

基于 MEMS 的红外动态图像生成技术

施蕊,徐畅,徐锐,石诺,杨扬,钱丽勋,王欣,李卓

(北京理工大学光电学院,北京 100081)

摘要:提出了一种基于 MEMS 技术的红外动态图像生成技术。利用热传导方程,建立了可见光/红外图像转换膜的理论模型;介绍了可见光/红外图像转换膜制作的工艺流程,制作了一张像元数为 512×512、像元尺寸为 35 μm 的可见光/红外图像转换膜。并利用转换膜构造了红外动态图像生成装置,通过实验对红外动态图像生成装置的性能进行了研究。利用 MEMS 技术制作的可见光/红外图像转换膜可以工作在红外 3~5 μm 和 8~12 μm 两个波段。根据实验测得红外图像生成装置的空间分辨率为 14 lp/mm,在 3~5 μm 波段,所生成红外图像的温度范围为 250~440 K,在 8~12 μm 波段,所生成红外图像的温度范围为 250~400 K。

关键词:红外动态图像生成; 微机电系统; 可见光/红外图像转换膜; 仿真

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0204002

Infrared dynamic scenes generating technique based on MEMS

Shi Rui, Xu Chang, Xu Rui, Shi Nuo, Yang Yang, Qian Lixun, Wang Xin, Li Zhuo

(Photo-Electronic College, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A technique of dynamic IR scene generation based on MEMS was presented. The theoretical model of IR scenes display film based on visible/infrared image film transducer was established. The MEMS technological processes of fabricating the film were introduced. The film with 512×512 pixels was produced, and the pixel size of the film was 35 μm. Based on the IR scene generation film an IR dynamic scene generator was built. The performances of the IR dynamic scene generator were studied experimentally. The IR scenes display film based on visible/infrared image film transducer can be used in two wave bands from 3 μm to 5 μm and 8 μm to 12 μm. The spatial resolution of the IR dynamic scene generator is 14 lp/mm. In the wave band from 3 μm to 5 μm, the equivalent blackbody temperature can be from 250 K to 440 K, and in the wave band from 8 μm to 12 μm, the equivalent blackbody temperature can be from 250 K to 400 K.

Key words: infrared dynamic scenes generation; micro-electro-mechanical systems(MEMS); visible/infrared image film transducer; simulation

收稿日期:2015-06-07; 修订日期:2015-07-10

作者简介:施蕊(1980-),女,博士生,主要从事红外目标仿真方面的研究。Email:bitsr@126.com

导师简介:李卓(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事红外动态图像仿真等方面的研究。Email:lizhuo@bit.edu.cn

0 引言

作为红外制导半实物仿真系统中的关键部件,红外动态图像生成装置的作用是在实验室条件下模拟目标和背景的红外辐射特性,为被测试的红外成像探测设备提供目标和背景的图像源。目前的红外动态图像生成技术可以分为直接辐射型和辐射调制型两种,电阻阵列和激光二极管阵列等属于直接辐射型,这些技术的工作原理相对简单,但是工艺难度大,价格昂贵。液晶光阀和数字微镜器件(DMD)等属于辐射调制型,这些技术的光谱范围宽,但是制作工艺复杂^[1-2]。DMD 器件工作时需要同步,而且在长波段应用时存在像素尺寸与波长相近产生衍射等问题^[3]。文中利用 MEMS 技术制作了一种高分辨率的可见光/红外图像转换薄膜,可以生成 3~5 μm 和 8~12 μm 两个波段的红外图像。

1 可见光/红外图像转换膜

1.1 可见光/红外图像转换膜的理论模型

当光束照射到物体表面时,物体的温度会因为吸收了光能量而升高,同时会产生红外辐射。可见光照到物体表面时,可见光能量被吸收,使物体的温度升高,通过传导、对流和辐射三种方式与周围的环境达到热平衡。当物体的厚度很薄,横向尺寸很小,并处在真空环境中,物体内部的热传导和由于对流引起的与外界的热交换可以被忽略。这样只能通过热辐射与环境进行热交换。可见光/红外图像转换膜是基于此原理工作的。可见光/红外图像转换膜的像元吸收能量后温度会发生变化,温度的变化规律满足热传导方程。因为转换膜的衬底和形成像元的材料的厚度都很薄,认为在厚度方向上没有温度梯度,温度均匀分布,在线光源照射下,转换膜表面的温度随时间和空间的变化规律可以用一维热传导方程描述^[4-7]。

$$kd \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) = d \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: T 为转换膜表面温度; ε 为转换膜表面发射率; T_0 为环境温度; k 为转换膜的热传导系数; d 为转换膜的厚度; ρ 为转换膜的密度; c_p 为转换膜的比定压热容; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数。公式(1)左边第一项和第二项分别代表热传导和辐射对转换膜表面温度变化的影响。

1.2 基于 MEMS 技术的可见光/红外图像转换膜

基于 MEMS 的可见光/红外转换膜以极薄的自支撑薄膜作为衬底,利用 MEMS 技术在衬底上生成周期性分布的可见光吸收红外辐射区域和红外辐射抑制区,每一个可见光吸收红外辐射区域相当于一个像元。可见光/红外转换膜的结构示意图如图 1 所示。

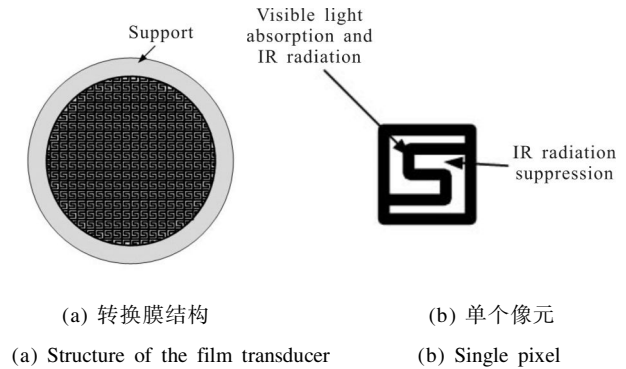


图 1 可见光/红外图像转换的膜结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the visual/infrared image film transducer

利用 MEMS 技术制作周期性结构的可见光/红外转换膜,制作流程如图 2 所示。首先在硅衬底上生长一层牺牲层,接着在牺牲层上制作衬底薄膜层,通过光刻和刻蚀等工艺在衬底上制作像元图案,获得所需要的膜结构。为了提高转换膜对可见光的吸收,需要在制作完成的衬底上制作吸收膜。

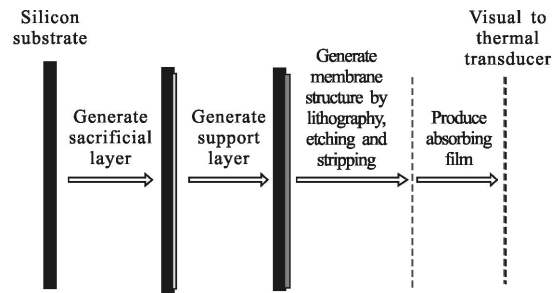


图 2 转换膜的制作流程

Fig.2 Process of the film transducer production

衬底薄膜材料具有很好的韧性,在极薄的情况下能够悬浮,而且衬底材料的热导率很小,能够满足转换膜在工作过程中抑制热传导的要求。吸收膜对可见光有极高的吸收率,表面呈疏松孔状结构,具有很好的红外发射率。红外辐射抑制区的作用是隔离像元并抑制像元之间的热传导,降低像元间的热串扰,同时抑制像元之间的红外辐射,提高转换膜的分辨率。整个转换膜固定在一个支撑架上,以保证转换

膜的平整。

2 红外动态图像生成装置

2.1 可见光/红外图像转换原理

为了获得与真实红外场景相近的红外图像,除了要完成可见光/红外图像转换,还要生成一个具有红外特征的可见光图像。这部分工作在计算机图像生成系统中完成。包括目标或背景的可见光建模,计算机图像生成系统根据目标或背景的红外辐射信息和几何信息,生成带有红外辐射特征的目标或背景可见光图像,这里的可见光图像是具有目标或背景的几何特征和温度场分布等的灰度图像。不同的灰度代表不同的温度和辐射能量。转换膜转换后的温度和输入可见光的灰度成比例关系。由此将可见光灰度图像转换为目标或背景的红外图像。

2.2 可见光/红外图像转换装置

将转换膜放入真空室中形成可见光/红外图像转换装置,结构如图 3 中的可见光/红外图像转换装置部分所示。真空室的两侧分别是可见光窗口和红外窗口,可见光图像通过可见光窗口入射到转换膜上。因为转换膜的像元具有很高的可见光吸收率,可见光的能量被转换膜吸收,像元吸收可见光能量后温度升高,产生红外辐射图像从红外窗口输出。由于可见光图像每个像素携带的能量不同,因此相应的像元吸收能量后的温度升高不同,形成了温度场的空间分布,从而产生与可见光图像对应的红外图像。

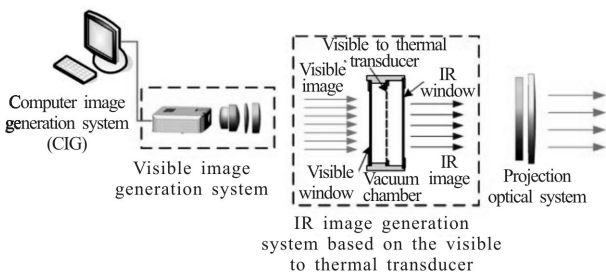


图 3 红外动态图像生成装置组成

Fig.3 Schematic diagram of IR dynamic scene generation system

2.3 红外动态图像生成装置

红外动态图像生成装置的结构如图 3 所示。可见光/红外图像转换装置是红外动态图像生成器中的主要部件。由计算机图像生成系统(CIG)生成相应的图像信息,输出到可见光图像生成系统中,输出可

见光图像,可见光图像经光学系统整形后照射在可见光/红外图像转换装置上,经可见光/红外转换膜将可见光图像转换为所需的红外图像,经投影光学系统投出。

3 红外动态图像生成装置的实验

通过实验制作了可见光/红外图像转换膜。在显微镜下观察转换膜的结构,如图 4 所示。薄膜厚度为 $1\ \mu\text{m}$,像元尺寸为 $35\ \mu\text{m}\times 35\ \mu\text{m}$ 。薄膜的有效面积为圆形,有效直径为 $65\ \text{mm}$ 。

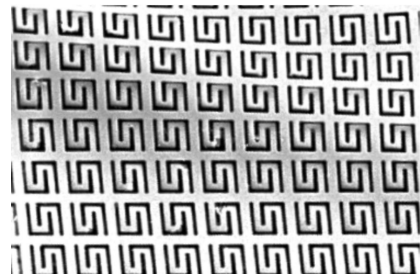


图 4 显微镜下的转换膜结构

Fig.4 Structure of visible/infrared image film transducer observed by the microscope

将转换膜放置在真空腔中,搭建红外动态图像生成装置。首先利用红外辐射光谱仪对图像生成装置的红外光谱进行测试,基于 MEMS 技术的可见光/红外图像转换器是通过自身像元的温度升高而产生红外辐射的,因此这种技术属于直接辐射型。光谱范围测试的实验装置原理框图如图 5 所示。

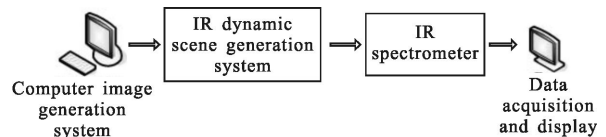


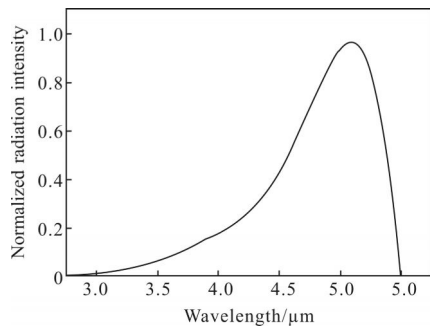
图 5 红外光谱范围测试实验装置原理框图

Fig.5 Diagram of IR spectroscopy experiment equipment

当可见光/红外转换器的红外窗口分别为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 情况下,测得的光谱曲线如图 6 所示。根据测试结果可以看出:红外动态图像生成装置的辐射光谱范围覆盖了中波红外波段($3\sim 5\ \mu\text{m}$)和长波红外波段($8\sim 12\ \mu\text{m}$)。

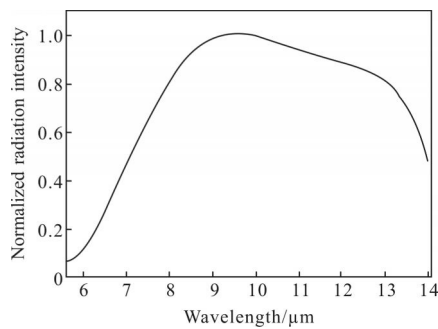
为了衡量图像生成装置的性能,利用红外热像仪对生成的红外图像进行观察。用红外热像仪代替图 6 所示实验装置中的红外辐射光谱仪。由计算机图像生成系统生成所要模拟的目标信息,输入可见光

图像生成系统,将目标信息转换为可见光图像经光学系统投影在红外动态图像生成装置中的可见光/红外图像转换膜上,经过转换膜后生成相应的红外图像,通过红外投影光学系统投影在红外热像仪的入瞳上,红外热像仪连接一台计算机作为存储和显示设备,将热像仪采集的红外图像存储并显示出来。



(a) 3~5 μm 红外窗口

(a) IR window is from 3 μm to 5 μm



(b) 8~12 μm 红外窗口

(b) IR window is from 8 μm to 12 μm

图 6 红外动态图像生成装置的辐射光谱图

Fig.6 Spectrum of the IR dynamic scene generation system

分别利用波段范围为 3~5 μm 和 8~12 μm 的热像仪对图像生成装置的红外图像进行采集,图 7 是可见光图像生成装置生成的可见光图像和红外动态图像生成装置生成的红外图像。图 7(a)、(d)为可见光图像,(b)、(e)为 3~5 μm 红外图像,图 7(c)、(f)为 8~12 μm 红外图像。图 7(e)~(f)中的圆形边界为图像生成装置的视场边界。

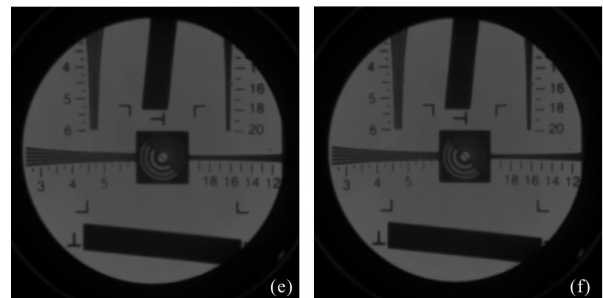
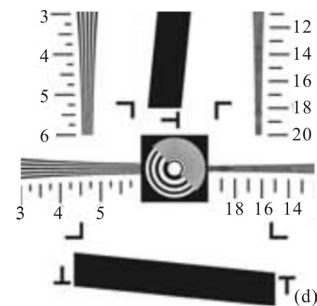
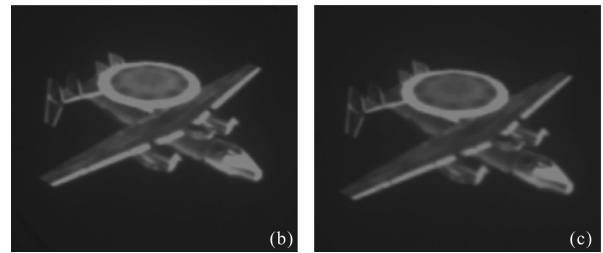


图 7 红外动态图像生成装置生成的红外图像

Fig.7 IR image generated by the IR dynamic scene generation system

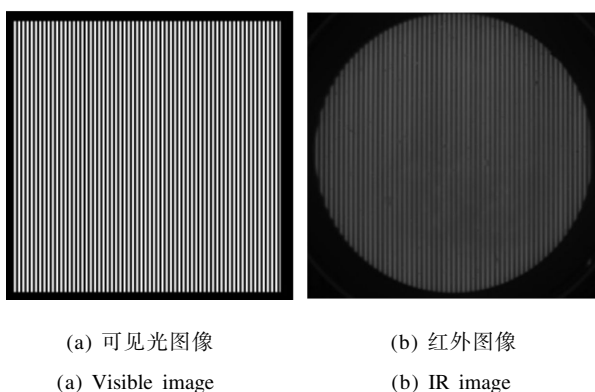
空间分辨率和灰度等级是反映红外动态图像生成装置模拟目标和背景图像细节能力的重要指标。红外动态图像生成装置的空间分辨率越高,所能模拟的目标和背景图像越精细,图像就越逼真。空间分辨率有多种表示方法,根据实验室条件,用单位长度范围内可识别的线对数来表示空间分辨率。一线对为一组明暗条纹,明条纹和暗条纹的宽度相等^[8]。相邻两条明条纹中心之间的距离称为空间周期,单位为毫米(mm),空间周期的倒数称为空间频率,单位为线对每毫米(lp/mm)。图 3 所示的红外动态图像生成装置中所采用可见光/红外转换膜为周期性结构,相邻两个像元中心之间的距离 $l=35 \mu\text{m}$,则转换膜理论的空间分辨率为:

$$\eta = \frac{1}{l} \approx 28(\text{lp/mm})$$

实验中采用中波红外制冷热像仪,探测器的像

元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$, 则热像仪的空间分辨率为 $33\ \text{lp/mm}$, 因此实验中选用的热像仪可以满足测量的要求。

用计算机图像生成系统生成一幅黑白条纹图像, 如图 8(a)所示, 将这幅图像通过可见光图像生成系统投影到转换器上, 生成相应的红外图像如图 8(b)所示, 用 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外探测器接收并显示。观察获得的红外图像, 可分辨的每对黑白条纹的宽度为 $70\ \mu\text{m}$, 因此得到转换装置实际的空间分辨率为 $14\ \text{lp/mm}$ 。红外图像中的圆形边界是红外图像生成装置的视场边界。



(a) 可见光图像 (a) Visible image
(b) 红外图像 (b) IR image

图 8 红外动态图像生成装置生成红外图像

Fig.8 IR image generated by the IR dynamic scene generation system

实验测量的空间分辨率是整个红外动态图像生成装置的空间分辨率, 红外动态图像生成装置的空间分辨率不仅与可见光/红外图像转换膜有关, 而且受可见光图像生成系统和投影光学系统的空间分辨率的限制。另外, 如果转换膜安装的方向与可见光图像的方向不匹配, 转换膜的安装方向倾斜, 导致膜上的像元相对于可见光图像倾斜, 会使有效像元尺寸增大, 从而降低空间分辨率。

目标的红外辐射特性一般用温度特性来描述, 实际上红外动态图像生成装置产生的红外图像可以看作图像辐射面上温度的空间分布。将辐射能量范围等效为温度变化范围就是场景生成装置的温度范围。利用红外热像仪的测温功能, 对生成红外图像的温度范围进行测量。在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段, 测得所生成红外图像的温度范围为 $250\sim 440\ \text{K}$, 在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段, 测得所生成红外图像的温度范围为 $250\sim 400\ \text{K}$ 。

4 结 论

文中建立了基于 MEMS 技术的可见光/红外图像转换膜的理论模型, 利用 MEMS 技术制作了可见光/红外图像转换膜。并利用这种可见光/红外图像转换膜搭建了红外图像生成的实验装置, 这种结构的红外图像生成装置具有结构简单, 成本低廉, 使用方便等特点。论文对图像生成装置的主要性能进行了实验研究。该红外动态图像生成装置可以生成 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个波段的红外图像, 实验测得的空间分辨率为 $14\ \text{lp/mm}$ 。在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段, 所生成红外图像的温度范围为 $250\sim 440\ \text{K}$, 在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段, 所生成红外图像的温度范围为 $250\sim 400\ \text{K}$ 。

参考文献:

- [1] Williams Owen M. Dynamic infrared scene projection: a review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1998, 39: 473-486.
- [2] Wilson J A, Burckel B, Caulfield J, et al. Development of photoniccrystal based large format IR scene projection technology[C]//Proceedings of SPIE, Technologies for Synthetic Environments Hardware-in-the-loop XVII, 2012, 8356: 835609.
- [3] Beasley D Brett, Bender Matt, Crosby Jay, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]// Proceedings of SPIE, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications, 2009, 7210: 721001.
- [4] Noraica Dávila, Rafmag Cabrera, Nelson Sepúlveda. Programming and projection of near IR images using VO₂ films [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24 (20): 1830-1833.
- [5] Li Zhuo. Dynamic infrared image generating technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 388-391. (in Chinese)
- [6] Li Zhuo, Wang Kuixiong, Wei Guanghui. Dynamic infrared image generating technique [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 18(6): 443-448. (in Chinese)
- [7] Li Zhuo. Characteristics of visible to infrared transducer films for dynamic image simulation [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(4): 473-476. (in Chinese)
- [8] Qian Lixun, Li Zhuo, Fan Zengming, et al. Theoretical summarization model for the image quality evaluation of dynamic infrared scene [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1835-1840. (in Chinese)