

## 基于光谱特性的高判别准确度激光近场探测传感器研究

刘舒扬<sup>1,2</sup>, 张 晨<sup>2</sup>, 赵安娜<sup>2</sup>, 李奇峰<sup>1</sup>, 贾晓东<sup>2</sup>

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;  
2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300381)

**摘 要:** 激光近场探测是激光测量重要的应用方向之一,尤其是基于距离信息的近场探测系统有着巨大的应用前景。传统的激光近场探测系统只依靠距离信息给出信号,而不判别反射距离信号的物体是否为目标,可能导致误报。基于光谱特性进行目标识别会大大减少激光近场测量系统的误报率,极大提高判别准确度。设计实现了一种单芯片的光谱分析器件,利用半导体技术将光谱元件和光电元件进行单芯片的集成,从而减小了传统光谱分析系统的体积和质量。实验结果表明,该微系统级的光谱分析芯片具有识别既定伪装物体的能力,使得该技术具有在激光近场探测中应用的前景。

**关键词:** 激光近场探测; 单芯片; CMOS 工艺; 光谱分析; 分类识别

**中图分类号:** TN209      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0403009

## Research on high recognition accuracy laser near field detection sensor based on spectrum characteristics

Liu Shuyang<sup>1,2</sup>, Zhang Chen<sup>2</sup>, Zhao Anna<sup>2</sup>, Li Qifeng<sup>1</sup>, Jia Xiaodong<sup>2</sup>

(1. Tianjin University, School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin 300072, China;  
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300381, China)

**Abstract:** Laser near field detection plays a crucial role in the laser measurement products series and has been successfully and widely applied in lots of field. Traditional laser near field detection system transmits the triggering signal according to the distance information, without being able to judge whether the distance signal is obtained from the target or not. As a result, a false positive could happen and the performance of the system would be weakened. However, recognition based spectral information can improve accuracy. In this paper, a target recognition system, which was compatible for the classical laser fuse scheme, based on spectrum analysis was proposed to increase the detection accuracy of the laser fuse system. Some suggestions about the general design of the improved laser fuse system with spectrum analysis sensor were also offered including active and passive detection with imaging function as an option. Moreover, based on the CMOS technology, a monolithic spectrum analysis sensor was designed and fabricated, which integrated the spectral element on top of the optoelectronic sensor in one chip. Thanks to the greatly reduced size and the weight, this spectrum analysis sensor had potential application in practice. The experiment results show that the capability of such system on chip (SOC) sensor in distinguishing the target from the camouflage.

**Key words:** laser near field detection; system on chip; CMOS technology; spectrum analysis; classification

收稿日期:2020-02-14; 修订日期:2020-03-09

作者简介:刘舒扬(1986-),男,高级工程师,硕士,主要从事光谱成像方面的工作。Email: shuyangliu17@163.com

## 0 引言

激光近场探测是武器系统的重要组成部分,它的作用是探测、识别目标,适时引爆战斗部,最大限度发挥战斗部威力。主动式近炸探测系统作为激光近场探测技术在弹载平台中应用的主要方式之一,可以在预定距离内探测目标,并在最佳炸点位置处起爆战斗部。目前,这种装置都是可以利用距离信息实现部分判别目标的功能<sup>[1]</sup>。但这种根据不同距离信息组成阵列后进行分析的目标识别方法本质的作用是抗干扰,而无法从目标识别的角度解决激光近场探测判断真伪目标的问题<sup>[2]</sup>。

光谱分析技术是一种对于电磁波分析的方法,光谱信息能够反映目标的内部物理、化学成分,从而实现物质的识别。结合传统的空间成像,即可形成光谱成像技术,在不接触目标的情况下检测目标的特征信息,该技术已在食品安全<sup>[3]</sup>、智慧农业<sup>[4]</sup>等多个领域应用。除此,高光谱分析技术在军事领域表现出巨大的应用潜力<sup>[5]</sup>,红外光谱技术已实现军事伪装背景下目标检测<sup>[6]</sup>。基于光谱特性进行目标探测,可以从目标识别的角度,提高激光近场探测的判别准确度。

传统的高光谱成像系统(Hyper-Spectral Imaging System, HSI)由分立器件组成,为保证空间分辨率和光谱分辨率,引入了物镜、光阑、准直器和各类透镜等光学器件,同时必须考虑各种器件之间的聚焦、准直问题,这就导致传统的 HSI 系统复杂度很高,体积较大,成本很高,应用范围受到极大限制<sup>[7]</sup>。随着互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)技术的发展,在不久的将来,低成本化、高速和小型化的光谱成像系统逐渐能够实现<sup>[8-10]</sup>。

文中通过对新型的单芯片式的光谱分析微系统功能进行分析,提出了用该芯片改进识别准确率的激光近场探测总体设计方案,并面向典型的伪装物设计并制造了可用于激光近场探测的光谱分析芯片,并进行测试。实验结果表明,所实现的光谱芯片一方面可以对于 RGB 成像难以分辨的物体进行准确的目标识别,另一方面在使用指标上也符合激光近场探测的使用环境要求,证实了该项技术在激光近场探测中的应

用潜力。

## 1 光谱识别功能的应用环境支持

在激光近场探测中引入光谱识别的功能,从系统设计角度出发,主要解决三个问题,即光源的选择、信息处理、光谱分光的方法。文中提出一种适用于激光近场探测的一体式光谱分析传感器,将在第 2 章专门介绍,即解决在激光近场探测应用环境限制下的光谱分光问题,此章将主要针对光源选择与信息处理进行分析和建议。

### 1.1 照明光源的选择

激光近场探测中的光谱系统的目的是分析目标的材料属性,进而确定被探测物的材料是否为目标,因此在大多数情况下,需要对反射光谱进行采集,利用反射光谱分析物质属性,而反射光谱在获得的时候需要照明光源。

一般有两种方式,即依靠环境光源(主要是太阳光)的被动光源和主动制造的光源。被动光源依靠外界环境光,主要是太阳光进行照明,弹载平台本身不需要携带额外的照明设备,增加了可靠性,且太阳光光谱范围广,可以增加目标识别的种类与范围,对激光近场探测的抗干扰能力提升有明显优势,但其使用环境受限,只能在光照充足的时候使用。主动光照式需要弹载平台自身携带照明光源,分为宽谱光源和窄带激光两种,宽谱光源可以以照明弹或者固定光源的形式实现,实现丰富物质种类的判断与识别,窄带激光可以与目前的测距激光共用激光器,再设计和安装的成本都很低,缺点是可识别的种类较少,这几种照明方式的优劣比较如表 1 所示。

表 1 激光近场探测中的光谱照明方案对比

Tab.1 Comparison of spectral illumination schemes in laser near field detection

Lighting method	Passive	Initiative	
	Sunlight	Broad spectrum light source	Laser
Identification type	Numerous	Numerous	Less
Application Environment	Limited	Unlimited	Unlimited
Complexity	Low	High	Low
Concealment	High	Low	Moderate

### 1.2 信息处理方法

对于光谱数据典型的处理方法如图 1 所示, 在传统的流程中, 需要先通过暗噪声和入射光的光谱校正来得到目标的反射光谱, 由于获得的光谱数据一般维数较多, 随后进行包含特征提取与识别、分类器设计、分类决策的标准模式识别流程, 然而由于激光近场探测在工作阶段要处于高速判别的状态, 传统的数据决策体系很难去适应高速的判别机制, 需要在整个流程中加以简化, 甚至联合硬件进行优化设计。而笔者在第 2 章所提出的光谱分析传感器也具有再设计简单的优势, 适合针对不同的目标和应用环境进行快速、低成本的设计。

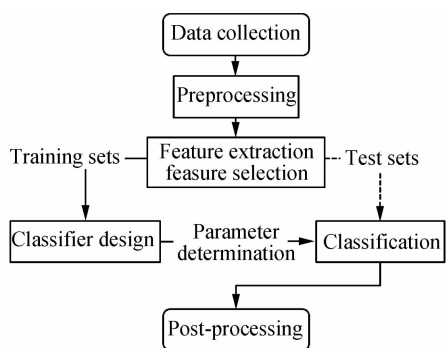


图 1 典型光谱数据分类识别流程图

Fig. 1 Typical process of spectral data classification and recognition

图 2 展示了基于光谱数据库分析的光谱特征提取算法开发闭环流程, 由于在激光近场探测的目标判别中, 所需判别的种类与导引阶段相比大大降低, 因此需要在弹载平台总体方面给出总体设计, 判断清激光近场探测所需解决的目标识别问题的范围, 而这一类目标范围是传统依靠距离判断不出来的目标, 而光谱作为专业的目标识别手段, 在定义清需求后, 有很大的概率不需要极其复杂的数据处理算法就可以进

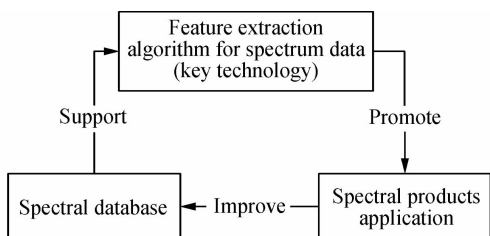


图 2 光谱数据关键技术、光谱数据库及光谱类产品应用关系

Fig. 2 Key technology of spectral data, spectral database and application relationship of spectral products

行判别, 文中第 3 章就给出了一个这样的例子。

## 2 面向典型目标和伪装物的光谱芯片设计

激光近场探测的光谱识别系统对于体积、质量、环境适应性以及成本都提出了较高的需求, 体积和质量是保证其能在型号上列装的基本要求, 而传统的利用独立光学元器件以及光路进行分光的方法 (如棱镜、光栅等), 一方面会在不同的温度条件下发生细微的形变, 从而使得光学性能变差, 另一方面, 系统自身的抗振能力很差, 需要有额外的机械结构减小振动对其的影响, 导致系统的复杂度和成本进一步提升。

借助先进的半导体加工技术, 将传统的滤波器件在传感器层面上实现集成, 从而形成的具备光学、光电和电学的一体式光谱分析芯片可以很好地满足激光近场探测对于光谱分析系统的要求。首先, 由于将光谱分光器件和光电传感器直接芯片化, 该系统在体积和质量上与传统的激光测距收发分系统是同等级别, 不增加额外的体积与质量; 其次, 在环境适应性方面, 由于分光元器件一体化的集成在光电器件上, 使得该器件对于振动有很好的抗性, 光程方面, 可以采取薄膜滤光的方式, 减小总光程, 从而使系统对于温度的适应性提高; 最后, 借助半导体的批量加工技术以及多项目晶圆 (Multi Project Wafer, MPW) 技术, 一方面可以通过大批量生产平摊成本, 一方面也可以在同一批次加工中生产出不同指标的传感器, 从而在不同的项目间实现成本的平摊。

薄膜式的滤光器件由于需要在传感器上直接进行加工, 因此要求其使用的材料是 CMOS 工艺兼容的, 且加工时由于要在传感器之上进行加工, 需要加工工艺不要有超过 400 °C 的步骤, 整个制造过程如图 3 所示。

在文中, 利用塑料的树叶模拟伪装物, 进行光谱的设计, 塑料树叶由于没有叶绿素的存在, 在 700 nm 后没有典型的叶绿素高台阶效应, 因此, 选择 750 nm 作为目标波长, 利用法布里-珀罗干涉 (Fabry-Perot Interferometer, FP) 腔原理, 选取 CMOS 兼容材料, 进行 FP 腔设计及透射率仿真, 仿真结果如图 4 所示, 设计时所用的塑料树叶与活体树叶的混合拍照如图 5 所示, 从图中可以看出, 在 RGB 相机下, 很难区分树叶的真伪, 塑料也是常用的伪装物之一。

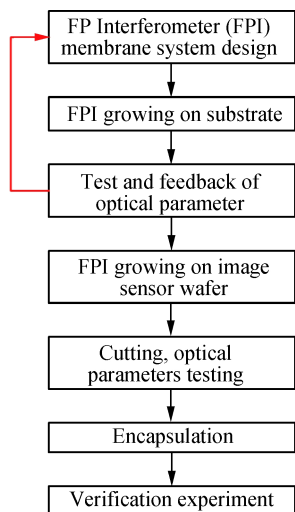


图 3 光谱传感器芯片设计制造流程

Fig.3 Spectrum sensor chip design and manufacturing process

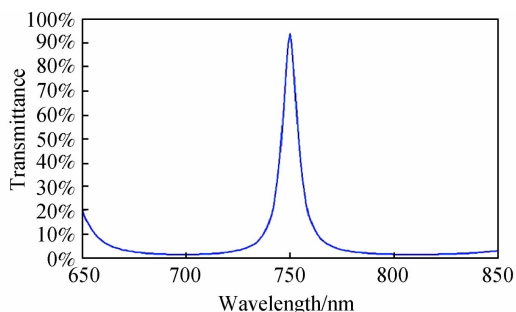


图 4 光谱分析滤波器仿真设计结果

Fig.4 Results of spectral analysis filter simulation design



图 5 RGB 标准相机拍摄塑料树叶与活体树叶照片

Fig.5 Plastic leaves and living leaves picture shoot by RGB standard camera

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 芯片制造结果

按照第 2 章的模拟设计,在标准的图像传感器上进行反伪装膜系的生长,最终所得的传感器如图 6 所示,利用 Enlitech MV-IS 图像感测器光电测试系统进行测试,结果如图 7 所示,芯片主要的详细指标如下:

像素数, 2 592×1 544; 光谱中心波长, 710 nm; 光谱分辨率, 优于 20 nm; 像素尺寸, 1.12 μm; 功耗, 小于 160 mW。

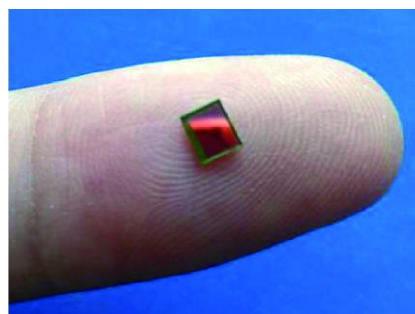


图 6 光谱传感器实物图

Fig.6 Physical drawing of spectral sensor

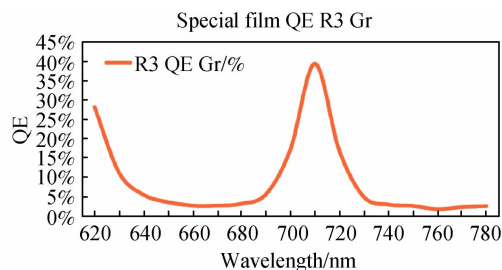


图 7 光谱传感器量子效率响应曲线

Fig.7 Quantum efficiency response curve of spectral sensor

值得一提的是,图 7 可以看出所制造的光谱传感器,量子效率的峰值可以达到 40%,该数值不是传统意义的量子效率还有部分的光谱分光效率加入进行的综合考虑,并且是在 1.12 μm 的像元尺寸限制下。但是该传感器的峰值响应波长由 750 nm 漂移到 710 nm,出现了 40 nm 的谱线漂移,这部分漂移是由于硅片与传感器晶圆的不同所导致的,因为在工艺摸索阶段,制造工艺是在硅片上进行,而实际加工过程中是在传感器晶圆上进行,这部分可以在明确总体的要求后,通过反复的进行工艺优化,达到准确的光谱定位。

#### 3.2 成像系统集成与测试结果

由于所制造的芯片具有成像效果,因此,将其与成像镜头及图像采集电路集成为一台小型的单波段光谱相机进行测试,相对于单色相机,其具有较窄的光谱滤波能力,因此可以区分部分特定的伪装目标。

选取与图 5 拍摄相同的光照环境,即在同一时刻的户外自然光照条件下,对于图 5 的叶子进行拍照,得到图 8 所示的光谱图像。可以很直观的看出第一



排的第三片,第二排的第四、第七片由于是塑料叶片,没有叶绿素的高反射平台,在该传感器芯片中心波长附近透射范围具有较低的反射率,光谱图像明显暗于其他的活体树叶。

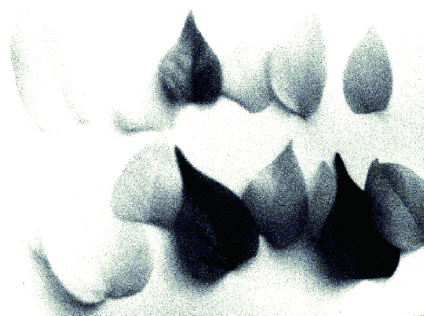


图 8 伪装物识别结果

Fig.8 Camouflage recognition results

图 8 是没有经过任何图像处理算法的原始数据,且光照环境不受控制的真实环境中拍摄,这样可以更好的验证该项技术的潜力,可以在测距以外通过光谱反射强度的信息,对物体进行初步的判别。

## 4 结 论

文中主要实现了一种具有在激光近场探测中配备潜力的一体式单谱段光谱传感器设计,该传感器具有小型化、低成本化、低功耗的特点,打破了传统光谱分析系统不能在激光近场探测中使用的限制,为激光近场探测增加了具有高判别准确度的目标识别功能。利用该传感器进行真假绿植叶片反伪装实验,根据真假绿植叶片光谱特性差异,获得了可直观的反映出叶片真假的光谱图像。通过模拟仿真、试制和测试,所制造的光谱传感器既具有较高的光谱分辨率,又具备识别既定目标的能力,为激光近场探测利用距离外的信息进行目标识别奠定了基础。

### 参考文献:

[1] Chen Huimin, Jia Xiaodong, Cai Kerong. Laser Fuze Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2016. (in Chinese)

陈慧敏,贾晓东,蔡克荣.激光引信技术[M].北京:国防工业出版社,2016.

- [2] Lv Hua, Yao Hongbao, Chen Ping. Target identifying of large visual angle to the laser fuse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 52-54. (in Chinese)  
吕华,姚宏宝,陈平.大视场激光引信探测目标识别方法研究[J].*红外与激光工程*, 2005, 34(4): 52-54.
- [3] Gowen A A, O'Donnell C P, Cullen P J, et al. Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 18(12): 590-598.
- [4] Heikki Saari, Ismo Pellikka, Liisa Pesonen, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications[C]// Proc SPIE, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII, 2011, 8174: 81740H.
- [5] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese)  
许洪,王向军.多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J].*红外与激光工程*, 2007, 36(1): 13-17.
- [6] Eismann M T, Seldin J H, Schwartz C R, et al. Target detection in desert backgrounds: infrared hyperspectral measurements and analysis[C]// Proc SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1995, 2561: 80-97.
- [7] Liu Shuyang, Zhang Chen, Zhang Yunhao, et al. Miniaturized spectral imaging for environment surveillance based on UAV platform[C]// AOPC 2017, Proceedings of Optical Spectroscopy and Imaging, 2018: 10461.
- [8] Nicolaas Tack, Andy Lambrechts, Philippe Soussan, et al. A compact, high-speed, and low-cost hyperspectral imager[C]// Proc SPIE, Silicon Photonics VII, 2012, 8266: 82660Q.
- [9] Bert Geelen, Nicolaas Tack, Andy Lambrechts. A compact snapshot multispectral imager with a monolithically integrated per-pixel filter mosaic[C]//Proc SPIE, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VII, 2014, 8974: 89740L.
- [10] Bert Geelen, Nicolaas Tack, Andy Lambrechts. A snapshot multispectral imager with integrated tiled filters and optical duplication[C]// SPIE, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VI, 2013, 8613: 861314.