

可见光/红外图像转换薄膜的研究*

禹宣伊¹⁾ 丁欣¹⁾ 李卓²⁾ 许京军¹⁾ 张光寅¹⁾

¹⁾ 南开大学物理科学学院光子学中心, 天津 300071)

²⁾ 长春光学精密机械学院理学分院, 长春 130022)

(2001 年 6 月 5 日收到, 2001 年 11 月 13 日收到修改稿)

针对红外成像制导半实物仿真系统对图像转换器的需求, 基于物体吸收能量后温度升高而产生热辐射的原理, 设计并制备出一种新型金黑可见光/红外图像转换薄膜, 建立了薄膜辐射的物理和数学模型, 求解了薄膜一维和二维热传导的定解问题, 分析了黑体薄膜时间和空间特性, 提出了用周期性网格结构黑体薄膜提高转换薄膜的空间分辨率的方案, 制备出的转换薄膜达到的技术指标为: 薄膜尺寸 $\phi 52\text{mm}$, 像元尺寸 $140\mu\text{m} \times 140\mu\text{m}$, 像元间距 $29\mu\text{m}$, 时间常数 6ms , 空间分辨率 $6lp/\text{mm}$.

关键词: 金黑, 周期性网格结构, 薄膜

PACC: 4280Q, 4440, 6770

1. 引言

红外动态图像转换技术涉及多种技术领域, 国际上发展了若干种可见光/红外动态图像转换技术方案^[1], 在实验中得到实际应用的有: 电阻列阵、可变形反射镜、液晶光阀、激光记录器、红外阴极射线管、Bly 元件^[2,3]等. 本文在 Bly 元件的基础上设计并制备出一种新型金黑可见光/红外图像转换薄膜^[4], 此图像转换薄膜不仅制备工艺相对简单, 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. 它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.

2. 理论研究及器件设计

2.1. 一维弱瞬态热传导的定解问题

物体通过热传导、热对流和热辐射三种基本方式来与周围环境进行热量传递. 当物体处于真空中时, 由于对流而引起的热交换可以被忽略, 只考虑辐射和热传导引起的热交换. 这就是可见光/红外动态

图像转换器的基本工作原理.

当脉冲激光照射到薄膜表面时, 薄膜温度变化规律满足弱瞬态热传导方程^[5,6]. 初始温度均匀分布为 T_0 的半无限大物体 ($x-y$ 平面) 如图 1 所示, 在线光源入射的条件下 (y 方向受热均匀, 没有温度梯度), 假设衬底和金黑无限薄, 以至于在厚度方向 (z 方向) 上温度没有梯度, 而且衬底对入射光无吸收. 这样, 在真空条件下, 薄膜受到光照后的温度变化规律可以用一维弱瞬态热传导的定解问题来描述.

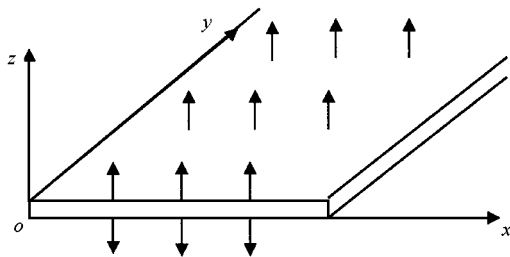


图 1 半无限大空间一维薄膜示意图

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

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t), \quad (2)$$

* 国家杰出青年科学基金(批准号 69825108)和国家重点基础研究发展规划(批准号 G1999033003)资助的课题.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_0 \quad x > 0, \quad (3)$$

$$T(x, t)|_{t=0} = T_0 \quad x \geq 0, \quad (4)$$

其中, T 为薄膜温度, T_0 为环境温度, k 为薄膜热传导系数, d 为介质的厚度, ρ 为介质的密度, C_p 为介质定压比热, ε 为薄膜前后表面发射率之积, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, $q(t)$ 为入射脉冲激光能量密度, 其表达式为

$$q(t) = \begin{cases} q_0 & 0 < t < t_0, \\ 0 & t > t_0. \end{cases}$$

对上述方程作 $T \sim T_0$ 的近似, 并引入温差函数

$U = T - T_0$ 得

$$kd \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - 4\varepsilon\sigma T_0^3 U = \rho d C_p \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t), \quad (6)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} U = 0, \quad (7)$$

$$U(x, 0) = 0. \quad (8)$$

方程组的解为

$$\begin{aligned} U(x, t) = & \int_0^t \frac{q_0}{k\sqrt{\alpha}} \exp\left(-\frac{\beta}{\alpha}(t-t')\right) \\ & \times \frac{1}{\sqrt{\pi(t-t')}} \exp\left(-\frac{\alpha x^2}{4(t-t')}\right) dt' \\ & - \int_0^t \frac{q_0}{k\sqrt{\alpha}} \exp\left(-\frac{\beta}{\alpha}(t-t')\right) \\ & \times \frac{1}{\sqrt{\pi(t-t')}} \exp\left(-\frac{\alpha x^2}{4(t-t')}\right) \\ & \times h(t-t_0) dt', \end{aligned}$$

其中

$$h(t-t_0) = \begin{cases} 0 & 0 < t < t_0, \\ 1 & t > t_0, \end{cases}$$

$$\frac{\rho d C_p}{kd} = \alpha, \quad \frac{4\varepsilon\sigma T_0^3}{kd} = \beta.$$

上式即为定解问题的解, 其中的积分部分可以用数值积分做出. 我们通过研究薄膜时间常数和空间分辨率随各个参数的变化规律发现: 对于入射激光功率密度和脉冲加热时间等外界因素, 应在选择参数时考虑薄膜所能承受的最高温度(实验中, 当入射激光功率超过 1500 W/m^2 时, 薄膜发生永久性损坏). 影响薄膜表面温度和辐射分布的时间和空间特性的主要因素是介质密度 ρ 、热传导系数 k 和介质定压比热 C_p . 为使薄膜具有高的空间分辨率和尽量小的时间常数, 我们提出了制备周期性网格结构薄

膜的方案.

2.2. 周期性网格结构薄膜二维热传导方程及其解

网格结构的双层薄膜仍然很薄(微米量级), 所以仍可以认为在薄膜厚度方向上没有温度梯度. 金黑被制成了网格, 每个金黑网格作为一个“像元”, 所以金黑的热传导可以忽略, 只起到增加薄膜吸收和发射率的作用. 这样, 我们只需研究衬底的热传导行为.

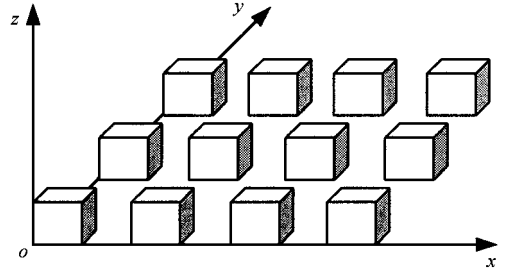


图2 周期性网格结构薄膜示意图

假设周期性网格结构中的“像元”上温度均匀, 薄膜在厚度方向(z 方向)上温度均匀. 虽然实验中所使用的光源为非均匀的高斯光束, 但由于每一个“像元”尺寸与激光光斑相比很小, 因此将每个“像元”看成一个在二维半无限大空间的“点源”, 如图2所示, 从而在数学上建立单层膜的二维瞬态热传导方程. 方程形式为

$$kd \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \varepsilon' \sigma (T^4 - T_0^4) = \rho d C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (9)$$

其中 ε' 为衬底上下表面发射率之和.

边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t), \quad (10)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = q(t), \quad (11)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_0 \quad x > 0, \quad (12)$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} T(y, t) = T_0 \quad y > 0, \quad (13)$$

其中

$$q(t) = \begin{cases} q_0 & 0 < t < t_0, \\ 0 & t > t_0. \end{cases}$$

初始条件为

$$T(x, y, t)|_{t=0} = T_0 \quad x \geq 0, y \geq 0. \quad (14)$$

方程的解为

$$\begin{aligned}
 U = & \int_0^t \frac{q_0}{k^2 \alpha} \exp\left(-\frac{\beta}{\alpha}(t-t')\right) \\
 & \times \frac{1}{\pi(t-t')} \exp\left(-\frac{\alpha(x^2+y^2)}{4(t-t')}\right) dt' \\
 & - \int_{t_0}^t \frac{q_0}{k^2 \alpha} \exp\left(-\frac{\beta}{\alpha}(t-t')\right) \\
 & \times \frac{1}{\pi(t-t')} \exp\left(-\frac{\alpha(x^2+y^2)}{4(t-t')}\right) dt'. \quad (15)
 \end{aligned}$$

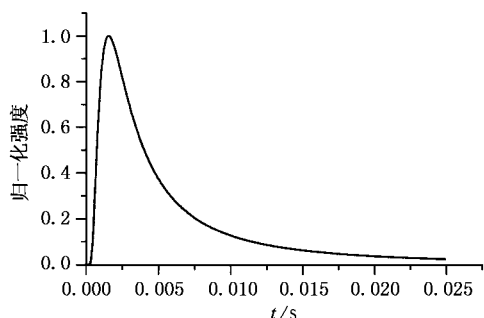


图3 周期性网状结构薄膜的时间特性曲线

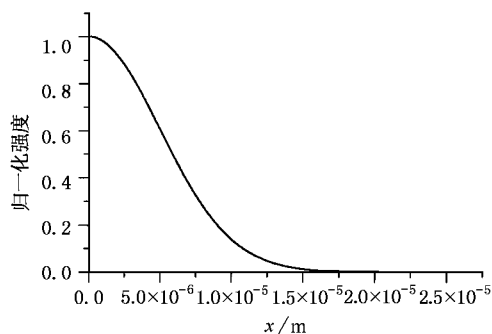


图4 周期性网格结构薄膜的空间分布曲线

利用(15)式进行数值运算,结果如图3和图4.周期性网格结构薄膜的时间常数约为5ms,在点源附近薄膜表面辐射的空间特征长度 Δx 约为 $8\mu\text{m}$.那么,当相邻两个网格单元之间的距离大于 $20\mu\text{m}$ 时,就不会产生热串扰.这时薄膜的空间分辨率只由网格单元的几何尺寸和间隔决定,此时有 $\nu = \frac{1}{l+d}$.其中 ν 为空间分辨率; l 为网格单元长度; d 为网格单元间的距离(l 和 d 的单位都为mm).

根据理论分析我们成功制备出了聚酰亚胺衬底上均匀的金黑薄膜和周期性网格结构的薄膜.周期性网格结构薄膜的几何尺寸为:薄膜尺寸 $\phi 52\text{mm}$,衬底厚度 100nm ,吸收层厚度 $5\mu\text{m}$, $d = 29\mu\text{m}$, $l = 140\mu\text{m}$.根据公式可以计算出薄膜的空间分辨率约

为 $6lp/\text{mm}$,它与薄膜空间特性实验结果的一致性说明我们对理论模型进行的简化是合理的.

3. 实验研究

3.1. 薄膜时间特性的实验研究

薄膜的时间常数是指在受到脉冲光照射后,由薄膜所能达到的最高温度降至其与背景温度之差的 $\frac{1}{e}$ 所需时间,即最大辐射降至其与背景辐射之差的 $\frac{1}{e}$ 所需时间.本文测试了不同热传导薄膜的时间常数.

测量金黑薄膜时间特性的实验装置见图5.脉冲YAG激光器作为激发源,激光波长 $1.064\mu\text{m}$,脉冲宽度 $200\mu\text{s}$,单横模输出,重复频率1Hz.黑体薄膜放置于真空盒中,真空盒两面的窗口分别为玻璃窗口和锗窗口.激光器输出的激光束经过扩束透镜和真空盒的玻璃窗口后,照射到薄膜表面,光斑直径为 20mm .激光能量被薄膜吸收后,薄膜温度上升而产生红外辐射.红外辐射经过真空盒的红外窗口后,由直径 200mm 、焦距 300mm 的球面反射镜聚焦到低温碲镉汞探测器表面.信号经低噪声前置放大器放大,利用示波器观测辐射的时间特性.

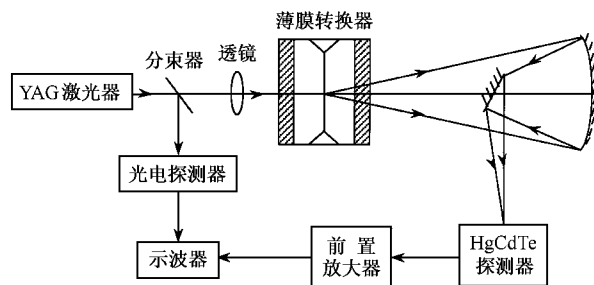


图5 测量金黑薄膜时间特性的实验装置

实验分别测量了均匀金黑薄膜和周期性网格结构金黑薄膜的时间常数,结果如图6和图7所示.图中纵轴为示波器的示数,由于采取负脉冲触发,图中最低点对应的是薄膜辐射最大点,可以看出均匀的金黑薄膜的时间常数为 $t_{\frac{1}{e}} = 2\text{ms}$,周期性网格结构金黑薄膜的时间常数为 $t_{\frac{1}{e}} = 6\text{ms}$.由于理论计算中参数选取与实际制备薄膜各参数有差异,实验值与理论值稍有不同,但是理论分析使我们恰当选取了

介质密度 ρ 、热传导系数 k 和介质定压比热 C_p 等各个参数,从而制备出了符合要求的薄膜.

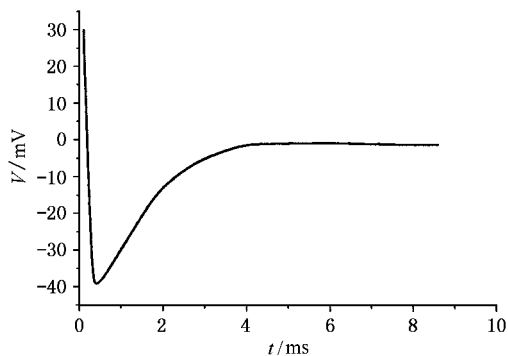


图 6 均匀薄膜的时间特性实验曲线

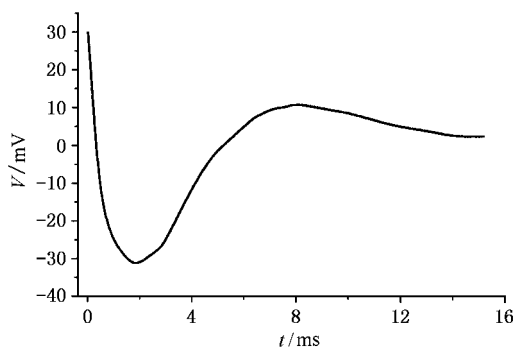


图 7 周期性网格结构薄膜的时间特性实验曲线

3.2. 薄膜空间特性的实验研究

空间分辨率是指转换器的空间分辨能力,用单位长度上可分辨线对数来表示,单位是 lp/mm . 测试空间分辨率的实验装置如图 8. 可见光投影仪将条纹状可见光图像经由光学透镜成像到转换器薄膜上,薄膜辐射出的红外图像被聚焦到单元碲镉汞探测器上,探测器可以随一维平移台沿垂直于条纹的方向平动. 实验测得均匀薄膜的空间分辨率为 $2lp/mm$, 周期性网格结构薄膜的空间分辨率为 $6lp/mm$,

实验结果与理论计算结果一致. 图 9 是热像仪观测到的经周期性网格结构薄膜转换的红外图像. 如果将每一个像元的尺寸减小,可以进一步提高薄膜的空间分辨率.

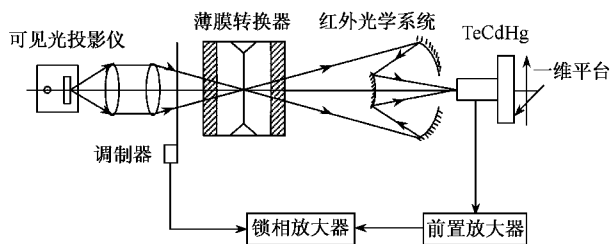


图 8 空间分辨率测试实验装置

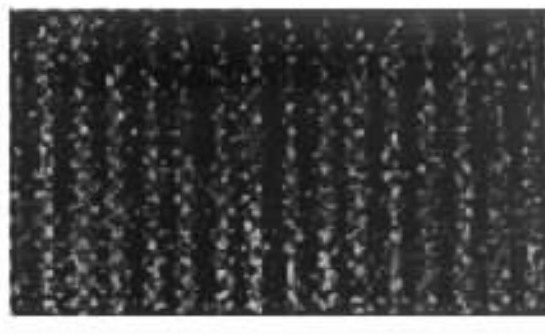


图 9 热像仪观测的红外图像照片

4. 结 论

本文研制了周期性网格结构可见光/红外图像转换薄膜,并对转换薄膜的时间特性和空间特性进行了理论和实验研究. 周期性网格结构薄膜尺寸 $\phi 52mm$, 像元尺寸 $140\mu m \times 140\mu m$, 像元间距 $29\mu m$, 薄膜的时间常数为 $6ms$, 空间分辨率为 $6lp/mm$. 实验证明空间周期性结构明显提高了空间分辨率, 图像转换薄膜所达到的性能指标可以满足红外图像生成系统的需要.

- [1] Driggers R G 1994 *Optical Engineering*, **33**
 [2] Mobley S B 1991 *SPIE* **1486**
 [3] Bly V T 1980 *SPIE* **226**
 [4] Louis Harris, # AD831788R.
 [5] Jiang R Q 1998 *Transient shock effect in thermal conduction, quality*

diffusion and momentum transfer (Science Press) 姜任秋 1998 热传导、质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应(科学出版社)]

- [6] Zhang D M et al 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 914 (in Chinese) 张端明等 2001 物理学报 **50** 914

A membrane for visible-to-infrared transducer^{*}

Yu Xuan-Yi¹⁾ Ding Xin¹⁾ Li Zhuo²⁾ Xu Jing-Jun¹⁾ Zhang Guang-Yin¹⁾

¹⁾ (Photonics Center ,Nankai University ,Tianjin 300071 ,China)

²⁾ (College of Physics ,Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics ,Changchun 130021 ,China)

(Received 5 June 2001 ; revised manuscript received 13 November 2001)

Abstract

A membrane which can be used in visible-to-infrared transducer to test and evaluate thermal-imaging guidance system is developed. The physical and mathematical models to describe the characteristics of the membrane are established. Its time and spatial characteristics are discussed. On the base of the theoretical analysis, a grid-structure membrane is manufactured to improve the resolution of the transducer. The targets that the membrane attained are: membrane size $\phi 52\text{mm}$, image unit size $140\mu\text{m} \times 140\mu\text{m}$, distance between Image unit $29\mu\text{m}$, time constant 6ms , spatial resolution $6lp/\text{mm}$.

Keywords : gold-black , grid-structure , membrane

PACC : 4280Q , 4440 , 6770

^{*} Project supported by the Funds for Outstanding Young Researchers from the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69825108) , and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G1999033003).