

## 利用红外转换屏研制短波红外探测器

程利群<sup>1</sup>, 郑焕东<sup>2</sup>, 张希艳<sup>3</sup>, 柏朝晖<sup>3</sup>, 卢利平<sup>3</sup>

- (1. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022;
2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308;
3. 长春理工大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 采用重力沉积技术制备了CaS:Eu<sup>2+</sup>, Sm<sup>3+</sup>红外上转换荧光屏, 确定了最佳制屏工艺参数, 研究了红外转换荧光屏的性能。设计和制作了耦合短波红外 CCD 相机, 对相机的成像性能进行了试验, 结果表明研制的短波红外 CCD 相机能够实现对 1 064 nm、1 550 nm 等短波红外激光的探测和成像。采用红外转换荧光屏制作红外 CCD 相机为短波红外探测器的研制提供了简便、有效的途径。

**关键词:** 红外上转换; 荧光屏; 耦合短波红外 CCD 相机

**中图分类号:** TB381; O614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-3872-05

## Manufacturing of an coupled short wavelength infrared detector using infrared upconversion screens

Cheng Liqun<sup>1</sup>, Zheng Huandong<sup>2</sup>, Zhang Xiyan<sup>3</sup>, Bai Zhaohui<sup>3</sup>, Lu Liping<sup>3</sup>

- (1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** CaS:Eu<sup>2+</sup>, Sm<sup>3+</sup> infrared up-conversion screens were prepared by the gravity deposition method, the optimum preparation parameters of screens were determined and the properties of the infrared up-conversion screens were researched. A coupled short wavelength infrared CCD camera was designed and manufactured. The imaging properties were tested and the results show that the obtained coupled CCD camera is able to detect 1 064 nm and 1 550 nm. It would provide an efficient alternative technology for the short wavelength infrared detector through coupling the up-conversion fluorescence screens to the CCD cameras.

**Key words:** infrared up-conversion; fluorescence screen; coupled short wavelength infrared CCD camera

收稿日期: 2014-04-20; 修订日期: 2014-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(61307118); 总装备部项目

作者简介: 程利群(1988-), 男, 硕士生, 主要从事光电探测与图像处理方面的研究。Email: liquncheng827@126.com

通讯作者: 卢利平(1978-), 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电功能材料方面的研究。Email: luliping771219@126.com

## 0 引言

激光告警、激光制导、激光通信等武器装备在现代信息战争中发挥着越来越重要的作用,上述装备中常用的激光工作波长主要位于短波红外波段,例如激光测距、激光雷达、激光末制导炮弹照射器等应用的 1064 nm YAG 激光器;强激光武器应用的 1319 nm YAG 激光器;人眼安全激光测距应用的 1540 nm、1570 nm 拉曼频移 YAG 激光器;光通讯领域应用的 1520~1570 nm 掺铒激光器等。由此可见,短波红外是绝大多数军用激光武器装备的工作波段,因此,短波红外光的探测与成像技术具有重要的意义[1]。目前大多数商用 CCD 的响应区间主要在可见光范围。InGaAs 等半导体材料是研制短波红外探测器的理想材料,但高质量半导体材料制备困难、价格昂贵,目前还难以实现大规模应用。

近年来,一种简便有效、经济可行的耦合型短波红外探测技术得到广泛关注,在可见光探测器上耦合红外转换荧光涂层,荧光涂层将红外光信号转换为可见光信号,从而实现对红外光的探测成像。J. Lindmayer 等<sup>[2]</sup>利用荧光材料将光阴极红外响应波段延伸至近红外 1.6  $\mu\text{m}$ 。J.W. Gleesener 等<sup>[3]</sup>利用红外上转换材料与微光像增强器耦合,响应波段扩展到 1~3  $\mu\text{m}$ 。Kenneth A Costello 等<sup>[4]</sup>将红外上转换材料与背照减薄 CCD 器件耦合,研制出红外响应波段至 1.1~2.0  $\mu\text{m}$  的红外 CCD。

文中利用红外转换荧光材料,采用重力沉积技术制备红外上转换荧光屏,与可见光 CCD 相机耦合制作了短波红外 CCD 相机,并对其探测成像性能进行了测试,研制的耦合型短波红外探测器具有成本低、可见与短波红外兼容的特性。

## 1 实验

采用实验室自制的  $\text{CaS:Eu}^{2+}, \text{Sm}^{3+}$  材料<sup>[5-7]</sup>,厚度为 1 mm 的 K9 光学玻璃作为基片,利用重力沉积技术制备红外转换荧光屏,实验优化了粉体用量、电解质种类及用量、水玻璃的用量、沉积厚度等参数,确定了较佳的制屏工艺参数,通过调整工艺参数,制备了不同厚度的红外转换荧光屏<sup>[8]</sup>。将荧光屏与 CCD 光敏面耦合,数据输入端采用适当的滤光片和光学镜头,通过数据采集系统,在显示器上呈现红外光的

图像。

采用 950 光谱仪测试荧光屏样品的透过率曲线,采用 RF-5301PC 荧光分光光度计耦合 1064 nm、1550 nm 红外激光器测试样品的红外上转换发射光谱,采用 WGY-10 荧光分光光度计测试样品的红外响应光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 红外上转换荧光屏的性能

图 1 为不同厚度红外转换荧光屏的样品照片及屏侧剖面 SEM 照片。图 2 和图 3 分别为不同厚度荧光屏样品的透过率曲线和透射式红外上转换发射光谱,图 3 的测试条件为 1064 nm 红外激光激发,功率密度为 160  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 。由图可知,随着荧光屏样品粉层厚度的增加,可见光透过率明显下降,相对发光强度则逐渐增强。

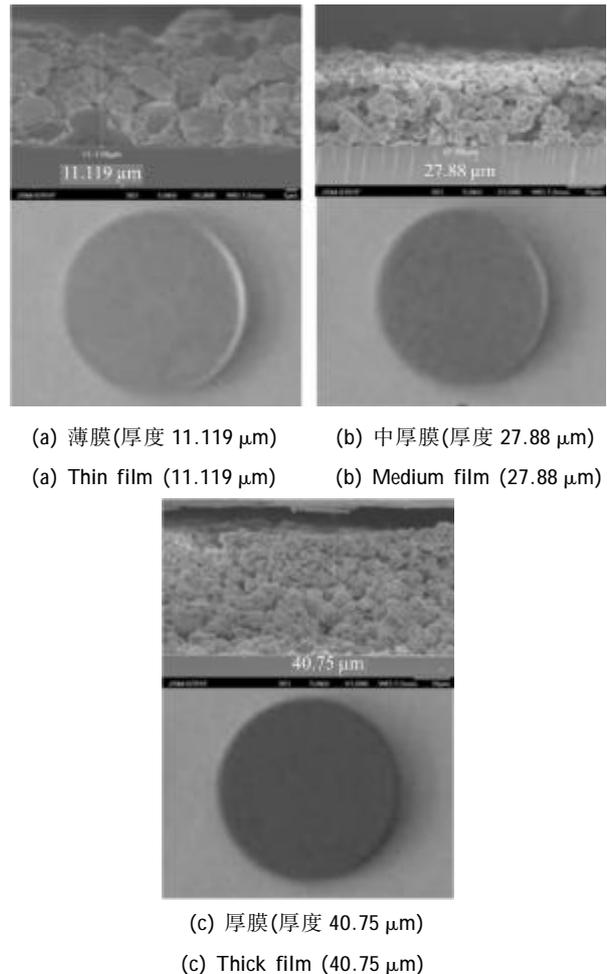


图 1 不同厚度红外转换荧光屏样品的实物照片及屏侧剖面 SEM 照片  
 Fig.1 Photos and cross-section SEM images of upconversion screens of different thickness

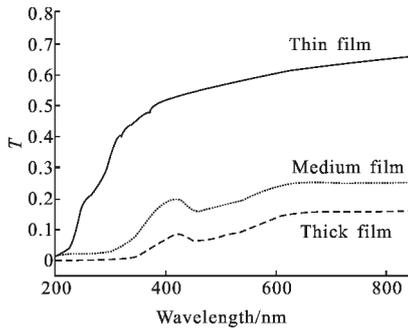


图 2 不同厚度红外转换荧光屏的透过率曲线

Fig.2 Transmittance curve of upconversion screens of different thickness

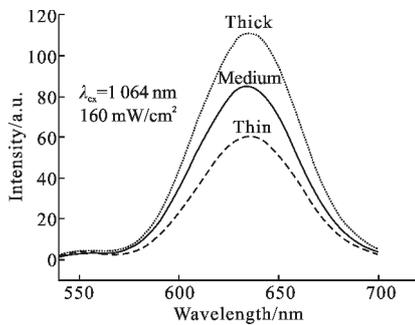


图 3 不同厚度红外转换荧光屏的上转换发射光谱

Fig.3 Upconversion spectra of screen samples of different thickness

图 4 为红外转换屏样品的红外响应光谱。由图可见，红外转换荧光屏的响应区间是位于800~1 600 nm的宽带短波红外区间，峰值位于 1 100 nm，这与短波红外常用的 1 064 nm 和 1 550 nm 激光相匹配。图 5 给出了分别利用 1 064 nm 和 1 550 nm 激光器照射样品的红外上转换发射光谱，激发光功率密度分别为 160 mW/cm<sup>2</sup> 和 180 mW/cm<sup>2</sup>。样品的发射峰是峰值位于 640 nm 附近的宽带谱，与商用 CCD 的光谱响应区间匹配性良好。1 064 nm 激发时的发光强度高于 1 550 nm 激发，该结果与上述的红外响应光谱结果相吻合。

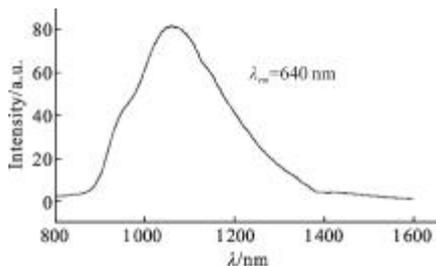


图 4 红外转换屏的红外响应光谱

Fig.4 IR sensitivity spectrum of upconversion screen sample

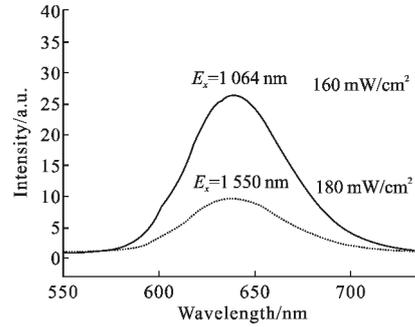


图 5 不同波长激发下屏样品的上转换发射光谱

Fig.5 Upconversion spectra of screen sample excited at different wavelengths

### 2.2 荧光屏与 CCD 的耦合

图 6 为荧光屏与 CCD 耦合研制短波红外探测器的设计示意图。主要由滤光片、光学镜头、红外转换荧光屏、光学耦合部分、CCD、数据采集系统、显示器等组成。其工作原理是：目标红外信号光经滤光后进入光路，照射到红外上转换荧光屏上，红外上转换荧光屏将红外光转换为可见光，再经光学耦合部分进入 CCD 成像器件，经数据采集系统在显示器上形成可见光图像，即实现对短波红外光的探测及成像。滤光片的作用是滤除环境光对探测结果形成的干扰，选择窄带滤光片让短波红外光信号(或可见和短波红外光)通过，照射到红外上转换荧光屏上产生可见光，再进入光路系统。

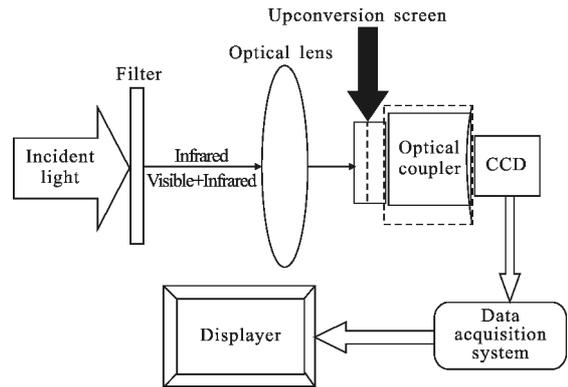


图 6 荧光屏-CCD 耦合型短波红外探测器的设计示意图

Fig.6 Schematic design of screen-CCD coupled detectors of near infrared light

光学镜头直接影响成像质量，该方案选择了手动光圈定焦镜头。手动光圈定焦镜头比固定光圈定焦镜头增加了光圈调整环，光圈范围一般从 F1.2 或 F1.4 到全关闭，能方便地适应被摄现场的光照度，光

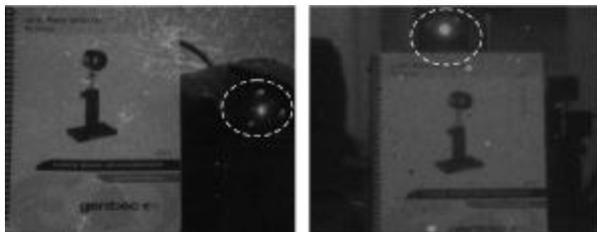
照度比较均匀,价格较便宜。

耦合方式决定了图像能否稳定、高效地传输至 CCD 光敏面上,红外转换荧光屏与 CCD 之间必须在尺寸上和分辨率上使两者尽量达到匹配。耦合方式通常有近贴式、光纤面板式、透镜成像式、光锥式等,近贴式耦合传输效率高,但由于荧光屏尺寸小,又紧贴着脆弱的光敏面,因此操作难度较大;透镜成像式耦合体积庞大、结构复杂;光锥式耦合存在错位、光纤畸变和渐晕等问题,因此该实验采用了光纤面板式耦合。由于光纤面板对光具有良好的无畸变传输特性,对操作难度大的近贴式耦合方式稍加改变,在红外转换荧光屏与 CCD 之间放置尺寸匹配的光纤面板,紧密结合,传输效率高,操作相对容易。

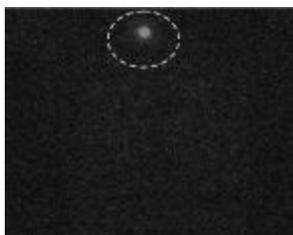
### 2.3 耦合型短波红外成像器件的成像效果

对实验耦合的短波红外 CCD 进行了 1 064 nm 和 1 550 nm 红外激光的成像实验,对相机系统加了滤光片,对比滤光前后的成像效果。

图 7 为耦合短波红外 CCD 相机对 1 064 nm



(a) 薄膜屏的滤波前图像 (b) 厚膜屏的滤波前图像  
(a) Image before filtering using thin-film screen (b) Image before filtering using thick-film screen



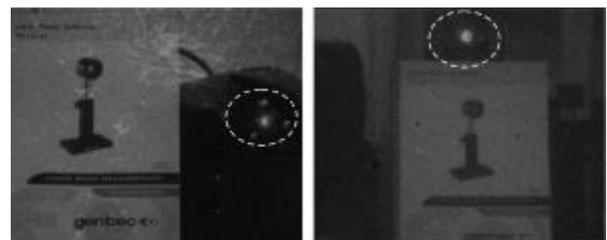
(c) 滤波后图像  
(c) Image after filtering

图 7 100 mW、1 064 nm 激光器出光口图像  
Fig.7 Beam image of 100 mW, 1 064 nm laser

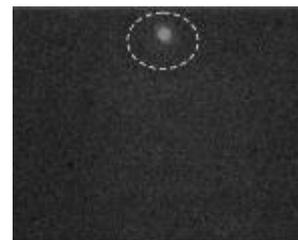
100 mW 激光器出光口图像的采图结果。图 7(a)、图 7(b) 分别为耦合薄膜、厚膜荧光屏时未加滤波片所呈现的可见光和红外光兼容的图像,图中用虚线框标注的白色圆斑为 1 064 nm 激光光斑图像,左下侧为参

照物图像。综合比较可知,由于薄膜荧光屏的可见光透过率高,红外上转换发光强度弱,耦合薄膜成像表现为红外-可见兼容成像效果好(图 7(a));而厚膜荧光屏与此相反,由于其可见光透过率差,红外上转换发光强度高,耦合厚膜时红外成像效果好(图 7(b))。图 7(c)为加 1  $\mu\text{m}$  短波截止滤光片后,可见光被滤掉了,只留下 1 064 nm 红外激光光斑的图像。

图 8 为耦合短波红外 CCD 相机对 1 550 nm、100 mW 激光器出光口图像的采图结果。图 8(a)、图 8(b) 分别为耦合薄膜、厚膜荧光屏时未加滤波片所呈现的可见光和红外光兼容的图像,图中白色圆斑为 1 550 nm 激光光斑图像,与 1 064 nm 成像效果相似,耦合薄膜的红外-可见兼容成像效果好,耦合厚膜的红外光斑更明显。图 8(c)为加 1  $\mu\text{m}$  短波截止滤光片后所呈现的 1 550 nm 红外激光光斑图像。



(a) 薄膜屏的滤波前图像 (b) 厚膜屏的滤波前图像  
(a) Image before filtering using thin-film screen (b) Image before filtering using thick-film screen



(c) 滤波后图像  
(c) Image after filtering

图 8 100 mW、1 550 nm 激光器出光口图像  
Fig.8 Beam image of 100 mW, 1 550 nm laser

上述荧光屏耦合短波红外 CCD 相机对于不同波长红外激光器出光口图像的成像测试结果表明,在普通的可见光 CCD 相机上耦合了 CaS:Eu, Sm 红外上转换荧光屏以后,该 CCD 相机能够响应短波红外光,即向长波方向延长了可见光 CCD 的响应频谱范围,实现了可见光和红外光的兼容。

### 3 结 论

采用重力沉积技术制备了红外上转换荧光屏,并确定了最佳制屏工艺参数。针对荧光屏与器件的耦合方案进行了理论分析和实验研究,试制的耦合型 CCD 相机实现了短波红外光的探测及成像,为短波红外探测器的研制提供了简便有效、低成本的有效途径。

#### 参考文献:

- [1] Cai Yi, Hu Xu. Short wave infrared imaging technology and its defence application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 643-647. (in Chinese)  
蔡毅, 胡旭. 短波红外成像技术及其军事应用 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 643-647.
- [2] Lindmayer J. Apparatus for extending the infrared response of photocathods: US, 4891507[P]. 1990-06-13.
- [3] Glesesener J W. Image intensifier tube with IR upconversion phosphor on the input side: US, 6624414 [P]. 2003-09-23.
- [4] Kenneth A Costello, Wavelength extension for backthinned silicon image arrays: US, 6943425B2[P]. 2005-09-13.
- [5] Zhang Xiyun, Mi Xiaoyun, Bai Zhaohui, et al. Microwave synthesis and luminescence properties of CaS:Eu, Sm [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36 (11): 1996-1999. (in Chinese)  
张希艳, 米晓云, 柏朝晖, 等. CaS:Eu,Sm 的微波合成与发光性能研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36 (11): 1996-1999.
- [6] Lu Liping, Zhang Xiyun, Bai Zhaohui, et al. Synthesis and characterization of IR up-conversion material CaS:Eu,Sm by low-temperature combustion synthesis method [J]. *Materials Research Bulletin*, 2009, 44(1): 207-210.
- [7] Zhang Xiyun, Liu Quansheng, Wang Xiaochun, et al. Preparation of infrared upconversion material CaS: Eu, Sm [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, 24(4): 301-303. (in Chinese)  
张希艳, 刘全生, 王晓春, 等. 红外上转换材料 CaS:Eu,Sm 的制备[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(4): 301-303.
- [8] Cai Ping, Mi Xiaoyun, Wang Yajie, et al. Study on craft of CaS: Eu<sup>2+</sup>, Sm<sup>3+</sup> infrared upconversion screen by deposition method [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(8):1645-1649. (in Chinese)  
蔡平, 米晓云, 王亚杰, 等. 沉积法制备 CaS: Eu<sup>2+</sup>, Sm<sup>3+</sup> 红外上转换荧光屏工艺的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(8): 1645-1649.