox 轴上干涉,如图2(b)中1路光分成的两束光在 C_1 点干涉,2路光分成的两束光在 C_2 点干涉,这样可以避免由于被测光空间相干性差造成的影响;(3)材料B并不是与材料A完全对称,材料A略微比B宽 M (如图2(b)所示),并且A材料的折射率比B材料小,可以保证在 ox 轴上存在零光程差点,这样探测器获得的干涉信号可以实现过零采样,有利于后期干涉信号的相位校正等处理,进而提高测量精度。

接下来根据图2(b)具体分析新型斜楔的光程差。设材料A和材料B的折射率分别 n_A 和 n_B ,且 $n_A < n_B$ 。

因此, ox 轴上任意一点 C_1 处的光程差为:

$$S=2FH \times n_B - 2FG \times n_A = 2[(n_B - n_A)x - DE \times n_A] = 2[(n_B - n_A)x - M \times n_A] \quad (1)$$

式中: L 为 A 和 B 宽度; M 为 A 比 B 宽的高度 (如图 2(b)所示); x 为 C_1 点的横坐标。

由光的干涉理论可知, 复色光的干涉信号强度为:

$$I = \int_0^{\infty} I(\sigma) \cos(2\pi S \sigma) d\sigma = \int_0^{\infty} I(\sigma) \cdot \cos\{4\pi\sigma[(n_B - n_A)x - M \times n_A]\} d\sigma \quad (2)$$

式中: σ 为波数; $I(\sigma)$ 为入射光谱。

对光程差从零到最大光程差的干涉信号进行傅里叶变换可得被测光谱为:

$$I(\sigma) = \int_0^{S_0} 2I \times (n_B - n_A) \cos\{4\pi\sigma[(n_B - n_A)x - M \times n_A]\} dx \quad (3)$$

式中: S_0 为该斜楔的最大光程差。

2 仿真及实验分析

根据实际需要及所需光谱范围来选择斜楔材料, 以可见及近红外波段(波长为 400~2 000 nm)为例进行仿真和实验分析。

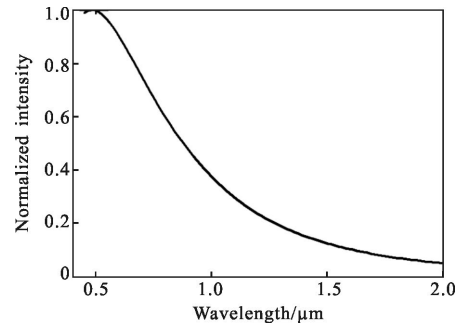
2.1 材料选择

从公式(1)可以看出, 在材料和尺寸确定后, 光程差只是 x 的函数, 这只是在理想状态下。由于任何材料都存在色散(即不同波长的光在同一种介质中的折射率不同), 实际中公式(1)是波长和 x 的函数。而在表示色散时, 常采用阿贝数 $V_d = (n_d - 1)/(n_f - n_c)$ 表示, 其中, n_d 为 589.3 nm 光的折射率, n_f 为 486.1 nm 光的折射率, n_c 为 656.3 nm 光的折射率。由阿贝数可以看出, 材料的色散越小, 阿贝数越大。考虑到公式(1)中 $n_B - n_A$ 随波长的影响, 应该选择色散相近(即阿贝数相近)的两种材料。

综合考虑后, 构成新型斜楔的两种材料应选择阿贝数较高的材料, 并且两种材料的阿贝数尽量相近。因此, 仿真和实验中选择新型斜楔(图 2(b)中)的材料 A 为 FK52 型光学玻璃(折射率 $n_A = 1.486$, 阿贝数 $V_d = 81.8$), 材料 B 为 N-PK52 型光学玻璃(折射率 $n_B = 1.497$, 阿贝数 $V_d = 81.6$), 斜楔宽度 $L = 9.0$ mm, $M = 0.01$ mm, EJ 面和 DO 面镀全反银膜, 确保在可见和近红外波段有较高的反射率。下面就该新型斜楔进行具体分析及实验。

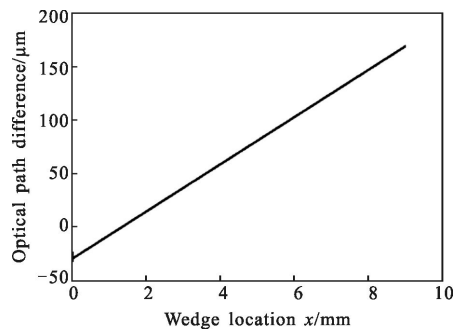
2.2 仿真分析

首先仿真入射光为 3 000 K 的高温黑体光谱为图 3(a)(光谱范围为 400~2 000 nm, 且为归一化光谱), 将具体参数代入公式(1)可得新型斜楔的 ox 轴上的光程差如图 3(b)所示。



(a) 入射光谱

(a) Incident spectral



(b) 光程差

(b) Optical path difference

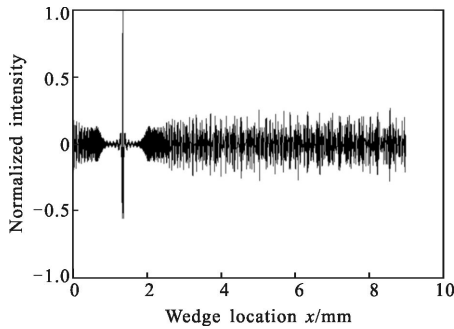
图 3 模拟入射光谱及光程差图

Fig.3 Simulation incident spectral and wedge optical path difference

将图 3(a)的光谱代入公式(2)可得在新型斜楔 ox 轴 x 不同位置的归一化干涉信号, 如图 4(a)所示, 可以看出该斜楔的干涉信号过零光程差, 线阵 CCD 得到的干涉信号也就可以实现过零采样, 这有利于后续的相位校正。将图 4(a)的干涉信号代入公式(3), 经傅里叶变换后得到的反演光谱与原始入射光谱对比如图 4(b)所示。

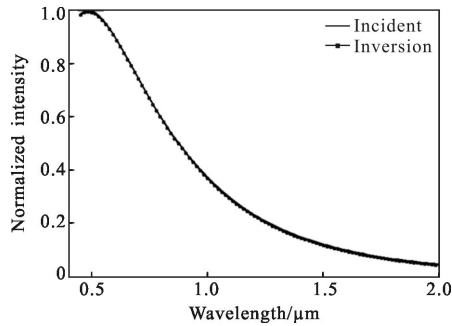
由图 4(b)可以看出, 反演光谱与原始光谱基本完全吻合, 微小的偏差主要是由光程差有限造成的。可以通过加大斜楔尺寸或增大两种材料的折射率差来增大光程差, 但是光程差越大需要 CCD 的像元数越多。根据光谱范围及光程差范围可知, 在线阵 CCD 处的干涉信号个数最多的 N_{\max} 为:

$$N_{\max} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{\lambda_{\min}} \quad (4)$$



(a) 干涉信号

(a) Interference signal



(b) 反演光谱

(b) Spectral inversion results

图 4 干涉信号及反演光谱图

Fig.4 Interference signal and spectral inversion results

根据二倍采样定律可知,线阵 CCD 的像元个数 N 应满足:

$$N \geq 2 \times N_{\max} \quad (5)$$

将上述仿真的光谱范围和光程差代入公式(4)和(5)可得:

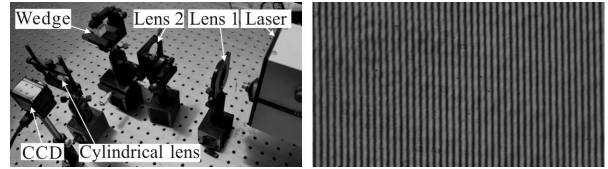
$$N \geq 2 \times N_{\max} = 2 \times \frac{S_{\max} - S_{\min}}{\lambda_{\min}} = 2 \times \frac{168.3 - (-29.7)}{0.4} = 990 \quad (6)$$

所以,应根据需要及探测器的像元个数合理选择斜楔的尺寸和两种材料的折射率差。

2.3 实验分析

为了进一步验证该新型斜楔的可行性,分别采用 632.8 nm 氦氖激光和 532 nm 单纵模固体激光进行实验,其中线阵 CCD 的像元个数为 1 024 个,大于公式(6)中的 990 个。具体实验装置如图 5(a)所示,激光首先通过两个透镜扩束准直,再通过设计的新型等效斜楔干涉具产生光程差,并且通过柱面镜后由 CCD 探测得到干涉信号,其中 632.8 nm 氦氖激光的

干涉信号如图 5(b)所示(由于干涉信号较密,图 5(b)为截取一部分干涉信号放大效果,532nm 单纵模固体激光与 632.8 nm 激光的干涉信号类似)。



(a) 实验装置

(b) 632.8 nm 氦氖激光的干涉图

(a) Experimental rig

(b) Interference signal

(632.8 nm He-Ne laser)

图 5 实验装置及干涉图

Fig.5 Experimental rig and interference signal

对干涉信号代入公式(3)进行傅里叶变换后获得被测激光光谱,其中得到的实验结果及误差如表 1 所示。由于设计的新型斜楔的最大光程差为 $S_{\max} = 168.3 \mu\text{m}$,根据傅里叶光学可知,光谱分辨率 $\Delta\delta = 1/S_{\max} = 1/168.3 \mu\text{m} = 59 \text{ cm}^{-1}$,对于所测波长的波长分辨率 $\Delta\lambda = \lambda^2 \times \Delta\delta$,将所测波段 400~2 000 nm 代入可知该斜楔的波长分辨率为 0.95~23.77 nm,由表 1 的实验结果可以看出半峰宽也刚好在该波长分辨率范围内。

表 1 实验结果

Tab.1 Experimental data

Laser wavelength λ /nm	Experimental result		
	Wavelength λ' /nm	Half-peak width $\Delta\lambda'$ /nm	Error $ \lambda' - \lambda /\lambda$
532	533	1.9	0.19%
632.8	632	2.4	0.13%

由实验结果可看出,中心波长还存在一定的误差,其主要原因有两方面:(1) 该新型斜楔虽然有效降低了色散的影响,但是并没有完全消除色散,可以通过合理选择材料来继续改进,但是需要根据材料成本和所需精度合理选择;(2) 光程差有效且线阵 CCD 的像元数也有限,可以通过增大斜楔尺寸和两种材料的折射率差及线阵 CCD 的像元数来改进,但也要根据成本和需要合理选择。

3 结论

文中提出的新型等效斜楔采用两种折射率不同

的材料构成,两个反射面完全垂直,使得该等效斜楔可以实现零光程差,对光的空间相干性要求较低。理论推导了该斜楔不同位置的光程差及光谱反演公式。通过复色光仿真分析了干涉、反演过程,并且采用 532 nm 和 632.8 nm 激光对设计的新型斜楔进行实验分析,反演光谱的中心波长误差小于 0.2%。所设计的新型斜楔主要应用在可见和近红外,在实际的应用中,可以根据测试波段、光谱分辨率合理选择构成该斜楔的两种材料,并合理选择 CCD 的像元个数。为该新型斜楔应用提供了初步的理论基础。

参考文献:

- [1] Liu Mingbo, Tang Yanlin, Li Xiaoli, et al. Feasibility of using successive projections algorithm in spectral monitoring of rice leaves nitrogen contents [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1265–1271. (in Chinese)
刘明博, 唐延林, 李晓利, 等. 水稻叶片氮含量光谱检测中使用连续投影算法的可行性 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1265–1271.
- [2] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen. Hyper-spectral Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1–2. (in Chinese)
童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1–2.
- [3] Qin Yuhua, Ding Xiangqian, Gong Huili. High dimensional feature selection in near infrared spectroscopy classification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (5): 1355–1359. (in Chinese)
秦玉华, 丁香乾, 宫会丽. 高维特征选择方法在近红外光谱分类中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1355–1359.
- [4] Liu Xu, Chen Huacai, Liu Taiang. Application of PCA–SVR to NIR prediction model for tobacco chemical composition [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(12): 2460–2463. (in Chinese)
刘旭, 陈华才, 刘太昂. PCA–SVR 联用算法在近红外光谱分析烟草成分中的应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(12): 2460–2463.
- [5] Yang Huaidong, Chen Xinke, Huang Xingyue, et al. Global modeling and analyzing of grating spectrometers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29 (1): 281–284. (in Chinese)
杨怀栋, 陈新科, 黄星月, 等. 光栅光谱仪的整体建模与分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 281–284.
- [6] Lucey P G, Horton K, Williams T. High-performance sagnac interferometer using un-cooled detectors for infrared hyper-spectral applications[C]//SPIE, 2007, 6546: 1–7.
- [7] Sun Jianying, Li Minzan, Zheng Lihua. Real-time analysis of soil moisture, soil organic matter, and soil total nitrogen with NIR spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26 (3): 426–429. (in Chinese)
孙建英, 李民赞, 郑立华. 基于近红外光谱的北方潮土土壤参数实时分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(3): 426–429.
- [8] Sun Tong, Xu Huirong, Ying Yibin. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29 (1): 122–126. (in Chinese)
孙通, 徐惠荣, 应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 122–126.
- [9] Chen Aiwu, Zhang Jilong, Liu Zhichao. Double-equivalent wedge static Fourier transform interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1547–1551. (in Chinese)
陈爱武, 张记龙, 刘智超. 双等效斜楔型静态傅里叶变换干涉具[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1547–1551.
- [10] Li H, Liu K, Zhang X, et al. Low voltage adaptive 128×128 element liquid crystal micro lens array with electric tunable focal length[C]//SPIE, 2009, 7414: 74140V–1–74140V–9.