

MEMS 红外转换薄膜光驱动技术研究

张晓乐^{1,2}, 李卓^{1,2}, 高彦泽^{1,2*}, 施蕊^{1,2}, 宋健^{1,2}, 时庆峰^{1,2}, 李霁恬^{1,2}, 张思晨^{1,2}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 微机电系统(MEMS)红外转换薄膜可将写入光图像转换为红外图像,已被广泛应用于红外目标模拟器。红外焦平面探测器与红外目标模拟器对接时,探测器的积分时间必须大于红外图像的显示时间,这样才能采集到红外图像的全部灰度等级。提出一种基于 MEMS 红外转换薄膜的光驱动技术,利用薄膜的热惰性对写入光图像的能量进行积分,进而降低对红外探测器积分时间的要求。对薄膜在光驱动状态下的温度特性进行仿真和实验测试,结果表明:薄膜生成的红外图像的灰度值与写入光图像的灰度值呈线性关系。红外图像的升温时间为 9 ms,保持时间为 1 ms,降温时间为 10 ms,探测器通过对保持时间内任意时间段的积分,能够得到 256 位灰阶的红外图像。红外图像的升温最大值为 112 K,单位灰度值对应的温度分辨率为 0.44 K。

关键词 薄膜; 红外图像; 灰度等级; 光驱动; 转换薄膜; 目标模拟器

中图分类号 TN216

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1531001

Light-Driven Technology Based on MEMS Infrared Conversion Films

Zhang Xiaole^{1,2}, Li Zhuo^{1,2}, Gao Yanze^{1,2*}, Shi Rui^{1,2}, Song Jian^{1,2},Shi Qingfeng^{1,2}, Li Jitian^{1,2}, Zhang Sichen^{1,2}¹ School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;² Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

Abstract Micro-electro-mechanical system (MEMS) infrared conversion film, which can convert write visible light images into infrared images, is widely used in infrared target simulators. When an infrared focal plane detector is docking with an infrared target simulator, the integration time of detector must be greater than the display time of infrared image to collect all the gray scales of infrared image. A light-driven technology based on MEMS infrared conversion film is proposed in this paper. Energy of write visible light image is integrated with thermal inertia of the film, which reduces requirement for integration time of infrared detector. Temperature characteristics of the film in the light-driven state are simulated and tested. Results show that the gray value of infrared image generated by the film is linearly related to that of write visible light image. The infrared image has heating time of 9 ms, keeping time of 1 ms, and cooling time of 10 ms. The detector can get a 256 gray-scale infrared image by integrating for any period during keeping time. The maximum temperature rise of infrared image is 112 K, and the temperature resolution corresponding to the unit gray value of infrared image is 0.44 K.

Key words thin films; infrared image; gray scale; light driving; conversion film; target simulator

OCIS codes 310.6845; 110.3080; 040.3060

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-02-09; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 中国博士后科学基金(2020TQ0036)

通信作者: *gao_yanze@bit.edu.cn

1 引言

红外目标模拟器是红外制导半实物仿真实验系统的重要组成部分,其作用是在实验室条件下为被测红外探测设备生成可模拟目标和背景红外辐射特性的红外图像^[1-2]。根据红外图像生成器件的不同,红外目标模拟器主要包括基于电阻阵^[3-4]、基于数字微镜器件(DMD)^[5-8]、基于微机电系统(MEMS)红外转换薄膜的红外目标模拟器等^[9-12]。国外红外目标模拟器的主流技术是基于电阻阵,其发展水平较高,国内电阻阵技术受限于工艺水平,目前最大阵列规模为 512×512 。基于DMD的红外目标模拟器可以实现较大的阵列规模,但DMD的像元尺寸接近长波红外波段(波长范围为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$),故生成的长波红外图像的对比度无法满足使用需求。此外,DMD是一种反射式空间光调制器,采用脉冲宽度调制(PWM)技术后,其生成256位灰阶(8 bit灰度图像的最高灰阶)图像所需的最短时间在ms量级^[13-15]。而红外焦平面探测器的积分时间通常在十几 μs 到数百 μs 之间,故其无法采集到完整的256位灰阶图像。MEMS红外转换薄膜是另一种重要的红外图像生成器件,国内目前已经可以制备较大的阵列规模(1300×1300)^[12]。MEMS红外转换薄膜辐射光谱近似黑体谱,覆盖中波红外波段(波长范围为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$)和长波红外波段(波长范围为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$)。转换薄膜的驱动方式为光驱动,即向薄膜表面投射具有灰度分布的可见光图像,膜上像元吸收可见光能量,薄膜迅速升温,从而在薄膜表面形成温度场分布,产生与温度场对应的红外图像。光驱动技术是MEMS红外转换薄膜的工作基础,本文提出一种基于DMD二值模式的光驱动技术,将DMD

产生的可见光图像投射到薄膜表面,利用薄膜的热惰性对可见光图像的能量进行积分,从而薄膜生成的红外图像具有一定的保持时间,短积分时间内红外探测器可以采集到全部256位灰阶的红外图像。通过对光驱动状态下的MEMS红外转换薄膜的温度-时间特性进行仿真与实验研究,验证了所提光驱动技术的可行性。

2 光驱动原理

MEMS红外转换薄膜结构如图1(a)所示,包括衬底、黏结层和辐射层,其中衬底和黏结层分别起支撑和导热作用,辐射层可以吸收可见光能量而迅速升温并向外辐射红外能量。衬底材料为聚酰亚胺,在宽温度范围($-200 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$)内具有较好的热稳定性;黏结层材料为铬;辐射层为具有高可见光吸收率的金属黑多孔结构,其在整个可见光波段的吸收率大于95%^[2]。薄膜的光驱动工作过程如图1(b)所示,光源发出的照明光首先在时域上被调制,DMD再对时域调制后的照明光进行空间调制,进而得到可见光波段的写入光图像。接着,利用图像写入系统将可见光图像投射到MEMS红外转换薄膜表面,膜上像元吸收可见光能量,薄膜迅速升温,从而在薄膜表面形成与写入光图像灰度分布相对应的温度场分布,进而产生与温度场对应的红外图像。薄膜具有一定的热惰性(热惰性指当物体所处的环境温度发生瞬间变化时,物体本身温度变化的滞后性),其取决于物体本身的比热容和质量^[2]。以MEMS红外转换薄膜为例,当写入光照射于其上时,薄膜吸收写入光能量而逐渐升温。当撤去写入光后,薄膜的温度并不会迅速下降到环境温度,而是具有一定的保持时间,即薄膜可短暂地累积写入光的能量。

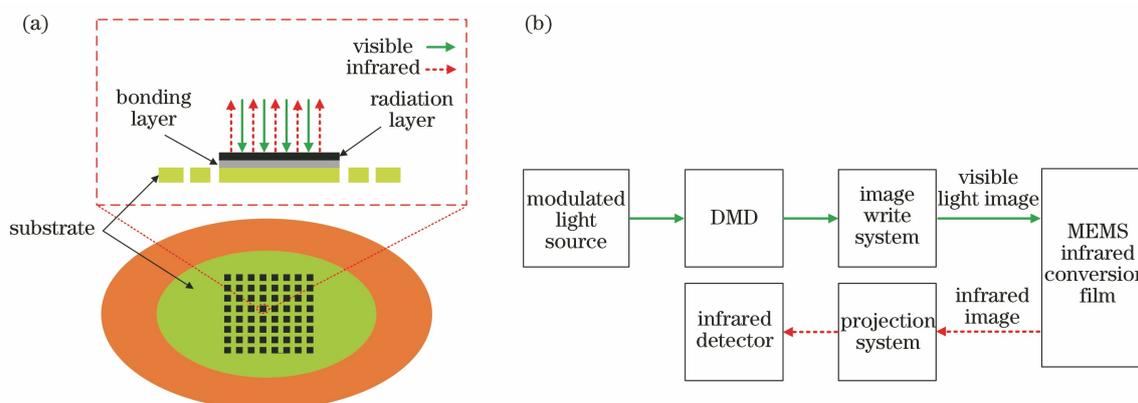


图 1 MEMS 红外转换薄膜工作原理。(a) 薄膜结构;(b) 光驱动工作过程

Fig. 1 Working principle of MEMS infrared conversion film. (a) Structure of film; (b) working process of light driving

光源的强度首先在时域上被调制,如图 2 所示,每个调制周期 $T(T=8\Delta t, \Delta t$ 为子场时间)被划分为 8 个子场,第 i 个子场内的光功率为

$$P_i = A/2^{i-1}, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (1)$$

式中: A 为光源的最大光功率。

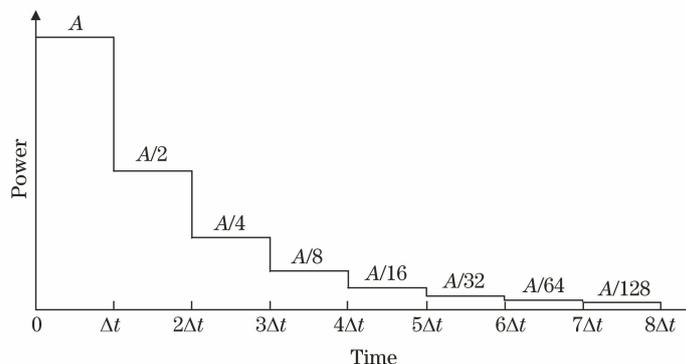


图 2 光源调制曲线

Fig. 2 Modulation curve of light source

8 bit 灰度图像的每个像素的十进制灰度值可转换为 8 位二进制灰度值,二进制灰度值的第 i 位对应的十进制灰度值为 2^{i-1} ,即

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^8 [B_i(x, y) \times 2^{i-1}], \quad (2)$$

式中: $G(x, y)$ 为像素 (x, y) 的十进制灰度值,取值范围为 $0 \sim 255$; $B_i(x, y)$ 为像素 (x, y) 的二进制灰

度值的第 i 位,其取值为 0 或 1。

先将一幅 8 bit 灰度图像的每个像素的十进制灰度值转换为对应的二进制灰度值,然后分别提取所有像素的二进制灰度值的第 i 位,共组成 8 个二值矩阵,其中第 i 个二值矩阵中的 (x, y) 元素的取值为(2)式中的 $B_i(x, y)$,将第 i 个二值矩阵代表的二值图像记作位平面 i ,如图 3 所示。

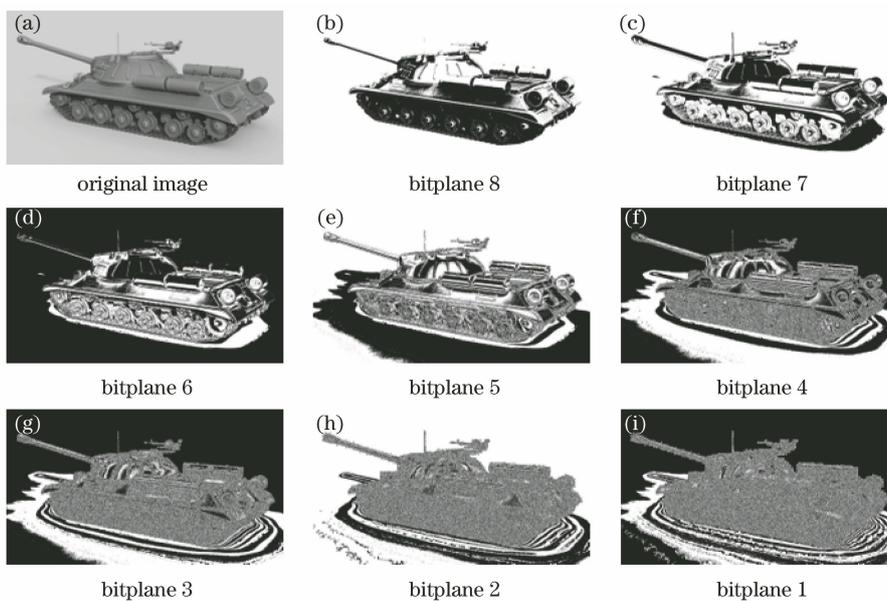


图 3 灰度图像分解结果

Fig. 3 Results of decomposition of gray image

光源的一个时域调制周期被划分为 8 个子场, DMD 在 8 个子场内显示 8 幅二值图像(位平面 8 至位平面 1),如图 4 所示。

在一个调制周期内,被 DMD 像素 (x, y) 反射进入图像写入系统的平均光功率为

$$\bar{P}(x, y) = \frac{1}{8\Delta t} \times \sum_{i=1}^8 [B_{9-i}(x, y) \times P_i \times \Delta t] = \frac{A}{2^{10}} \cdot G(x, y). \quad (3)$$

由(3)式可知, $\bar{P}(x, y)$ 正比于原始 8 bit 灰

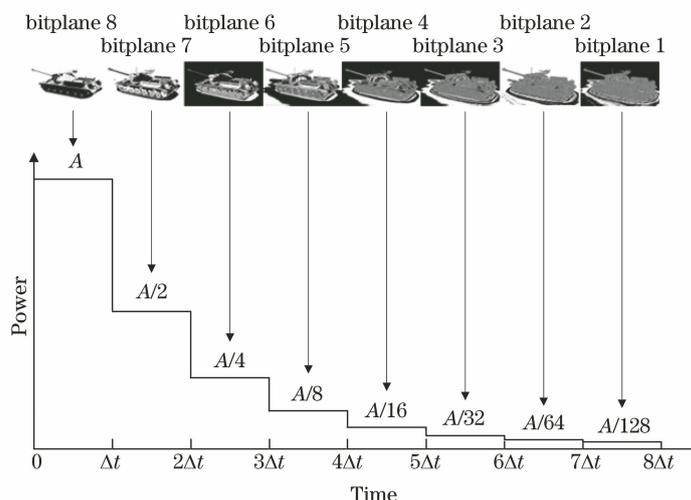


图 4 灰度图像合成结果

Fig. 4 Composite results of gray images

度图像的十进制灰度值 $G(x, y)$, 这表明通过上述光驱动方法, 可以在一个调制周期内产生具有 256 位灰阶的写入光图像。

3 光驱动薄膜的温度响应特性

3.1 薄膜温度特性仿真

当写入光图像投射到 MEMS 红外转换薄膜表面时, 膜上像元吸收写入光能量, 薄膜迅速升温, 在薄膜表面形成与写入光图像灰度分布相对应的温度场分布, 薄膜的温度变化可用热传导方程^[16-17]描述:

$$d\rho c_p \frac{\partial T_t}{\partial t} = Q(t) - \epsilon\sigma(T_t^4 - T_0^4) - g(T_t - T_0), \quad (4)$$

式中: $d=0.2 \mu\text{m}$ 为薄膜厚度; $\rho=1300 \text{ kg/m}^3$ 为薄膜密度; $c_p=650 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 为薄膜比热容; $T_0=300 \text{ K}$ 为环境温度; $\epsilon=0.8$ 为薄膜表面发射率; $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯特藩-玻尔兹曼常量;

$g=36 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 为等效制冷系数; T_t 为薄膜表面温度; $Q(t)$ 为 t 时刻写入光功率密度。

薄膜的温度响应曲线如图 5 所示, 加热时间和散热时间都设置为 20 ms。其中写入光功率密度在加热时间内保持不变, 如图 5(a) 所示。根据(4)式可计算出薄膜表面温升随时间的变化曲线, 结果如图 5(b) 所示, 薄膜温升曲线分为升温区、温度保持区、散热区, 温升由 0 K 变化到 $0.9\Delta T_{\text{max}}$ 为升温区, 温升由 $0.9\Delta T_{\text{max}}$ 变化到 ΔT_{max} 为温度保持区, 温升由 ΔT_{max} 变化到 $0.1\Delta T_{\text{max}}$ 为散热区, 其中 ΔT_{max} 为温升的最大值。薄膜表面的温度变化取决于其吸热速率和散热速率, 由(4)式可知, 当薄膜表面的温度升高时, 其辐射散热项 $\epsilon\sigma(T_t^4 - T_0^4)$ 和制冷散热项 $g(T_t - T_0)$ 都会增大, 即薄膜的散热速率随着薄膜自身温度的升高而加快。由于写入光功率保持不变, 因此薄膜的吸热速率不变。在升温区, 吸热速率大于散热速率, 薄膜温度升高; 在温度保持

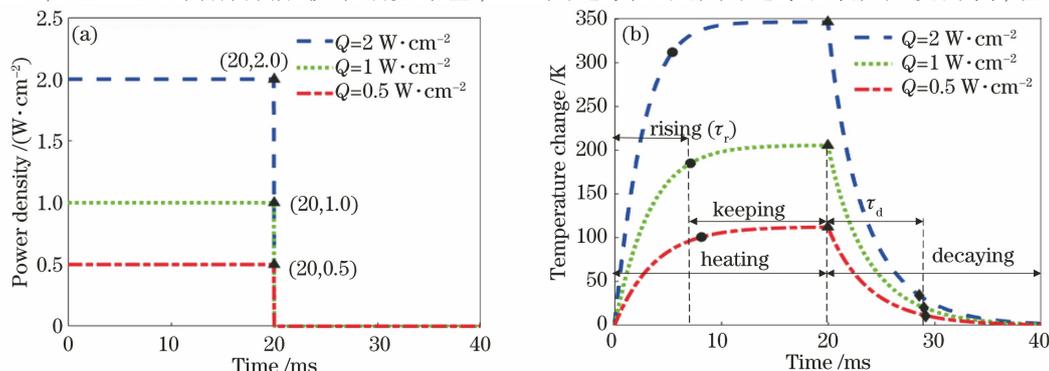


图 5 薄膜的温度响应曲线。(a) 写入光功率密度曲线; (b) 薄膜温度变化曲线

Fig. 5 Temperature response curves of film. (a) Power density curves of write visible light; (b) temperature change curves of film

区,由于薄膜温度的升高,散热速率等于吸热速率,因此在薄膜表面达到了动态的热平衡,薄膜温度保持平稳。当撤去写入光后,薄膜不再吸热,薄膜表面温度的热平衡被打破,薄膜表面温度逐渐下降,最终与环境温度相当。在图 5(b)中, τ_r 为上升时间, τ_d 为下降时间,可以看出,随着写入光功率密度的增加, τ_r 和 τ_d 均会减小, τ_r 和 τ_d 越小,代表薄膜的温度响应越快。

按照第 2 节中介绍的光驱动方法的写入光调制

波形变化,将加热时间和散热时间都设置为 20 ms,仿真得到的对应的薄膜温度变化曲线如图 6 所示,分别计算了写入光灰度值为 255、157、1 时的写入光调制波形及相应的薄膜温度变化曲线。由于薄膜的温度响应时间(τ_r 和 τ_d)随着写入光功率密度的增大而减小,因此薄膜的加热时间和散热时间由写入光灰度值为 1 时的 τ_r 和 τ_d 确定,由图 6(c2)可知,加热时间应不低于 9 ms,散热时间应不低于 9.5 ms。

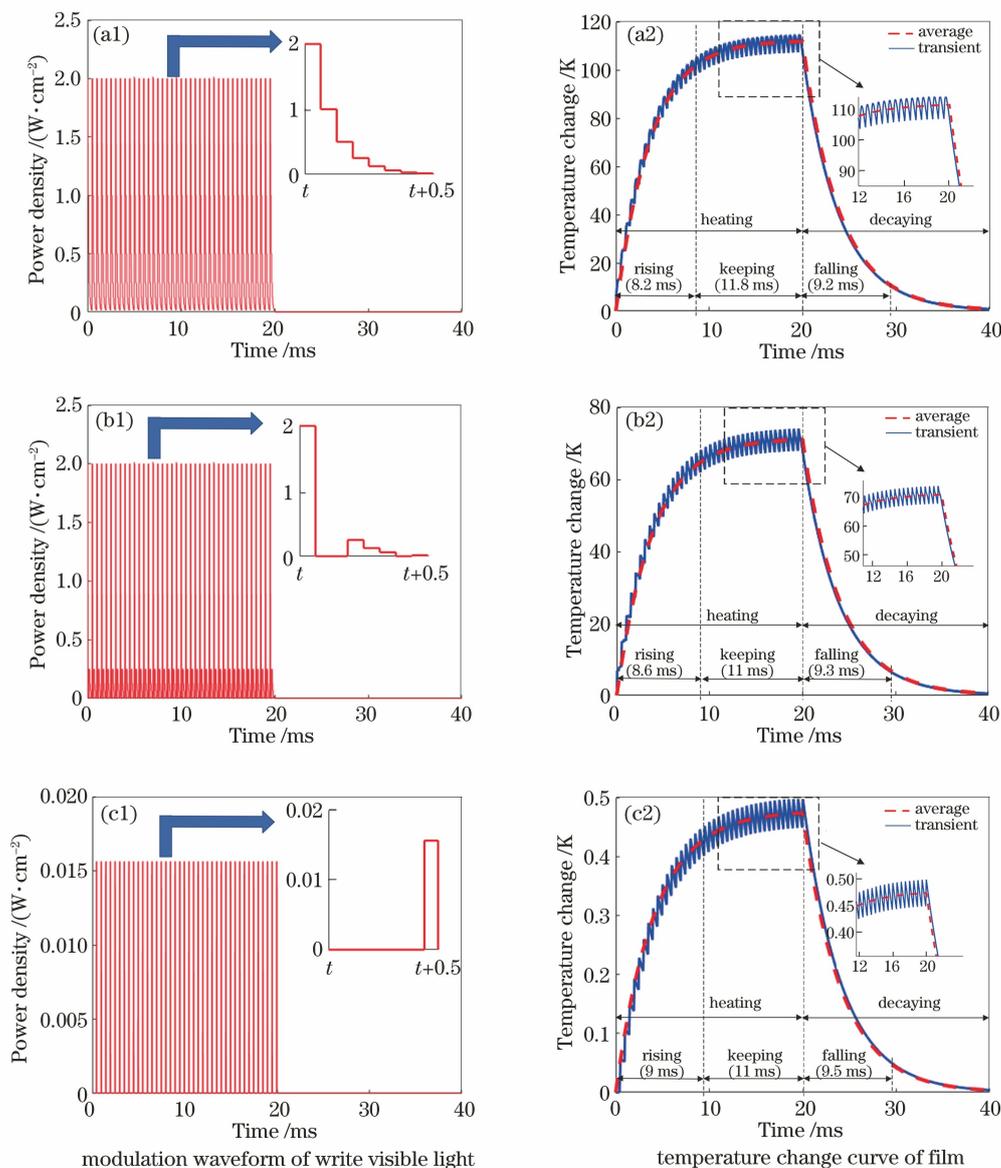


图 6 写入光调制波形及薄膜温度变化曲线。(a1)(a2)灰度值为 255;(b1)(b2)灰度值为 157;(c1)(c2)灰度值为 1

Fig. 6 Modulation waveforms of write visible light and temperature change curves of film.

(a1)(a2) Gray value is 255; (b1)(b2) gray value is 157; (c1)(c2) gray value is 1

薄膜温度保持区中温度变化与写入光灰度值的关系如图 7 所示,可以看出,二者基本呈线性关系,表明通过控制写入光的灰度值可获得 256 位灰

阶红外图像,温升最大值为 112 K,单位灰度值对应的温度分辨率为 0.44 K。对红外探测器在薄膜的温度保持区产生的红外图像进行积分,就可以采集

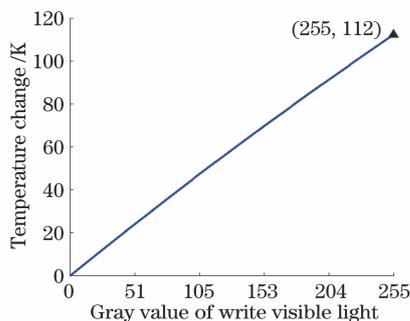


图 7 薄膜温度保持区中温度变化与写入光灰度值的关系
Fig. 7 Relationship between temperature change in temperature keeping region of film and gray value of write visible light

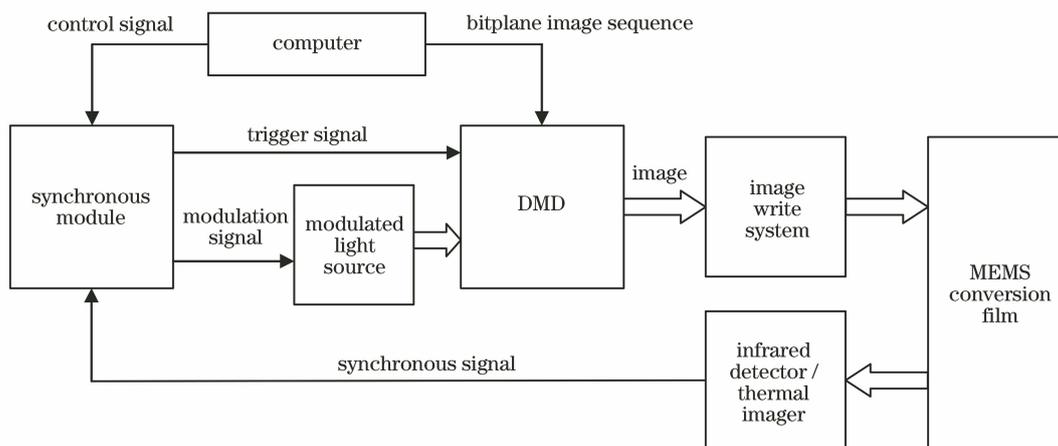


图 8 实验装置框图

Fig. 8 Block diagram of experimental equipments

率,激光经照明光学系统整形和匀化后照射于 DMD 上。DMD 接收计算机发送的位平面图像序列,在触发信号的触发下同步显示各个位平面二值图像,与调制激光配合生成写入光图像。写入光图像被图像写入系统成像在 MEMS 红外转换薄膜上,进而生成与写入光图像对应的红外图像。

3.2.1 写入光灰度控制实验

写入光图像的灰度测试实验装置图如图 9 所示。将灰度值分别为 255、207、243、252 的全白 8 bit 灰度图拆分为 4 组位平面图像序列,每组位平面图像序列内包含 8 幅位平面二值图像,利用 DMD 分别显示不同灰度对应的位平面图像序列,利用探测器采集被 DMD 反射后进入图像写入系统的写入光信号,得到的波形如图 10(a)所示。利用 DMD 产生灰度为 0~255 的写入光图像,探测器采集到的写入光信号的平均功率如图 10(b)所示,可知写入光平均功率与设置的灰度值之间基

到 256 位灰阶的红外图像。

3.2 实验研究

实验装置框图如图 8 所示,包括同步模块、调制光源、DMD、图像写入系统、MEMS 红外转换薄膜、红外探测器/热像仪和计算机。

同步模块接收探测器发送的同步信号,在同步信号的触发下生成光源的调制信号和 DMD 的触发信号,保证光源调制波形的 8 个子场与 DMD 显示的 8 幅二值图像在时间上同步,同时使探测器或热像仪的积分时间在薄膜生成的红外图像的保持时间内。光源由激光器和照明光学系统组成,激光器根据同步系统产生的光强调制信号调制出射激光功

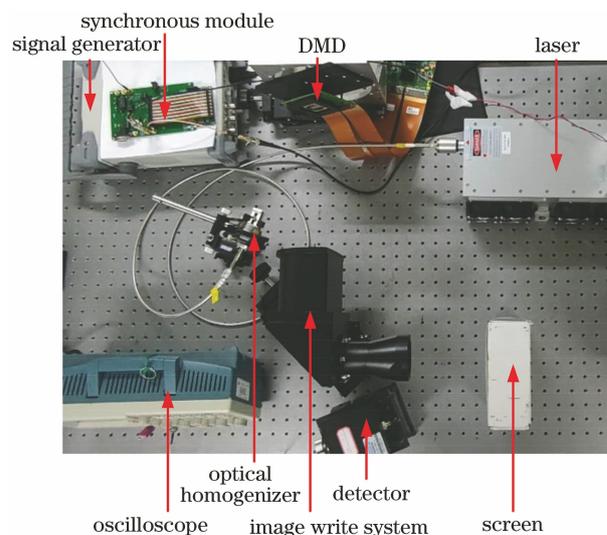


图 9 写入光图像灰度测试实验装置图

Fig. 9 Diagram of experimental devices for gray test of write visible light image

本呈线性关系。

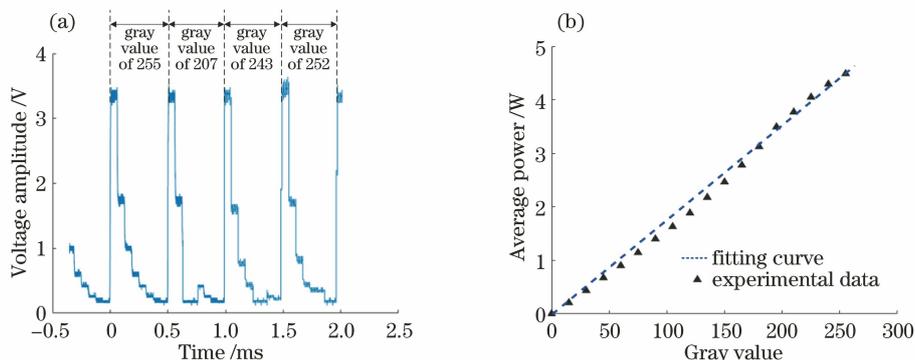


图 10 写入光图像灰度测试结果。(a)不同灰度值对应的写入光波形;(b)写入光平均功率与灰度值之间的关系
Fig. 10 Results of gray test of write visible light image. (a) Write visible light waveforms corresponding to different gray values; (b) relationship between average power of write visible light and gray value

3.2.2 红外灰度测试实验

红外灰度测试实验装置图如图 11 所示,以红外热像仪输出的同步信号作为同步装置的外同步信号,DMD 出射的写入光图像被图像写入系统投射在 MEMS 红外转换薄膜表面,利用热像仪对薄膜产生的红外图像进行采集。通过改变写入光图像灰度可改变写入光功率密度,测得的薄膜表面的温度变化如图 12(a)所示,可见薄膜表面的温升与写入光功率呈线性关系,实验结果与图 7 所示的仿真结果一致。由图 6 仿真结果可知,薄膜加热时间需不低于 9 ms,散热时间需不低于 9.5 ms,故为了充分验证 MEMS 薄膜的帧频刷新能力,实验中将加热时间和散热时间都设置为 10 ms。当写入光灰度值为 255 时,MEMS 薄膜温度变化随时间的变化情况如图 12(b)所示,上升时间为 8.2 ms,温度保持时间为 1.8 ms,下降时间为 9.2 ms,实验结果与图 6(a)所

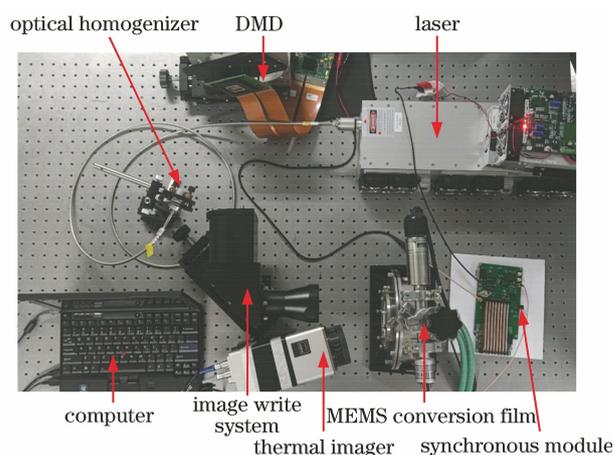


图 11 红外灰度测试实验装置图
Fig. 11 Diagram of experimental devices for infrared gray test

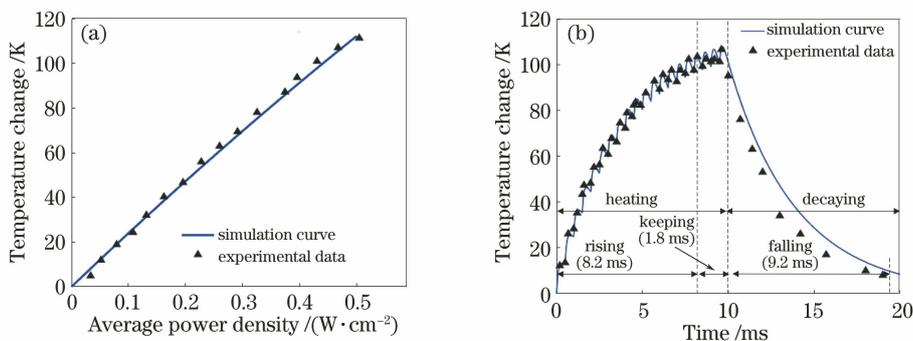


图 12 红外灰度测试实验结果。(a)不同写入光功率对应的薄膜温度变化;
(b)写入光灰度值为 255 时,薄膜温度变化与时间关系

Fig. 12 Results of infrared gray test. (a) Temperature changes of film corresponding to different write visible light powers; (b) relationship between temperature change of film and time when gray value of write visible light is 255

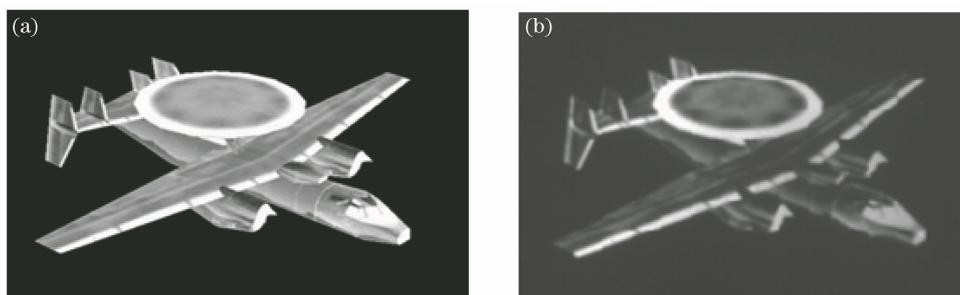


图 13 红外图像的生成结果。(a)计算机写入原图;(b) MEMS 转换薄膜生成的红外图像

Fig. 13 Generation result of infrared image. (a) Original image written by computer; (b) infrared image generated by MEMS conversion film

4 结 论

提出一种基于 MEMS 红外转换薄膜的光驱动技术,利用 DMD 二值模式和光源调制相结合的方法实现了 8 bit 写入光图像的灰度分解与灰度合成,并进行了实验验证。利用写入光图像照射 MEMS 红外转换薄膜以生成红外图像,红外图像的温度变化与写入光图像的灰度值呈线性关系,实验结果与仿真结果吻合,产生的红外图像的温度时间曲线与仿真结果一致。所提技术利用了 MEMS 红外转换薄膜的热惰性,对写入光图像进行时间积分,使红外焦平面探测器在较短的积分时间内采集到全部 256 位灰阶红外图像,实现了焦平面探测器积分时间和红外图像生成时间的匹配,可应用于红外目标模拟器中。

参 考 文 献

- [1] Wang Z Q, Wang C Y, Sun H, et al. Design of off-axis three-mirror optical system for dynamic target simulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 012203.
王志强,王春艳,孙昊,等. 动态目标模拟离轴三反光学系统的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 012203.
- [2] Zhou L. MEMS visible/infrared image conversion film[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2020: 1-9.
周朗. MEMS 可见光/红外图像转换薄膜的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2020: 1-9.
- [3] Sun S L, Huang Y, Ma B, et al. Research on infrared single pixel modeling for MOS resistor array based on loop [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1226002.
孙嗣良,黄勇,马斌,等. 基于回路的 MOS 电阻阵单像素红外模型建模方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 1226002.
- [4] Wang X, Li D F, Li Z, et al. Performance improvement of an infrared scene generation chip by in-plane microstructures [J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26807-26822.
- [5] Khalifa A A, Aly H A. Near-infrared video projection system based on digital micromirror devices and digital signal processors [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12): 123102.
- [6] Gross A, Ivzan N H, Farah N, et al. High-resolution VSDI retinotopic mapping via a DLP-based projection system [J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(10): 5117-5129.
- [7] Zhang Y X, Wang Y P, Hou J Y. Circuit and optical system design for high frame rate DMD infrared scene simulation equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0404003.
张颖新,王云萍,侯军燕. 高帧频 DMD 红外景象仿真设备电路与光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0404003.
- [8] Vienola K V, Damodaran M, Braaf B, et al. *In vivo* retinal imaging for fixational eye motion detection using a high-speed digital micromirror device (DMD)-based ophthalmoscope [J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(2): 591-602.
- [9] Zhou L, Wang X, Zhang J Y, et al. Self-suspended carbon nanotube/polyimide composite film with improved photo thermal properties [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(20): 205103.
- [10] Xu C, Liu D, Zhou L, et al. Thermodynamics characteristics of MEMS infrared thin film [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32779-32788.
- [11] Zhao Q, Li Z, Wang X, et al. Spatial resolution of infrared scene projector chip with periodical microstructure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1031001.
赵乾,李卓,王欣,等. 周期性微结构对红外场景生成芯片空间分辨率的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1031001.
- [12] Zhou L, Wang X, Yang S H, et al. A self-suspended

- MEMS film convertor for dual-band infrared scene projection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103231.
- [13] Chen X Q, Jiang A M. Source simulation experimental system based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (10): 1011003.
陈雪旗, 姜爱民. 基于数字微镜器件的面源目标模拟实验系统研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39 (10): 1011003.
- [14] Texas Instruments. DLP9500 DLP[®] 0.95 1080p 2x LVDS Type A DMD datasheet [EB/OL]. [2021-12-25]. <https://www.ti.com/product/DLP9500>.
- [15] Zhang N, Tang X Y, Zhang H. Design of high frame frequency infrared scene simulation system based on DMD [J]. *Infrared*, 2016, 37(5): 10-16.
张宁, 汤心溢, 张昊. 基于 DMD 的高帧频红外场景仿真系统设计 [J]. *红外*, 2016, 37(5): 10-16.
- [16] Liu D, Zhou L, Wang X, et al. The thermodynamic properties of the MEMS infrared transducer [J]. *Optical Technique*, 2019, 45(4): 502-508.
刘丹, 周朗, 王欣, 等. MEMS 红外图像转换芯片热力学性质研究 [J]. *光学技术*, 2019, 45(4): 502-508.
- [17] Wang X, Zhao Q, Li Z, et al. Measurement of the thermophysical properties of self-suspended thin films based on steady-state thermography [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14560-14572.