

## 可实现零光程差的红外静态斜楔干涉具研究

张 瑞<sup>1,2,3</sup>, 王志斌<sup>1,2,3</sup>, 王耀利<sup>1,2,3</sup>, 李克武<sup>1,2,3</sup>

- (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, 进而影响光谱反演的准确性和复杂性。文中提出一种可以实现零光程差的斜楔干涉具, 通过对传统斜楔倾斜面的改进, 使其可以实现被测光包含零光程差的干涉信号, 理论推导了该斜楔不同位置的光程差公式, 并推导得出对应的光谱反演公式; 采用硒化锌(ZnSe)材料设计了该斜楔, 对其干涉信号、光程差和光谱反演进行了仿真研究, 并采用 10.64  $\mu\text{m}$  激光器对其进行实验分析, 实验结果显示该斜楔干涉信号清晰, 光程差可以实现 1 450  $\mu\text{m}$ , 反演光谱的误差为 0.1%。

**关键词:** 零光程差; 斜楔干涉具; 光谱; ZnSe; 仿真

**中图分类号:** TN247; TJ95    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2093-04

## Research on achieving zero optical path difference interferometer based on infrared static wedge

Zhang Rui<sup>1,2,3</sup>, Wang Zhibin<sup>1,2,3</sup>, Wang Yaoli<sup>1,2,3</sup>, Li Kewu<sup>1,2,3</sup>

- (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, thereby affecting the accuracy and speed of spectral inversion. Therefore, a method of achieving zero optical path difference by improving the wedge structure was put forward. By improving the structure of the inclined surface, the wedge can be achieved on the incident light interference signal which contains zero optical path difference. By deducing and analyzing the optical path difference of the arbitrary wedge position, and the formula of spectral inversion was deduced. Using Zinc Selenide(ZnSe) materials design and processing of the wedge, interference signal and the optical path difference was simulated, and the process of spectral inversion was simulated. The wedge was analyzed by experiments which used 10.64  $\mu\text{m}$  laser. Result shows that the interference signal clarity, optical path difference can reach 1 450  $\mu\text{m}$ , and the relative error of experiment is 0.1%.

**Key words:** zero optical path difference; wedge interferometer; spectral; ZnSe; simulation

收稿日期: 2014-11-14; 修订日期: 2014-12-17

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(2012DFA10680)

作者简介: 张瑞(1987-), 男, 博士, 主要从事光学检测及光谱成像方面的研究。Email: ruizhanghy@163.com

### 0 引言

成像光谱技术是将成像技术和光谱技术相结合的多维信息获取技术,与普通的成像仪器不同,它既能得到目标的图像信息,又能得到每个像元对应目标的光谱信息。使得成像光谱技术在测量、环境监测、农业、生化分析、食品检测、天文学、军事科学等领域中有很高的应用价值<sup>[1-9]</sup>。

在成像光谱仪中,根据测量光谱原理的不同主要分为 3 种<sup>[1-5]</sup>: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<sup>[10]</sup>)。静态斜楔型傅里叶变换干涉具具有结构简单、抗干扰能力强、可应用于复杂环境下等优点,但传统的斜楔结构由于结构的限制,无法实现零光程差,干涉信号更无法实现过零光程差采样,进而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,提出可实现零光程差斜楔设计方法。

### 1 基于零光程差斜楔的红外光谱成像原理

采用可实现零光程差斜楔的光谱成像原理如图 1 所示。被测光通过狭缝后,经过准直镜后产生平行光,通过斜楔产生干涉信号,并通过透镜组被红外

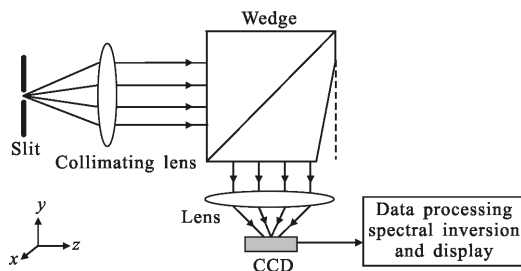


图 1 可实现零光程差斜楔的光谱成像原理图  
Fig.1 Schematic of zero optical path difference wedge spectral imaging

CCD 探测,通过对探测的干涉信号傅里叶变换获得被测目标光谱。其中 CCD 的  $x$  方向探测的是被斜楔调制的干涉信号,CCD 的  $z$  方向对应狭缝  $z$  方向不

$$\begin{cases} y-y_c = -\tan(2\alpha)(x-x_c) \\ y-(L-M) = \cot(\alpha)(x-L) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_B = \frac{\tan(2\alpha)x_c + y_c + [\cot(\alpha)-1]L + M}{\tan(2\alpha) + \cot(\alpha)} x_0 \\ y_B = \frac{\cot(\alpha)\tan(2\alpha)x_c + \cot(\alpha)y_c - [\cot(\alpha)-1]\tan(2\alpha)L - \tan(2\alpha)M}{\tan(2\alpha) + \cot(\alpha)} \end{cases} \quad (2)$$

同位置,通过沿  $y$  方向的推扫实现二维空间的光谱测量,最后通过光谱融合实现光谱成像。

### 2 可实现零光程差的斜楔

由于传统斜楔没有零光程差,这对光谱反演有一定影响。因此文中在原有斜楔结构的基础上,改进获得了可实现零光程差斜楔结构(如图 2 所示),与传统斜楔最大的不同是  $FGH$  面, $FG$  面为全透射, $GH$  面为全反射。假设斜楔的宽度为  $L$ ,倾斜角  $\angle HGK = \alpha$ ,  $FG = M$ ,斜楔材料的折射率为  $n$ 。具体光程差推导如下。

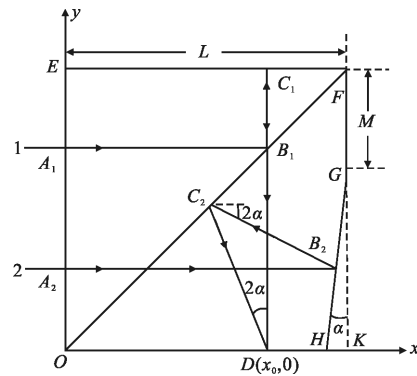


图 2 可实现零光程差斜楔结构图  
Fig.2 Structure of zero optical path difference wedge

由如图 2 可知,在被测光经该斜楔后在任意一点  $(x_0, 0)$  的  $D$  处干涉, $D$  处由 1 路与 2 路干涉,干涉的强度主要由 1 路与 2 路的光程差决定。其中,1 路的光程  $L_1 = (A_1B_1 + B_1C_1 + C_1D) \times n = 2L \times n$ ,2 路的光程  $L_2 = (A_2B_2 + B_2C_2 + C_2D) \times n$ 。由图 2 可知,直线  $C_2D$  的方程为:  $y = -\cot(2\alpha)(x - x_0)$ ,直线  $OF$  的方程为:  $y = x$ ,因此  $C_2$  的坐标  $(x_c, y_c)$  为:

$$\begin{cases} y = -\cot(2\alpha)(x - x_0) \\ y = x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_c = \frac{\cot(2\alpha)}{1 + \cot(2\alpha)} x_0 \\ y_c = \frac{\cot(2\alpha)}{1 + \cot(2\alpha)} x_0 \end{cases} \quad (1)$$

同理可知,  $B_2C_2$  直线方程为:  $y - y_c = -\tan(2\alpha)(x - x_c)$ ; 由于  $G$  点坐标为  $(L, L - M)$ ,直线  $GH$  的方程为:  $y - (L - M) = \cot(\alpha)(x - L)$ ,因此  $B_2$  的坐标  $(x_B, y_B)$  为:

因此由  $D$  点坐标  $(x_0, 0)$ 、 $C_2$  点坐标  $(x_C, y_C)$  和  $B_2$  的坐标  $(x_B, y_B)$  可得 2 路光程:

$$L_2 = (A_2 B_2 + B_2 C_2 + C_2 D) \times n = [x_B + \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2} + \sqrt{(x_C - x_0)^2 + y_C^2}] \times n \quad (3)$$

所以任意一点  $(x_0, 0)$  的  $D$  处的光程差:

$$S = (L_1 - L_2) \times n = [2L - x_B \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2} - \sqrt{(x_C - x_0)^2 + y_C^2}] \times n \quad (4)$$

由光的干涉理论可知,复色光的干涉信号强度为:

$$I = \int_0^{\infty} I(\sigma) \cos(2\pi S \sigma) d\sigma \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  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:

$$I(\sigma) = \int_0^{S_0} I \cos(2\pi S \sigma) dS \quad (6)$$

式中:  $S_0$  是斜楔的最大光程差。

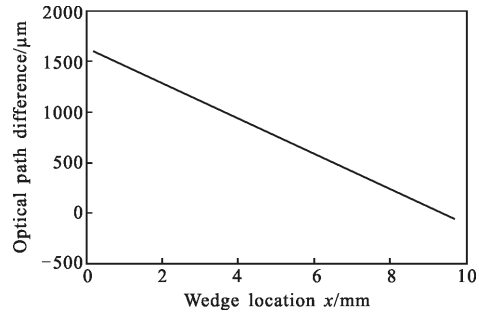
### 3 仿真及实验分析

由于该斜楔在项目中应用于红外(8~14  $\mu\text{m}$ )光谱,因此设计该斜楔材料选择 ZnSe,其折射率  $n=2.4$ ;可实现零光程差斜楔结构如图 2 所示,其中斜楔宽度  $L=10.0 \text{ mm}$ ,  $M=1.0 \text{ mm}$ ,倾斜角  $\alpha=2.0^\circ$ ,  $EF$  面和  $GH$  面镀全反金膜,  $FG$  面镀增透膜,增透膜主要是为了减小由于  $FG$  面反射光对整体干涉信号的影响。下面就该斜楔进行具体的仿真和实验分析。

#### 3.1 仿真分析

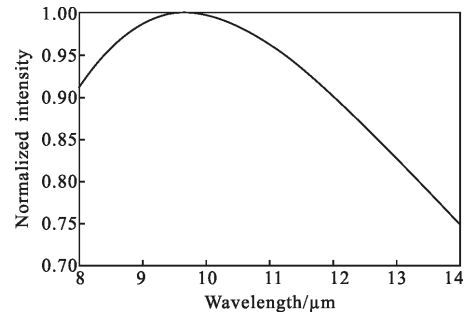
针对设计的可实现零光程差斜楔干涉具的光程差、干涉信号和光谱反演进行了 MATLAB 仿真。将各个参数对应参数代入公式(1)~(3),并由公式(4)可得任意任意一点  $(x_0, 0)$  的光程差如图 3(a)所示。针对复色光的干涉及反演进行仿真,仿真入射光为 300 K 黑体在 8~14  $\mu\text{m}$  波段的归一化光谱如图 3(b)所示。

将图 3(b)的光谱带入公式(5)可得在斜楔  $x$  不同位置的归一化干涉信号如图 4 所示,图 4(a)为仿真 CCD 获得的干涉信号,图 4(b)为其中一行的干涉信号,在实际中,空间不同位置的光经过斜楔的干涉信号被 CCD 不同行所探测。由图 4(b)可以看出该斜楔的干涉信号过了零光程差,探测器得到的干涉信号也就实现了过零采样,这有利于后续数据处理中相位校正。



(a) 光程差

(a) Optical path difference



(b) 入射光谱

(b) Incident spectral

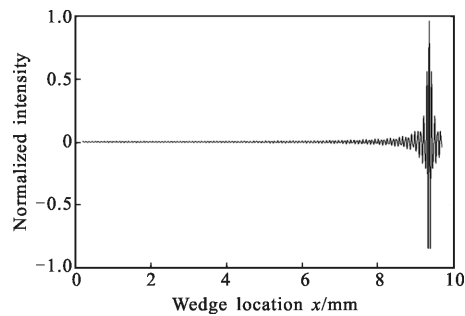
图 3 模拟入射光谱及光程差图

Fig.3 Simulation incident spectral and wedge optical path difference



(a) CCD 获得的干涉信号图

(a) Interference signal obtained by CCD



(b) 其中一行的干涉信号

(b) Interference signal intensity of a line CCD

图 4 干涉信号图

Fig.4 Interference signal

将图 4(b)的干涉信号带入公式(6),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 5 所示。由图 5 可以看出反演光谱与原始光谱基本完全吻合,微小的偏差主要光程差有限造成的。这可以通过加大斜楔尺寸或最大斜楔倾斜角来最大光程差,但是光程差大越大需要 CCD 的像元数越多,所以应该根据需要合理选择斜楔的尺寸和倾斜角。

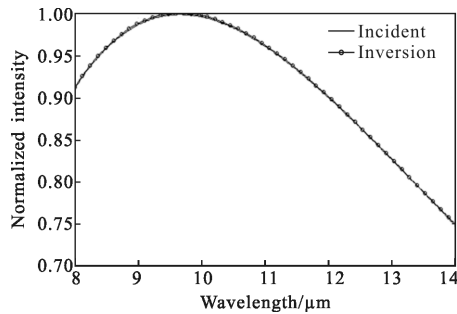


图 5 反演光谱

Fig.5 Spectral inversion results

### 3.2 实验分析

为了进一步验证该斜楔的可行性,采用 ZnSe 材料设计加工了该结构斜楔,实验中采用的被测光源为波长为  $10.64 \mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  气体激光器。该激光通过斜楔后由探测器获得的实验干涉信号如图 6 所示。

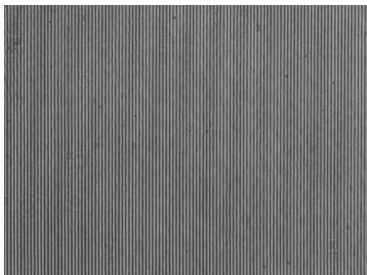


图 6 波长  $10.64 \mu\text{m}$  激光器实验干涉信号

Fig.6 Experimental interference signal of the laser  
(wavelength  $10.64 \mu\text{m}$ )

将图 6 中的实验干涉信号带入公式(6)可反演得到该激光器的峰值波长为  $10.63 \mu\text{m}$ ,误差为 0.1%。

## 4 结论

通过上述理论分析可知,通过对传统斜楔倾斜

面的进一步改进,使得该斜楔可以实现零光程差,进而可以实现被测光干涉信号的过零采样,这样可以实现相位校正,进而提高光谱反演精度。理论推导了该斜楔不同位置的光程差公式及光谱反演公式。通过对复色光仿真及对  $10.64 \mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  激光实验可得,该斜楔反演激光波长的误差为 0.1%,为该斜楔应用在红外光谱成像上提高理论基础。

### 参考文献:

- [1] Wang Jianyu, Shu Rong, Liu Yinnian, et al. Introduction to Spectral Imaging Technology [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-3. (in Chinese)
- [2] Xu Xiaojing, Huang Wei. Application of spectral imaging in forensic science [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3280-3284.
- [3] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen. Hyper-spectral Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1-2. (in Chinese)
- [4] Randeberg L L, Baarstad I, Loke T, et al. Hyper-spectral imaging of bruised skin[C]//SPIE, 2006, 6078: 60780O1-11.
- [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)
- [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] Fu Anbang, Zhang Huaidong, Zhang Xinyu, et al. Tunable liquid crystal Fabry-Perot hyperspectral imaging detectors in mid-infrared [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (7): 1853-1857.
- [8] Li H, Liu K, Zhang X, et al. Low voltage adaptive  $128 \times 128$  element liquid crystal micro lens array with electric tunable focal length[C]//SPIE, 2009, 7414: 74140V-1-74140V-9.
- [9] 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)
- [10] Chen Aiwu, Zhang Jilong, Liu Zhichao. Double-equivalent wedge static Fourier transform interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1547-1551.