

# 周期性微结构对红外场景生成芯片空间分辨率的影响

赵乾<sup>1,2</sup>, 李卓<sup>1,2</sup>, 王欣<sup>1,2\*</sup>, 李德芳<sup>1,2</sup>, 徐立强<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京市精密光电测量仪器与技术重点实验室, 北京 100081

**摘要** 提出了一种通过制作面内微结构来提高红外场景生成芯片空间分辨率的方法。通过建立简化的二维热传导模型, 计算了具有周期性微结构的芯片空间分辨率。通过分析微结构接触面积比及填充因子对红外场景生成芯片空间分辨率的影响, 实现了周期性微结构的优化设计。理论计算表明, 空间分辨率随微结构接触面积比的减小而增大, 随填充因子的增大而增大。考虑到制备精度, 当微结构的接触面积比为 0.18、填充因子为 0.52 时, 芯片在对比度调制传递函数(MTF)值为 0.3 时的空间分辨率为  $10.3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 是无微结构芯片的两倍。实验制备了两种具有不同接触面积比和填充因子的红外场景生成芯片, 芯片直径为 7.62 cm, 厚度约为 800 nm。采用非接触式稳态热成像法对所制作的转换芯片的空间分辨率进行了测量。测量结果表明, 接触面积比为 0.20 和 0.46 的两个微结构芯片在 MTF 值为 0.3 时的空间分辨率分别为  $11.2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$  和  $6.6 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。实验结果与理论计算吻合较好, 说明所提方法是一种实用、有效的空间分辨率优化方法。

**关键词** 薄膜; 红外场景生成; 周期性微结构; 空间分辨率; 红外辐射

中图分类号 TN214

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1031001

## Spatial Resolution of Infrared Scene Projector Chip with Periodical Microstructure

Zhao Qian<sup>1,2</sup>, Li Zhuo<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>1,2\*</sup>, Li Defang<sup>1,2</sup>, Xu Liqiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Lab for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** A method for improving the spatial resolution of an infrared scene projector chip is proposed by making in-plane microstructures. By establishing a simplified two-dimensional heat conduction model, the spatial resolution of the chip with periodical microstructure is calculated. On this basis, the influences of contact area ratio and filling factor of microstructure on the spatial resolution of this infrared scene projector chip are studied and the optimization design of periodical microstructure is realized. The theoretical calculation shows that by fabricating the microstructure with a contact area ratio of 0.18 and a filling factor of 0.52, the spatial resolution can be improved to  $10.3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$  at an MTF of 0.3, twice that of the chip without microstructure. Two kinds of infrared scene projector chips with different contact area ratios and filling factors are fabricated. The diameter of the chip is 7.62 cm and the thickness is about 800 nm. Using the non-contact steady-state infrared imaging method, the spatial resolutions of these two chips are measured. When the MTF value is 0.3, the spatial resolutions of the chips with contact area ratios of 0.20 and 0.46 are  $11.2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$  and  $6.6 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ , respectively. Our experimental results coincide well with those of the theoretical calculation, indicating that the proposed method is effective and practical for spatial resolution improvement.

**Key words** thin films; infrared scene projection; periodical microstructure; spatial resolution; infrared radiation

**OCIS codes** 310.6805; 310.6860; 110.3080

## 1 引言

红外场景生成技术可用于模拟运动目标及背景

的红外辐射特性, 是红外探测设备半实物仿真系统的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>, 其特性对半实物仿真实验系统的可靠性起决定性作用。

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-01-21; 录用日期: 2020-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(61875011)

\* E-mail: wangxin@bit.edu.cn

目前常用的红外场景生成技术主要有电阻阵列、数字微镜器件(DMD)以及微机电系统(MEMS)红外场景生成芯片<sup>[3-4]</sup>。

电阻阵列通过控制流经每一个电阻元的电流来控制电阻微辐射元的辐射强度,从而产生所需的红外场景。由于互补金属氧化物(CMOS)+MEMS的生产工艺要求较高,因此很难实现大阵列规模。国内从事电阻阵列红外场景生成器的研究单位主要是中国科学院上海技术物理研究所,目前公开报道的电阻阵列最大规模为 $256 \times 256$ <sup>[5]</sup>。美国圣巴巴拉红外公司、霍尼韦尔公司研制了一系列电阻阵列器件,产品化器件的空间分辨率为 $1024 \times 1024$ <sup>[6]</sup>。

数字微镜器件是美国德州仪器公司在1987年发明的反射式空间光调制器,90年代美国光科学公司将其应用于红外场景生成,空间分辨率可达 $1980 \times 1024$ <sup>[7-9]</sup>。受限于单个微镜的尺寸,在长波红外波段,由于衍射,图像分辨率小,对比度低,国内尚未有 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的基于数字微镜器件的红外场景生成器研究成功的报道。

MEMS红外场景生成芯片是一种厚度为微米级的大表面尺寸复合薄膜,工作原理基于写入光场调控的自身热辐射。得益于近年来飞速发展的薄膜制备工艺,其具有辐射效率高、辐射波段宽、阵列规模大等优点<sup>[10-12]</sup>。然而, Kurabayashi等<sup>[13-14]</sup>的研究表明,当薄膜的厚度减小到几十或几个微米时,面内热导率会随着薄膜厚度的减小而增加,面内热导率比厚度方向热导率高一个数量级。面内热导率的增大会引起器件相邻单元的热串扰,从而影响芯片的分辨率。

为解决这一问题,本文提出了一种通过制作面内周期性微结构来提高红外场景生成芯片空间分辨率的方法。

## 2 芯片空间分辨率计算原理

### 2.1 理论模型建立

MEMS可见光/红外转换芯片基于热传导理论工作,芯片微结构由衬底、黏合层和吸收/辐射层组成,结构如图1所示,其中PI为聚酰亚胺薄膜。芯片吸收写入光后产生与写入光光场分布相关的温升。当芯片通过热传导和热辐射达到热平衡状态时,红外芯片表面形成稳定的温度场分布。具有稳定温度分布的芯片产生红外辐射场。温度分布及红外辐射场分布由写入光场决定,从而实现从写入光图像到红外图像的转换。

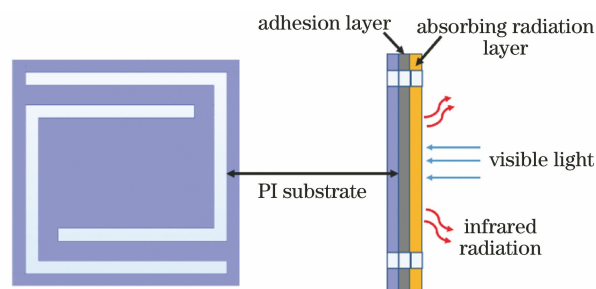


图1 红外场景生成芯片结构图

Fig. 1 Structural diagram of infrared scene projector chip

根据这一工作原理,理想的MEMS芯片应产生与输入光场一致(空间分辨率、灰度等级一致)的红外图像。为描述这一转换过程中的灰度等级及分辨率损失,本文采用刀口稳态热成像法对转换芯片的空间分辨率进行测量。实验装置由写入光刀口图像生成装置(投影计算机及光学投影仪),真空腔,真空机组,被测芯片,红外辐射场采集装置(测温红外热像仪)及数据采集计算机组成,原理框图如图2所示。

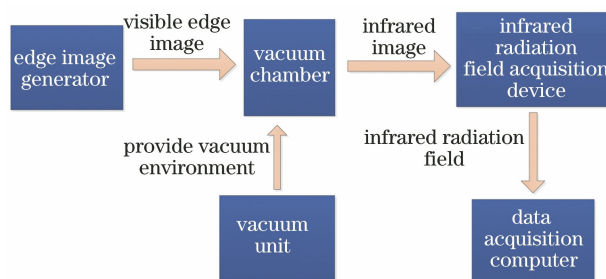


图2 空间分辨率测量原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of spatial resolution measurement

投影计算机与光学投影仪为测试提供刀口写入光场。刀口图形经真空腔的写入光窗口投影至被测芯片表面,芯片吸收写入光后产生与写入光场分布相关的温升。具有稳定温度分布的芯片产生红外辐射场,红外辐射场经过真空腔的红外窗口后被热像仪采集。通过调整投影仪的亮度或刀口图像的灰度,可以改变刀口加热区的写入光强度,进而控制红外芯片的温升。真空腔为芯片提供真空测试环境,芯片被固定在真空腔中,芯片表面与真空腔窗口平行。腔内的真空度由真空机组控制,芯片的表面红外辐射场由红外测温热像仪采集。利用热像仪分析软件处理采集的红外图像,得到芯片表面的红外辐射强度分布。

由于芯片的面内尺寸比厚度大4个数量级,因此可认为当薄膜被加热至稳态时,厚度方向不存在温度梯度,而面内将形成图3所示的温度分布。

以刀口图像中心作为原点,如图3所示。当刀

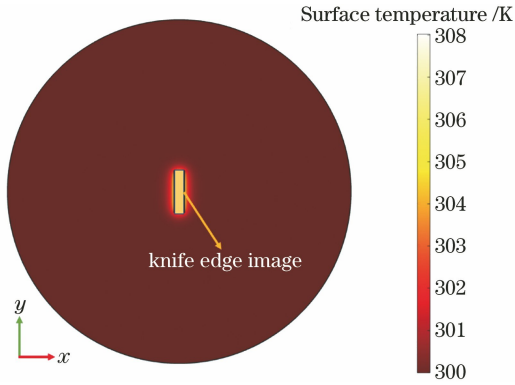


图 3 芯片面内温度分布示意图

Fig. 3 Temperature distribution in chip plane

口图像的长宽比较大时,  $y = 0$  附近区域的温度  $T$  在  $y$  方向的梯度很小, 如图 4 所示。

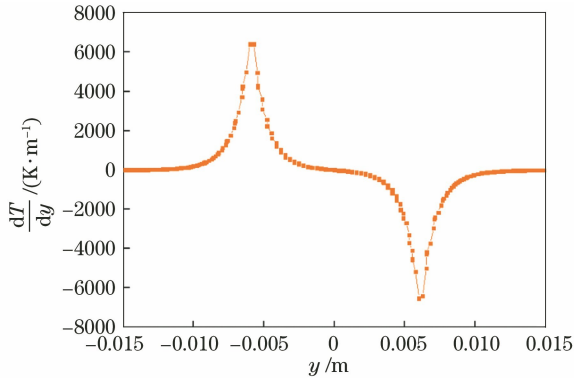


图 4  $y$  方向温度梯度

Fig. 4 Temperature gradient in  $y$ -direction

因此, 可近似认为, 在  $y = 0$  附近区域, 沿  $y$  方向不存在温度梯度。当芯片处于高真空环境中时, 空气热对流引起的热损耗可忽略。此时, 可在  $y = 0$  附近区域建立近似一维的传热模型以描述芯片沿  $x$  轴方向的温度分布。

根据以上假设, 对具有面内微结构的芯片的  $x$  方向空间分辨率计算模型作如下简化:  $y$  方向仅有 2 个周期性微结构, 而  $x$  方向有 200 个周期性微结构的阵列。在稳态下, 若芯片的温度扩散距离远小于芯片直径, 则芯片的边缘温度为环境温度。因此, 仿真时  $x$  方向的边缘可设置为温度已知(为环境温度), 而  $y$  方向的边缘设置为绝热边界, 如图 5 所示。中心  $2 \times 60$  个周期性微结构区域为刀口图像加载区域。

这种准一维简化模型有效减小了仿真区域尺寸, 可大大降低计算量。当需要计算  $y$  方向面内温度分布时, 仅需将阵列调整为  $y$  方向有 200 个周期性微结构、 $x$  方向有 2 个周期性微结构即可。

得到芯片表面的稳态温度分布后, 红外辐射场

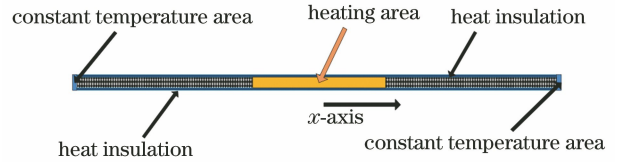


图 5 具有周期性微结构的 MEMS 芯片的温度分布计算模型  
Fig. 5 Temperature distribution calculation model of MEMS chip with periodical microstructure

分布表示为

$$E_{\text{rad}}(x) = \sigma \epsilon T^4(x), \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{rad}}(x)$  为辐射强度分布;  $\sigma$  为斯忒藩-玻尔兹曼常数;  $\epsilon$  为芯片表面发射率;  $T(x)$  为温度分布。

由此得到的稳态时沿  $x$  方向的辐射强度分布如图 6 所示。

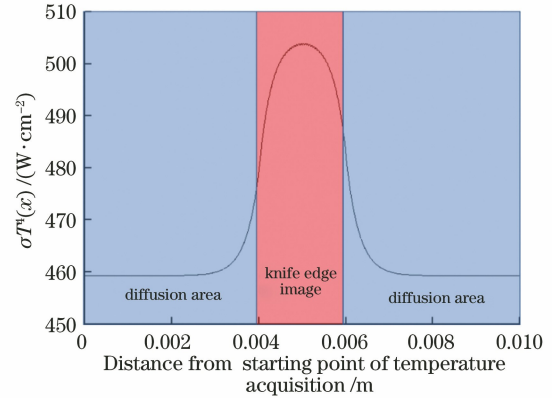


图 6 沿  $x$  方向的辐射强度分布

Fig. 6 Distribution of radiation intensity along  $x$ -direction

对辐射强度分布曲线进行差分及离散傅里叶变换, 即可得到对比度调制传递函数 (MTF) 曲线<sup>[15]</sup>, 过程如图 7 所示, 其中  $\Delta x$  为相邻两点之间的位置差,  $\Delta y$  为辐射强度变化量,  $L(x)$  为对辐射强度分布曲线取差分后得到的线扩散函数,  $H(f)$  为对线扩散函数  $L(x)$  进行傅里叶变换后得到的结

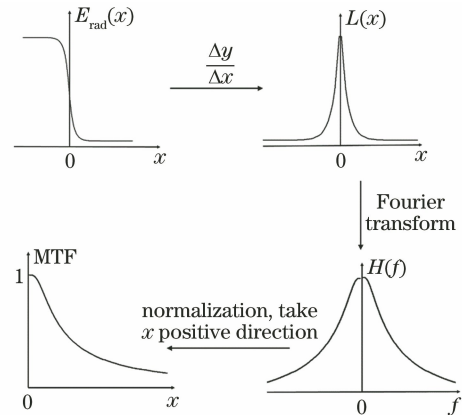


图 7 MTF 曲线的计算过程

Fig. 7 Process diagram of MTF curve calculation

果,  $f$  为频率。

### 2.2 周期性微结构的影响分析

考虑到制备的便利性,微结构被设计为呈周期性分布的图形单元。为了描述图形单元的几何特征,选用了接触面积比和填充因子两个参数。接触面积比为微结构与图像单元边框接触的横截面积与图像单元边框横截面积的比值。如图 8 所示,当图像单元为边长为  $a$  的正方形,单元内微结构宽度为  $w$  时,接触面积比定义为

$$\eta = \frac{(\omega + 2h)d}{ad} \times 100\% = \frac{(\omega + 2h)}{a} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $h$  为边框宽度;  $d$  为芯片厚度。

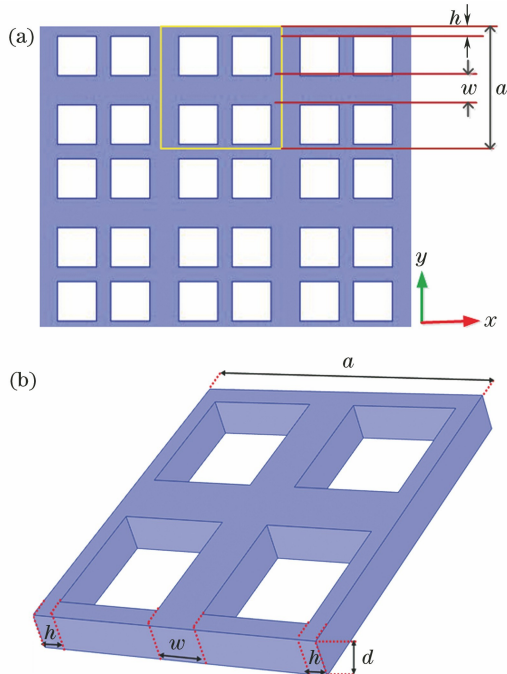


图 8 用于接触面积比分析的微结构示意图。

(a) 微结构平面图; (b) 微结构立体图

Fig. 8 Schematic of microstructure used for contact area ratio analysis. (a) 2D diagram of microstructure; (b) 3D diagram of microstructure

在对不同微结构芯片进行有限元仿真时,材料发射率设置为 0.5,热导率为  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。环境温度及初始温度均设置为 300 K。设定芯片厚度为 500 nm,正方形边长为  $50 \mu\text{m}$ 。通过改变微结构宽度  $w$ ,实现对接触面积比的调整。

根据所建立模型计算得到了不同接触面积比时芯片沿  $x$  方向的辐射强度分布曲线,如图 9 所示。

由图 9 可见,当接触面积比减小时,芯片的辐射强度由最大值点降低至  $\frac{1}{e}$ ,所传导的距离略微变短。

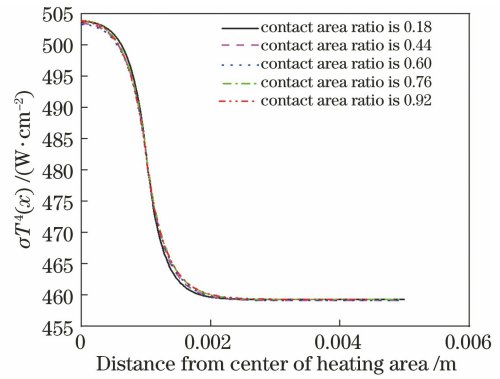


图 9 不同接触面积比时芯片表面沿  $x$  方向的辐射强度分布  
Fig. 9 Thermal radiation intensity distributions along  $x$ -direction of chips with different contact area ratios

对辐射强度分布进行差分及傅里叶变换并取其模的正半轴,得到具有不同接触面积比的周期性微结构芯片的 MTF 曲线,如图 10 所示。

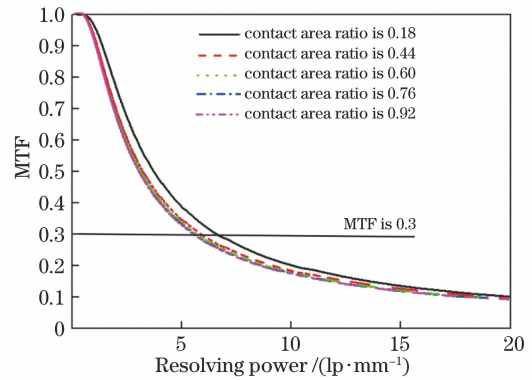


图 10 具有不同接触面积比的周期性微结构芯片的 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curves of microstructured chips with different contact area ratios

由图 10 可见,随着微结构芯片接触面积比的增大,空间分辨率增大。当接触面积比从 0.92 降低到 0.18 时,MTF 值为 0.3 处的空间分辨率从  $5.4 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$  提高至  $6.6 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

虽然利用小的接触面积比可获得高的空间分辨率,但是对于图 8 所示的微结构单元,小的接触面积比将导致小的有效红外辐射区域,从而影响芯片的辐射效率。为了在芯片接触面积比较小时获得高的红外辐射功率,设计了具有不同填充因子的芯片微结构,如图 11 所示。

填充因子定义为

$$f = \frac{A_p}{A_c} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:  $A_p$  为微结构材料区域表面积;  $A_c$  为周期性微结构单元面积。对于图 11 所示结构,通过调整周期



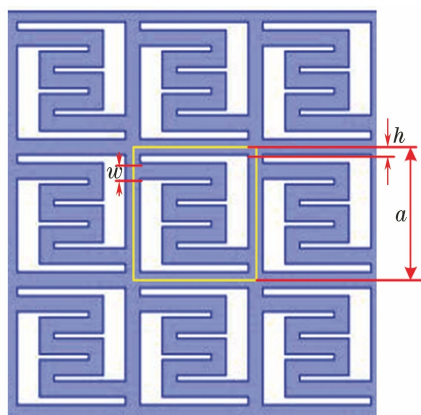


图 11 用于填充因子分析的微结构示意图

Fig. 11 Schematic of microstructure used for filling factor analysis

性图形中单个单元的线条总长度来改变填充因子, 而微结构宽度  $w$  设置为定值, 即接触面积比恒定为 0.18。不同填充因子情况下的芯片辐射强度分布如图 12 所示。

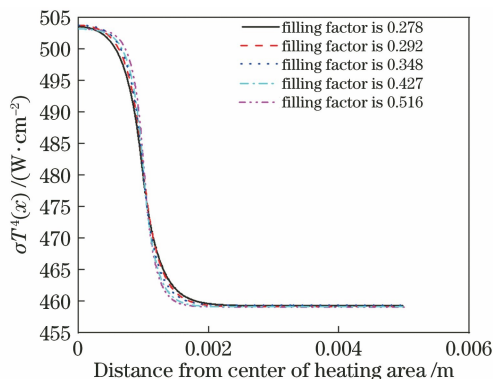


图 12 具有不同填充因子的微结构芯片的辐射强度分布

Fig. 12 Thermal radiation intensity distributions of microstructured chips with different filling factors

进而计算得到图 13 所示的具有不同填充因子的微结构芯片的 MTF 曲线。

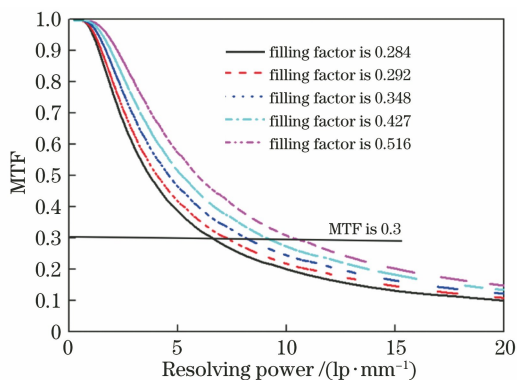


图 13 具有不同填充因子的微结构芯片的 MTF 曲线

Fig. 13 MTF curves of microstructured chips with different filling factors

由图 13 可见, 当接触面积比不变时, 芯片的空间分辨率随着填充因子的增大而增大。当填充因子从 0.28 增大到 0.52 时, 芯片在 MTF 值为 0.3 处的分辨率从  $6.4 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$  增大到  $10.3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。因此在保证接触面积比不变的情况下, 可通过增大填充因子来提高红外场景生成芯片的空间分辨率。

由此可见, 通过制作具有不同接触面积比和不同填充因子的周期性微结构, 可实现对红外场景生成芯片空间分辨率的调控。为了保证芯片的高空间分辨率, 需要微结构具有高的填充因子与低的接触面积比。

### 3 红外场景生成芯片的空间分辨率测量

#### 3.1 MEMS 芯片样品的制备

为了验证理论计算的准确性, 实验制备了无面内结构的红外场景生成芯片和两种具有不同接触面积比和不同填充因子的面内周期性微结构红外场景生成芯片。具有面内微结构的红外场景生成芯片样品通过旋涂法及光刻法制备, 光刻和反应离子刻蚀工艺的图案制备精度为  $2 \mu\text{m}$ 。实验制备的芯片周期性微结构及具体尺寸如图 14 所示。

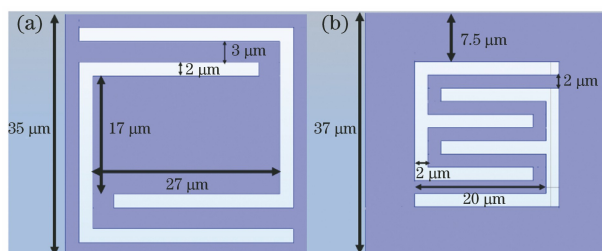


图 14 红外场景生成芯片的周期性面内微结构示意图。

(a) 接触面积比为 0.20; (b) 接触面积比为 0.46

Fig. 14 In-plane microstructures of infrared scene projector chips. (a) Contact area ratio of 0.20; (b) contact area ratio of 0.46

以 100 晶向的 N 型硅片作为衬底制作红外场景生成芯片样品。硅片直径为 100 mm, 厚度为  $500 \mu\text{m}$ 。为实现自悬浮红外场景生成芯片的制备, 在硅片表面制作了 300 nm 厚的氧化硅并将其作为牺牲层。红外场景生成芯片的旋涂选用了非光敏型聚酰亚胺溶液, 黏度为  $350 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。旋涂设备为 Labpin 6TT 型匀胶机。预旋涂转速为 800 r/min, 旋涂时间为 60 s。正式旋涂转速为  $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 旋涂时间为 180 s。旋涂完成后, 采用热处理使芯片固化并亚胺化, 形成聚酰亚胺基底。经过热处理的

样品需要根据所设计的微结构进行光刻,实现掩模版图案到光刻胶图案的转移。光刻胶层到聚酰亚胺层的图案转移采用反应离子刻蚀(RIE)工艺完成。刻蚀结束后,对剩余的光刻胶进行去胶处理,完成微结构制作。为了释放薄膜的内应力,微结构图形制作完成后对样品进行了退火处理。最后采用 HF 缓冲液与衬底牺牲层反应,使薄膜从硅片上脱离。脱离下来的薄膜被转移到托圈上并被固定,之后采用电阻蒸发工艺制备金属黑光学吸收层<sup>[16]</sup>。图 15 为红外场景生成芯片样品实物图。

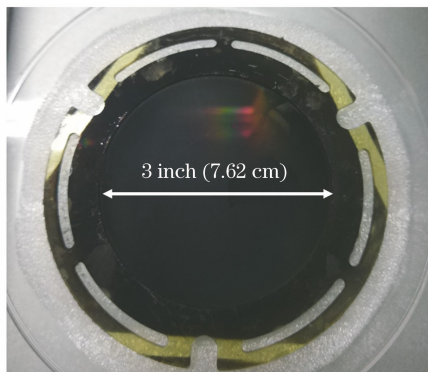


图 15 红外场景生成芯片样品照片

Fig. 15 Sample photo of infrared scene projector chip

采用显微镜对制备的芯片样品的周期性微结构进行了观察,如图 16 所示。

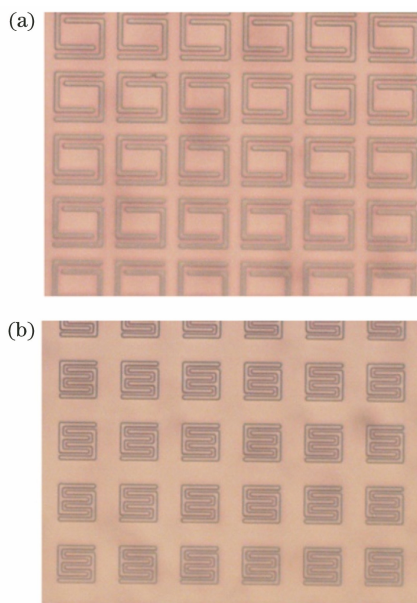


图 16 周期性微结构的显微镜图像。(a)接触面积比为 0.2;  
(b)接触面积比为 0.46

Fig. 16 Microscope images of periodical microstructure.

(a) Contact area ratio of 0.2; (b) contact area ratio of 0.46

### 3.2 空间分辨率测量实验装置

使用图 17 所示的实验装置对芯片的辐射强度分布进行了测量,并利用前节所述理论进行了 MTF 计算。

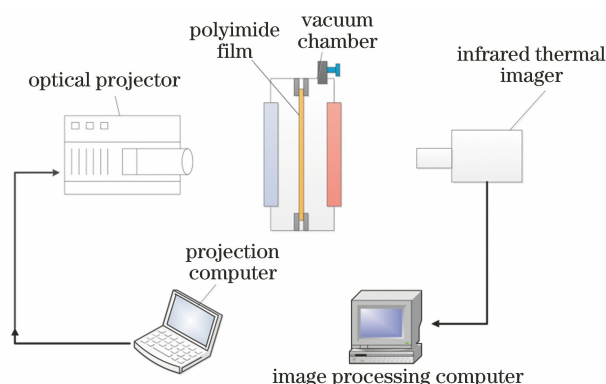


图 17 空间分辨率测量实验装置图

Fig. 17 Experimental device diagram of spatial resolution measurement

投影仪为芯片提供写入光刀口图像。投影仪的分辨率为  $1024 \times 768$ , 像元尺寸为  $31.25 \mu\text{m}$ 。刀口图像背景为全黑,而中间  $64 \times 128$  个像元为全白。刀口图像经真空腔的可见光窗口成像在芯片上。利用红外热像仪采集芯片表面温度分布。红外热像仪采用 Vario CAM HD head 系列固定式长波红外热像仪,工作波段为  $7.5 \sim 14.0 \mu\text{m}$ , 像元间距为  $25 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $640 \times 480$ ,测温分辨率为  $\pm 0.015 \text{ K}$ 。使用垂轴放大率为  $1 \times$  的显微镜采集被测芯片的辐射红外图像,所采集的红外图像的总尺寸为  $16 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。利用热像仪分析软件处理所采集的红外图像,得到芯片表面的等效黑体温度分布,根据(1)式计算可得到芯片表面的辐射强度分布。对辐射强度分布进行计算即可得到红外场景生成芯片的 MTF 曲线。

### 3.3 测量结果

当红外热像仪发射率设置为 1 时,采集得到的芯片表面红外辐射分布图与沿  $x$  轴方向温度分布曲线分别如图 18(a)、(b)所示。为了减小噪声干扰,选择了四条采集线来对温度分布曲线作平均处理。

取加热图案中心为原点,得到两个芯片样品沿  $x$  轴方向的辐射强度分布曲线,如图 19 所示,其中  $T_{in}^4(x)$  为发射率设置为 1 时红外热像仪采集到的等效黑体温度分布的四次方。

对辐射强度分布曲线进行计算,得到 MTF 曲线,如图 20 所示。

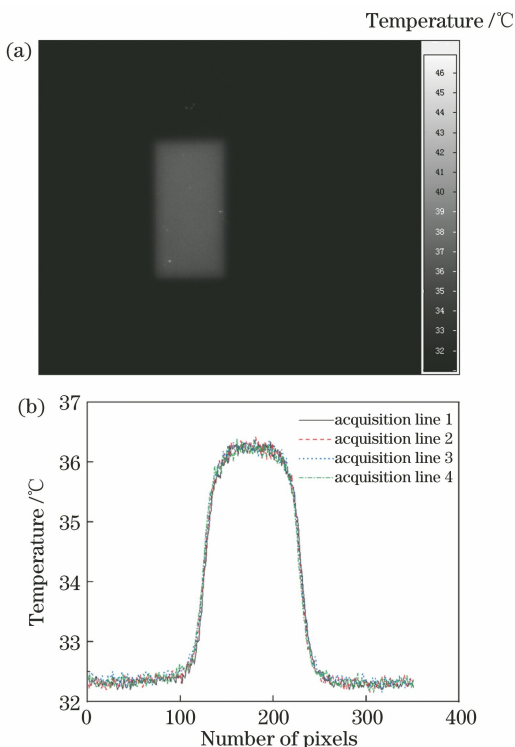


图 18 红外热像仪采集到的结果。(a)芯片表面辐射分布图;(b)沿  $x$  轴方向的温度分布曲线  
Fig. 18 Measurement results obtained by infrared thermal imager. (a) Thermal radiation intensity distribution on chip surface; (b) temperature distribution along  $x$ -direction

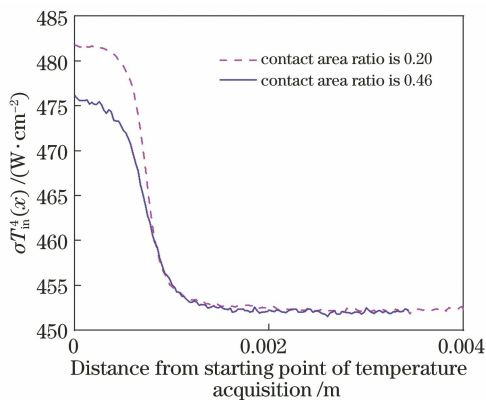


图 19 两个芯片样品沿  $x$  轴方向的辐射强度分布曲线  
Fig. 19 Radiation intensity distribution curves along  $x$ -axis of two chip samples

由图 20 可见,接触面积比为 0.46 的周期性微结构芯片在 MTF 值为 0.3 处的空间分辨率为  $6.6 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,而接触面积比为 0.2 的周期性微结构芯片的空间分辨率为  $11.2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。同时,对实验制备的两个样品以及无微结构芯片的空间分辨率进行了理论计算。计算中,环境温度及初始温度设定为 300 K,环境压强设定为  $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ,芯片厚

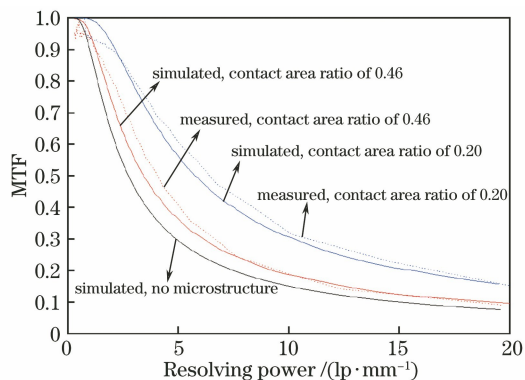


图 20 两个红外场景生成芯片样品的 MTF 曲线  
Fig. 20 MTF curves of two infrared scene projector chip samples

度设定为 800 nm,材料热导率设定为 0.38,发射率设定为 0.22。由图 20 可见,实验测量的 MTF 曲线与理论计算得到的 MTF 曲线吻合较好,证明了理论分析的正确性和所提方法的有效性。

## 4 结 论

根据 MEMS 红外场景生成芯片的工作原理及稳态热成像法的空间分辨率测量原理,建立了简化的二维热传导模型,计算了具有周期性微结构的红外场景生成芯片的空间分辨率。研究了周期性微结构的接触面积比及填充因子对红外场景生成芯片空间分辨率的影响。在此基础上,提出了通过设计和制备面内周期性微结构以提高红外场景生成芯片空间分辨率的方法。理论计算结果表明,当周期性微结构的接触面积比为 0.18、填充因子为 0.52 时,芯片在 MTF 值为 0.3 处的空间分辨率可达到  $10.3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。实验制备了两种具有不同接触面积比和不同填充因子的红外场景生成芯片样品。芯片直径为 7.62 cm,厚度约为 800 nm。采用刀口热稳态测量法测得接触面积比为 0.46 的周期性微结构芯片在 MTF 值为 0.3 处的空间分辨率为  $6.6 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,而接触面积比为 0.2 的周期性微结构芯片在 MTF 值为 0.3 处的分辨率可提高至  $11.2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。理论计算结果及实验测量结果均表明,通过制作微结构可有效提高红外场景生成芯片的空间分辨率,该方法在红外场景生成芯片的应用方面有着深远的意义。

## 参 考 文 献

[1] Li Z, Zhou L, Liu D, et al. Wide-band dynamic infrared scene generation technology [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(4): 31-36, 70.

- 李卓, 周朗, 刘丹, 等. 宽波段动态红外场景生成技术[J]. 上海航天, 2019, 36(4): 31-36, 70.
- [2] Li Z, Qian L X, Ou W. New technologies of infrared scene projection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 1-6.  
李卓, 钱丽勋, 欧文. 动态红外场景生成新技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 1-6.
- [3] Shi R, Xu C, Xu R, et al. Infrared dynamic scenes generating technique based on MEMS[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 67-71.  
施蕊, 徐畅, 徐锐, 等. 基于 MEMS 的红外动态图像生成技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 67-71.
- [4] Yang Y, Nuo S, Zhou L, et al. A light down conversion infrared scene projector[J]. SPIE, 2015, 9677: 967708.
- [5] Ma B, Cheng Z X, Zhai H M, et al. Development of domestic resistive arrays technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2314-2322, 2327.  
马斌, 程正喜, 翟厚明, 等. 国产电阻阵列技术的发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2314-2322, 2327.
- [6] Tom D, Greg F, Nicholas H, et al. Achieving ultra-high temperatures with a resistive emitter array[J]. SPIE, 2016, 9820: 98200Z.
- [7] Han Q, Zhang J, Wang J, et al. Diffraction analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 8016-8021.
- [8] 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.
- [9] Julia R, David J, Robert V, et al. Two-band DMD-based infrared scene simulator [J]. SPIE, 2010, 7663: 766302.
- [10] Zhang L, Tian Y, Li Q. Research status and prospect of dynamic infrared scene projector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1423-1431.  
张励, 田义, 李奇. 动态红外场景投影器的研究现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1423-1431.
- [11] Li Z. Characteristics of visible to infrared transducer films for dynamic image simulation [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4): 473-476.  
李卓. 可见光/红外动态图像转换薄膜性质的研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 473-476.
- [12] Li P, Li Z. Conceptual research on the dynamic IR scenegeneration [J]. Optical Technique, 2006, 32(S1): 525-527.  
李平, 李卓. 红外动态图像生成技术概念研究[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 525-527.
- [13] Kurabayashi K, Asheghi M, Touzelbaev M, et al. Measurement of the thermal conductivity anisotropy in polyimide films [ J ]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1999, 8(2): 180-191.
- [14] Wolf A, Pohl P, Brendel R. Thermophysical analysis of thin films by lock-in thermography[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(11): 6306-6312.
- [15] Chen Q Y, Wang H J, Wang X, et al. Estimation of the spatial resolution of infrared scene generator[J]. Optical Technique, 2015, 41(1): 85-88.  
陈倩祎, 王宏杰, 王欣, 等. 红外动态场景生成装置空间分辨率的测试[J]. 光学技术, 2015, 41(1): 85-88.
- [16] Luo Y Y, Zhu X F. Effects of thermal evaporation and electron beam evaporation on two-dimensional patterned Ag nanostructure during nanosphere lithography[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 086104.  
罗银燕, 朱贤方. 电阻热蒸发镀膜与电子束蒸发镀膜对纳米球刻蚀方法制备二维银纳米阵列结构的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 086104.