

8 ~ 12 μm 红外图像生成装置

王宏杰¹, 钱丽勋², 李卓¹, 王欣¹, 林栩凌³

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 中国电子科技集团公司第十三研究所 第十六专业部, 河北 石家庄 050051;

3. 北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要:介绍了一种将可见光图像转换为红外图像的装置. 装置的核心器件是利用 MEMS 工艺制作的可见光/红外图像转换芯片. 红外图像生成装置包括可见光图像生成系统、可见光/红外图像转换系统以及红外图像投影光学系统三部分. 红外图像生成装置产生的红外图像辐射波段覆盖 8 ~ 12 μm , 分辨率达到了 20 lp/mm, 可模拟温度范围为 20 ~ 150 $^{\circ}\text{C}$, 图像非均匀性小于 5%, 几何畸变小于 3%.

关键词:红外图像生成技术; 半实物仿真; 光学微电子机械加工器件

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A

An infrared image projector covering 8 ~ 12 μm radiation range

WANG Hong-Jie¹, QIAN Li-Xun², LI Zhuo¹, WANG Xin¹, LIN Xu-Ling³

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang China, 050051;

3. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper presents a visual to infrared transducer based on an infrared image converter chip fabricated by micro electro mechanical systems (MEMS). The infrared image projector consists of three parts, which are visible light image generation system, infrared image converter and the infrared image projection system. This infrared image transducer covers the radiation band of 8-12 μm . Its resolution is 20 lp/mm and the apparent temperature range is 20 $^{\circ}\text{C}$ to 150 $^{\circ}\text{C}$. Non-uniformity of the image generated by infrared image projection device is less than 5% and its geometric distortion is less than 3%.

Key words: infrared image generation technology, hardware-in-the-loop (HWIL), optical micro-electro-mechanical devices

PACS: 42.72.Ai

引言

红外图像生成技术可用于在实验室模拟目标和背景的红外辐射特性, 为被测试的红外成像系统(如导引头)提供红外目标和背景的图像^[1,4]. 随着红外成像制导半实物仿真实验的发展, 红外图像生成技术的研究越来越受到重视. 主要的红外图像生成技术有: 电阻阵列、数字微镜器件(DMD)、基于 LCOS 的红外空间光调制器等.

美国 Honeywell 和加拿大 Santa Barbara Infrared

公司已经制作出了 1 024 × 1 024 和 2 048 × 1 024 大阵列电阻阵, 作为红外场景生成器已经在 MRC、DTRA 和 AMCOM 等成功应用^[3].

DMD 技术是美国德州仪器公司的专利产品, DMD 的每个像素点就是一个微小镜片, 每个镜片都可以通过电路控制偏转来调整反射光线的强弱. 基于 DMD 技术的红外场景产生器件在最近几年得到了迅猛发展, 目前报道的最高分辨率已经达到了 1 920 × 1 080.

该红外图像发生器优点是可以对较宽光谱的读

收稿日期: 2016-07-05, 修回日期: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(61205116)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61205116)

作者简介 (Biography): 王宏杰(1985-), 女, 博士研究生, 主要研究领域为红外动态目标生成技术. E-mail: wanghongjie@bit.edu.cn

Received date: 2016-07-05, revised date: 2016-12-13

出光进行调制,生成图像对比度高,技术成熟且已经有了广泛的应用,但它加工工艺相当复杂,这阻碍了它的进一步发展^[5-10].

美国休斯飞机公司研制的 LCOS 已成为投影显示技术的新主流,其图像显示原理与普通液晶显示的原理大致相同.用于红外场景产生技术时 LCOS 技术的主要限制因素是其低的图像对比度和低图像刷新速度^[5-10].

我国在此领域的研究起步较晚,虽然在红外图像生成装置的研究方面也取得了一定的进展,但是与国外的总体水平差距较大.国内主要的红外图像生成装置集中在 3 ~ 5 μm 波段,主要生成技术为 DMD 器件.国内比较成熟的电阻阵列芯片是 256 × 256,由中国科学院上海技术物理研究所研制.北京理工大学曾研制出一种激光成像系统,工作在 10.6 μm 或 0.8 μm 波段、帧频 50 Hz(逐行扫描)、分辨率为 300 TVL.

论文提出了一种红外图像生成装置,产生的红外图像覆盖 8 ~ 12 μm 波段,且具有较高的图像分辨率.新型可见光/红外图像转换薄膜是其关键技术,其制备工艺相对简单,工作时受环境影响小,而且结构简单、性能稳定、可靠性高、成本低.该红外图像生成装置在性能上能够满足大多数仿真系统的要求,并有效地解决了图像转换装置与被测传感器扫描匹配的问题,为红外成像制导半实物仿真系统提供了一项可实施的方案.

1 成像原理

红外图像生成装置的工作原理如图 1 所示.

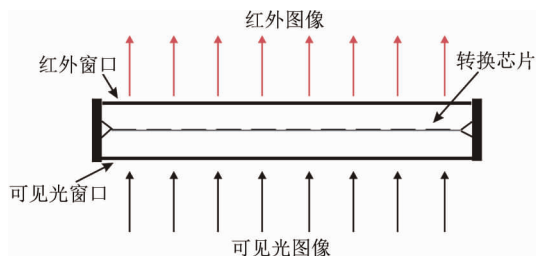


图 1 可见光/红外图像转换芯片原理图
Fig. 1 Schematic of visible-to-infrared image converter chip

可见光图像透过真空室的可见光窗口入射到红外图像转换芯片上,芯片象元吸收可见光图像能量,温度升高.由于可见光图像为灰度图像,所以芯片对应象元吸收的能量不同,升温也不同,这就产生了对应的红外图像.芯片产生的红外图像,通过红外窗口

向外辐射.

2 装置组成

根据可见光/红外图像转换芯片的工作原理设计的红外图像转换装置主要分为三个部分,分别为可见光图像生成系统、可见光/红外图像转换系统以及红外图像投影光学系统.

2.1 可见光图像生成系统

可见光图像生成系统包括可见光图像产生和投影两部分.可见光图像生成部分采用德国 Holoeye 公司的 LC-R1080 系列反射型铁电液晶硅微型高分辨率片上液晶显示器.微显示器具有全高清分辨率、高填充系数和 50 Hz 帧频.微显示器利用 VGA 或者 DVI 接口与图像信号源相连,实现同步显示输出.专门设计的微显示器光照系统,可以满足高亮度和高均匀性要求.可见光投影系统是将微显示器产生的可见光图像投影到红外图像转换芯片上.

2.2 红外图像转换系统

2.2.1 红外图像转换系统

可见光/红外图像转换部分包括真空室、制冷系统和真空系统.真空室的两面分别是可见光图像入射窗口和红外图像出射窗口,真空室的侧壁设有真空系统接口和制冷系统接口.真空系统能够使真空室保持 1×10^{-3} Pa 以下的高真空,以消除空气的热传导作用,避免对芯片的工作过程造成干扰;制冷系统为芯片提供稳定的背景工作温度.真空室示意图见图 2.

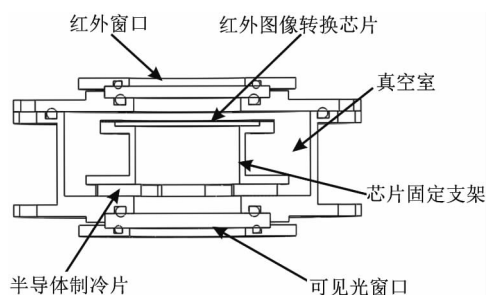


图 2 真空室结构示意图
Fig. 2 Construction of vacuum chamber

2.2.2 红外图像转换芯片

图 2 中的可见光/红外图像转换芯片利用 MEMS 工艺制作,以极薄的聚酰亚胺(PI)为衬底,在衬底上制作周期性结构的金属黑象元阵列^[11],芯片结构示意图见图 3.

如图 3 所示的芯片的象元尺寸为 50 μm ×

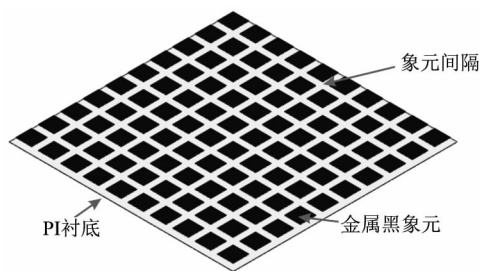


图3 红外图像转换芯片
Fig. 3 Infrared image converter chip

50 μm , 象元占空比 49%. 象元具有 90% 的高可见光吸收率, 红外波段发射率达到了 0.91. 象元的间隔能够隔离相邻象元间的热串扰, 同时在间隔处制作了一层红外波段发射率只有 0.11 的覆盖层. 转换芯片处于真空环境中, 可以降低工作时对流换热的影响. 根据热传导理论, 热传导方程为:

$$\vec{q} = -k\text{grad}T + \vec{q}_R \quad (1)$$

其中 \vec{q} 为总热通量, $-k\text{grad}T$ 表示物体内部热传导的热通量, 而 \vec{q}_R 表示辐射热通量.

由于转换芯片厚度很小, 可以近似认为如图 3 所示的芯片模型在厚度方向上温度一致, 假定构成芯片的各材料的发射率不随温度变化, 则热传导方程可以近似写为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial q_{Rx}}{\partial x} - \frac{\partial q_{Ry}}{\partial y} \quad (2)$$

其中, ρ 表示材料密度, c_p 表示热容量.

利用有限元方法对如图 3 所示的转换芯片模型进行热力学分析, 当在芯片的一个象元上加载图 4 (a) 所示的能量激励时, 此象元中心处的等效黑体辐射温度变化如图 4(b) 中的曲线 1 所示. 与接受激励的象元相邻的象元的中心处的等效黑体辐射温度变化如图 4(b) 中的曲线 2 所示. 这两个相邻象元的间隔处的等效黑体辐射温度变化如图 4(b) 中的曲线 3 所示.

由图 4 所示, 当象元接受激励时, 象元温度迅速升高, 在 0.01 s 的时间内, 其等效黑体辐射温度升高到了 450 K. 在激励结束 0.01 s 后, 芯片的温度回到了室温 290 K. 结果表明此可见光/红外图像转换芯片在模拟 290 ~ 450 K 温度范围时, 其帧频能够达到 50 Hz.

在接受激励的象元升温时, 由于与周围象元的间隔阻碍了热扩散, 所以相邻象元受到的热串扰很小. 如图 4(b) 中曲线 2 所示, 在激励结束时, 相邻象元中心处的等效黑体辐射温度升高 8 K 左右, 只有

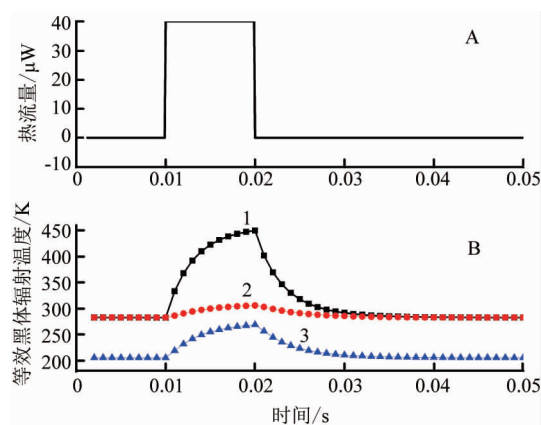


图4 热脉冲及芯片的热响应
Fig. 4 Heat pulse and induced spatial thermal distribution

接受激励象元升温量的 5%.

根据斯忒藩-波尔兹曼定律, 当物体温度为 T 时, 其表面单位面积上发射的总能量为:

$$e(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

其中 ε 为物体发射率, σ 为斯忒藩-波尔兹曼常数.

两象元间隔处由于直接与升温象元接触, 且本身体积小热容量小, 所以温度变化较大. 当在间隔处制作低发射率覆盖层时, 由于间隔处的低发射率覆盖层的发射率只有 0.11, 所以其等效黑体辐射温度很低. 如图 4(b) 曲线 3 所示, 间隔处的最高等效黑体辐射温度只有 290 K. 在芯片的象元间隔处制作的低发射率覆盖层, 抑制了间隔处的红外辐射, 使金属黑象元在工作时与周围象元的界限更加明显, 进一步提高了可见光/红外图像转换芯片的分辨率.

2.3 红外投影系统

红外投影系统的作用是将转换芯片产生的红外图像投影到被测试设备的入瞳处. 红外镜头采用三片式投影镜头设计, 镜片镀 8 ~ 12 μm 高增透膜, 透过率达 90% 以上. 专门设计的镜头视场角达到了 $12^\circ \times 8^\circ$.

3 实验研究

3.1 空间分辨率

红外图像生成装置的空间分辨率可以用调制传递函数表示, 调制传递函数表示了系统传递不同空间频率信号调制度的传递特性^[12]. 其定义为:

$$\text{MTF}(v) = \frac{M_{\text{out}}(v)}{M_{\text{in}}(v)} \quad (4)$$

其中 $M_{\text{out}}(v)$ 是输出图像的调制度, $M_{\text{in}}(v)$ 是输入图像的调制度.

通过对比度传递函数测定调制传递函数. 定义可见光/红外图像转换装置对某一空间频率 v 的对比度调制度为:

$$C(v) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

其中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别表示可见光/红外图像转换装置辐射的最大和最小光强. 则此空间频率下的对比度传递函数定义为产生像的调制度与输入像的调制度之比:

$$\text{CTF}(v) = \frac{C_{\text{out}}(v)}{C_{\text{in}}(v)}, \quad (6)$$

其中, $C_{\text{out}}(v)$, $C_{\text{in}}(v)$ 分别表示产生像的对比度调制度和输入像的对比度调制度. 设输入像的对比度调制度等于 1, 则对比度传递函数 $\text{CTF}(v) = C_{\text{out}}(v)$.

一般情况下近似认为: $\text{MTF}(v) = (\pi/4) \times \text{CTF}(v)$.

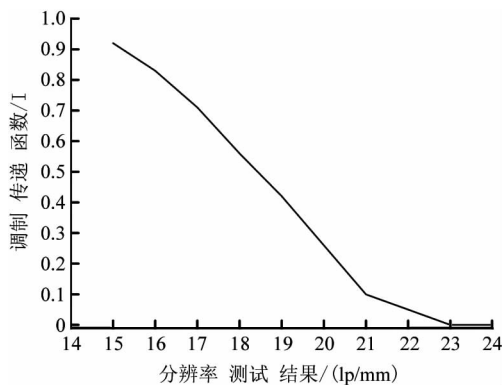


图5 分辨率测试结果
Fig. 5 MTF measurement results

实验上, 首先测得由式(4)定义的不同空间分辨率条件下的对比度. 从而计算出相应空间分辨率下的对比度传递函数 CTF 和系统的传递函数 MTF 函数值. 用调制传递函数描述系统的空间分辨率. 一般认为系统的 MTF 值下降到 0.25 ~ 0.3 时所对应的空间频率为系统的空间分辨率. 图 5 为根据分辨率测试结果计算出的传递函数曲线.

测试结果表明, 红外图像生成装置的空间分辨率为 20 lp/mm.

3.2 非均匀性及温度范围

利用图像信号源输出全白图像并投影到红外图像转换芯片上, 利用热像仪采集红外图像生成装置输出的红外图像, 测试其非均匀性^[12]. 测试结果显示, 红外图像生成装置输出的红外图像在 90% 的视场内非均匀性小于 5%. 调节图像的亮度, 通过热像仪红外图像生成装置生成图像的温度可得红外图像

生成装置生成图像的可模拟温度范围为 20 ~ 150°C.

3.3 图像光谱波段范围

利用图像信号源使红外图像生成装置产生全白图像, 将生成的红外图像的辐射能量聚焦并耦合到红外光谱仪中, 用以测量红外图像的光谱范围. 其实验框图如图 6 所示.

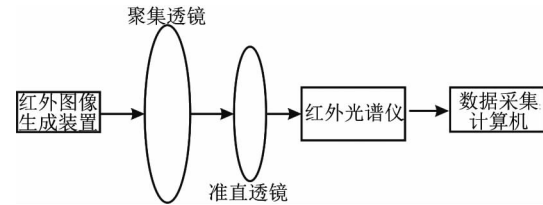


图6 辐射光谱测试原理图
Fig. 6 Setup of radiation spectra measurement

红外光谱仪的扫描结果见图 7. 由于红外图像生成装置中真空室的红外出射窗口以及红外投影部分的镜头均按照 8 ~ 12 μm 波段设计, 且全部镀制 8 ~ 12 μm 的增透膜, 其余波段被大幅度减弱, 所以红外图像生成装置生成的红外图像的波段主要集中在 8 ~ 12 μm 波段.

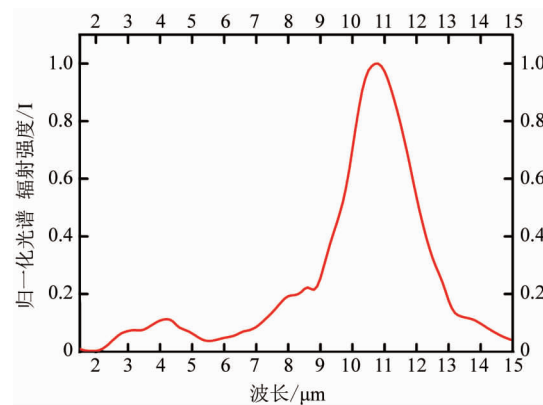


图7 辐射光谱测试结果
Fig. 7 The result of radiation spectra test

3.4 几何畸变

利用图像信号源输出九点测试图像测试红外图像生成装置的几何畸变^[12], 红外热像仪采集到的红外图像见图 8. 经测试, 在 90% 视场内, 红外图像生成装置的几何畸变小于 3%.

4 成像效果

利用 8 ~ 12 μm 红外热像仪对红外图像转换器生成的红外图像进行采集, 将可见光图像与对应的

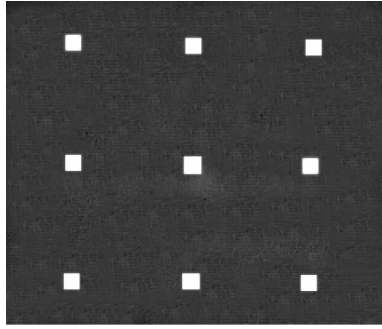


图8 几何畸变测试红外图像
Fig.8 Infrared image for geometric distortion test

红外图像对比,效果如图9所示,它在性能上能够满足大多数仿真系统的要求。

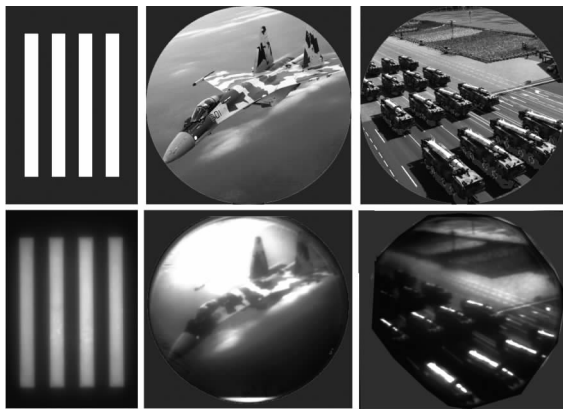


图9 上行:实拍的可见光图像;下行:由本系统生成的对应红外图像

Fig.9 On one line: Visible light images; The next line: Corresponding infrared images generated by the system

5 结论

以 MEMS 工艺制作的可见光/红外图像转换芯片为核心器件研制的红外图像生成装置,产生的红外图像辐射光谱包含 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,图像分辨率 20 lp/mm ,可模拟温度范围 $20 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$,90% 视场内非均匀性小于 5%,90% 视场内几何畸变小于 3%,帧频 50 Hz. 红外图像转换芯片是通过自身象元发热向外辐射能量,所以其产生的红外图像光谱能覆

盖 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段及 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段. 该 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 红外图像生成装置已经成功应用于红外半实物仿真实验中。

References

- [1] Driers R, Barnard K, Burroughs E, *et al.* Review of infrared scene projector technology-1993 [J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(7): 2408 - 2417.
- [2] Zhou Q. Dynamic scene simulation technology used for infrared seeker [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, **7383**: 73832W1 - 6.
- [3] LI Zhuo, QIAN Li-Xun, LI Ping, *et al.* Technologies of dynamic infrared scene projection and its new development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (李卓, 钱丽勋, 李平, 等. 红外动态场景生成技术及其新进展. *红外与激光工程*). 2011, **40**(3): 378 - 384.
- [4] Daniel A, Saylor, Mark Bowden *et al.* New scene projector developments at AMRDEC's advanced simulation center [J]. *Proc. of SPIE*, 2006, **6208**: 62080K1 - 9.
- [5] Owen M, Williams, George C *et al.* History of resistor array infrared projectors: hindsight is always 100% operability [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, **5785**: 208 - 224.
- [6] Olesona J, James J, Sparkman K, *et al.* Large format resistive array (LFRA) infrared scene projector (IRSP) performance & production status [J]. *Proc. of SPIE*, 2006, **6208**: 6208101 - 8.
- [7] William F. Characterization of digital-micromirror device-based infrared scene projector [J]. *Optical Engineering*. 2005, **44**(8): 0864021 - 7.
- [8] Beasley D B, Bender M, CROSBY J, *et al.* Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, **7210**: 7210011 - 12.
- [9] Stockley J, Bauchert K, Linnenberger A, *et al.* Liquid crystal on silicon spatial light modulator for infrared scene generation [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, **7301**: 73010H1 - 11.
- [10] Lippert J R, Bauchert K. Testing a new generation 512×512 , $> 200 \text{ Hz}$ capable, Liquid Crystal on Silicon (LCOS) with ferro-electric liquid crystal, IR scene projector [J]. *Proc. of SPIE*, 2006, **6208**: 62080L1 - 9.
- [11] QIAN Li-Xun, LI Zhuo, FAN Zeng-Ming, *et al.* Theoretical summarization model for the image quality evaluation of dynamic infrared scene [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (钱丽勋, 李卓, 范增明, 等. 红外动态场景图像质量评价理论概述. *红外与激光工程*), 2011, **40**(10): 1835 - 1840.
- [12] LI Zhuo. Characteristics of visible to infrared transducer films for dynamic image simulation [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, (李卓. 可见光/红外图像转换薄膜性质的研究. *北京理工大学学报*), 2003, **23**(4): 473 - 476.