

# 金属框结构对碲镉汞红外焦平面调制传递函数的影响

张瞳<sup>1,2</sup>, 林春<sup>1</sup>, 陈洪雷<sup>1</sup>, 孙常鸿<sup>1</sup>, 林加木<sup>1</sup>, 王溪<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 调制传递函数(MTF)值是表征碲镉汞(HgCdTe)红外探测器成像性能的重要参数。串音是减小探测器 MTF 值的主要因素之一。合理的器件结构设计可有效地抑制串音,从而提高器件 MTF 值。介绍了一种含金属框结构的 HgCdTe 红外焦平面探测器,该器件可有效吸收横向扩散光生载流子并减小器件的串音干扰。对含金属框结构的器件和无金属框结构的器件进行 MTF 测试及对比分析。测试结果表明,与无金属框结构的器件相比,含金属框结构的器件的 MTF 值得到显著提高。

**关键词** 探测器; 调制传递函数; 红外焦平面; 金属框; 串音

中图分类号 TN215

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0504001

## Influence of Metal Frame Structure on Modulation Transfer Function of HgCdTe Infrared Focal Plane

Zhang Tong<sup>1,2</sup>, Lin Chun<sup>1</sup>, Chen Honglei<sup>1</sup>, Sun Changhong<sup>1</sup>, Lin Jiamu<sup>1</sup>, Wang Xi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Modulation transfer function (MTF) value is an important parameter to characterize the imaging performance of mercury cadmium telluride (HgCdTe) infrared detector. Crosstalk is one of the major factors which degrade the MTF value of detector. The reasonable device structure design can effectively suppress crosstalk and improve the MTF value of the device. A HgCdTe infrared focal plane detector with metal frame structure is proposed, which can effectively absorb laterally diffused photo-carriers and suppress crosstalk. We also carry out measurement and analysis of the MTF of the detectors with and without metal frame structure. The experimental results indicate that, compared with the detector without metal frame structure, the detector with metal frame structure can effectively increase MTF value of detector.

**Key words** detectors; modulation transfer function; infrared focal plane; metal frame; crosstalk

**OCIS codes** 040.1240; 040.3060; 040.5160

## 1 引 言

碲镉汞(HgCdTe)红外探测器<sup>[1-3]</sup>具有量子效率高、波长覆盖范围广和响应率高等特点,广泛应用于航空、勘探、军事等红外光电成像领域。调制传递函数(MTF)能够真实地反映出红外探测器的空间分辨率和成像质量的优劣,可表示频率域中信号频率分量经过光学成像系统后在空间截止频率范围内

的衰减程度。MTF 已经逐渐成为衡量红外探测器成像性能的重要指标。串音<sup>[3-4]</sup>是造成探测器 MTF 值减小的主要原因之一。由载流子横向扩散/漂移到相邻光敏元形成的串音,会使探测器的 MTF 值减小、成像质量退化。而串音与器件的结构关联紧密,合理的结构设计可以有效减小电学串音的干扰。针对 HgCdTe 红外探测器设计了一种环绕像元的金属框结构,以对串音进行抑制,并将所设计结构与

收稿日期: 2017-10-24; 收到修改稿日期: 2017-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(61705247)

作者简介: 张瞳(1981—),男,博士研究生,主要从事红外探测器方面的研究。E-mail: 4340426@qq.com

导师简介: 林春(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事半导体光电子器件物理方面的研究。

E-mail: chun\_lin@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

无金属框结构进行 MTF 测试及对对比分析。MTF 测试实验表明,含金属框结构的探测器能够有效抑制电学串音。

## 2 金属框器件结构

串音主要由光学串音和电学串音组成,其中主要成分是电学串音。串音的存在会使红外器件的 MTF 值减小。串音表现为:在器件内,当某个特定光敏元被入射光照射时,与之相邻的未被照射的光敏元有电信号输出。串音的本质是光照射产生的光生载流子横向扩散到相邻的光敏元区域,并被相邻像元吸收。针对光生载流子的横向扩散,设计了一种光敏元加金属框的结构<sup>[5-6]</sup>,以对横向扩散载流子进行有效吸收。相隔离的像元可减小光生载流子的横向扩散和电学串音的干扰。器件俯视结构如图 1 所示。

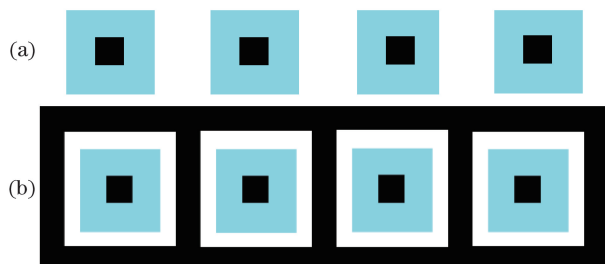


图 1 器件俯视图。(a)无金属框结构;(b)有金属框结构  
Fig. 1 Top views of devices. (a) Without metal frame;  
(b) with metal frame

如图 1 所示,所采用的两种结构的器件均为由液相外延法生长非本征 P 型 HgCdTe 通过离子注入形成的背照式 N-on-P 型结构。器件的制备步骤为:1)清洗和腐蚀材料表面,再生长硫化锌(ZnS)阻挡层以减小材料表面损伤;2)经过光刻后在材料表面形成图形,在图形区域进行离子注入,以形成结区,该过程主要是将 B<sup>+</sup> 离子注入到 P 型材料使其表面反型,从而形成 N-on-P 平面结;3)经过 ZnS 和碲化镉(CdTe)的双层钝化工艺、金属电极的制备和钢柱与读出电路的互联,完成器件的制备。图 1(a)为无金属框结构,图 1(b)中的黑色框为设计的金属框结构,其环绕在像元四周并连接到电路公共电极端,起到像元隔离及吸收载流子的作用。两种器件的剖面图如图 2 所示。

如图 2 所示,2 种结构均是由 3 种材料在碲锌镉(CdZnTe)衬底<sup>[7]</sup>上生成的。前 2 层分别是厚度为  $2.2 \times 10^{-7}$  m 的 ZnS 钝化层和厚度为  $1.2 \times 10^{-7}$  m 的 CdTe 钝化层,第 3 层由厚度为  $1 \mu\text{m}$  的 N-HgCdTe

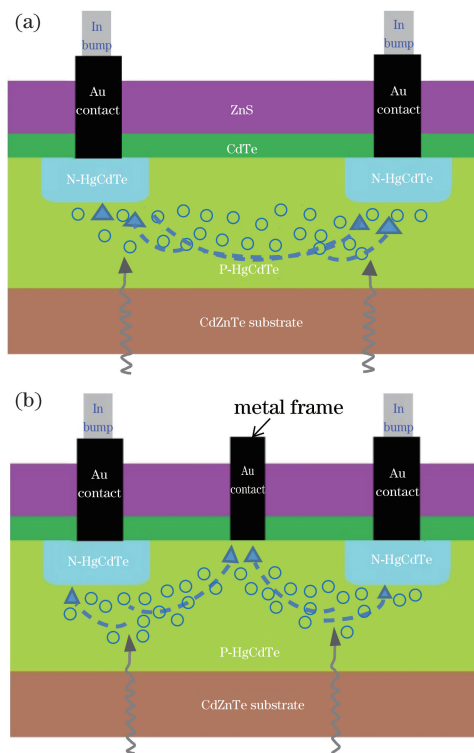


图 2 器件剖面图。(a)无金属框结构;(b)有金属框结构  
Fig. 2 Cross-sectional drawing of devices.  
(a) Without metal frame; (b) with metal frame

和厚度为  $7 \mu\text{m}$  的 P-HgCdTe 组成,第 4 层是厚度为  $350 \mu\text{m}$  的 CdZnTe 衬底。PN 结区的大小为  $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ 。金属框结构的 PN 结边缘距金属框的距离为  $9 \mu\text{m}$ ,金属框宽度为  $10 \mu\text{m}$ ,且金属框与电路公共电极连接。如图 2(a)所示,入射光产生的光生载流子会被距离较近的 PN 结所吸收,但是在横向扩散效应下,在某光敏元附近产生的部分光生载流子会通过横向扩散被其相邻的光敏元吸收,这种电学串音的现象造成了器件 MTF 值的减小。为了有效抑制电学串音的干扰,如图 2(b)所示,在器件光敏元四周采用金属框的环绕结构,此时横向扩散的部分光生载流子会被位于 2 个相邻像元中间的金属框所吸收,从而有效地减少了横向漂移到相邻像元的载流子数目,起到了抑制电学串音的作用。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 测试条件及器件非均匀性测试

选用两款背照式中波线列 HgCdTe 红外探测器。两款器件的结构分别为有金属框结构和无金属框结构。像元尺寸为  $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ ,像元中心间距为  $56 \mu\text{m}$ ,探测器的响应截止波长为  $4.6 \mu\text{m}$ 。像元规格为  $512 \times 1$ ,成一字型排列。测试使用了焦距为  $120 \text{mm}$ 、F 数为 2 的中波红外镜头。测试系统采

用以色列 CI 系统公司的平行光管进行靶标辐射,光源采用 800 °C 黑体,靶标为半月型刀口。将探测器封装在杜瓦中,并将其安装在三维移动平台上。数据采集部分使用美国国家仪器公司的数据采集卡,采用 Labview 编程实现对数据的显示及处理。参考 GB/T 17444-2013 对两款不同结构的器件进行响应率的非均匀性计算。响应率的非均匀性可表示为

$$N_{UR} = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{MN - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i,j) - \bar{R}]^2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中  $M$  为像元的总行数;  $N$  为像元的总列数;  $d$  为无响应的盲元;  $h$  为过热像元;  $\bar{R}$  为除去盲元后的平均响应率;  $R(i, j)$  为像元响应率,可表示为

$$R(i, j) = \frac{V_s(i, j)}{P}, \quad (2)$$

式中  $V_s(i, j)$  为像元响应电压;  $P$  为在黑体温度分别为  $T$  和  $T_0$  辐照条件下,入射到像元的辐照功率差值,其计算公式为

$$P = \frac{\sigma(T^4 - T_0^4)A_D}{4(L/D)^2 + n}, \quad (3)$$

式中  $\sigma$  为 Stefan 常数,  $D$  为面源黑体的冷屏圆孔径,  $A_D$  为焦平面像元面积,  $L$  为冷屏孔面至焦平面像元之间的垂直距离,  $n$  取 1 或 0。

经计算可得,有、无金属框结构响应率的非均匀性分别为 8.12% 和 11.64%。金属框结构将光敏元的吸收区域限制在金属框包围的范围之内,使得各像元的响应均匀性较无金属框结构有较为明显的提升。

### 3.2 MTF 测试结果及分析

对上述 2 种结构的 HgCdTe 红外探测器分别使用倾斜刃边法<sup>[8-10]</sup>进行 MTF 测试。首先使用粗调旋钮使器件对从平行光管出来的靶标图像产生响应,再微调聚焦旋钮使输出值最大时探测器处于镜头焦面上,继续调节探测器的响应位置,寻找刀口刃边位置,直到出现所需阶跃曲线并采集 100 帧数据。两种结构的边缘扩散函数(ESF)曲线如图 3 所示。

在测试器件的 MTF 之前,使用两点矫正法对两种器件进行矫正。如图 3(a)所示,无金属框结构的 ESF 曲线的底部和顶部上升处变化较为缓慢,呈现出的刃边曲线与图 3(b)中曲线相比明显不够锐利,这是由于无金属框结构器件的像元响应一致性比金属框结构的差,并且无金属框结构器件的像元受到的串音干扰较为明显。通过对比可以发现,金

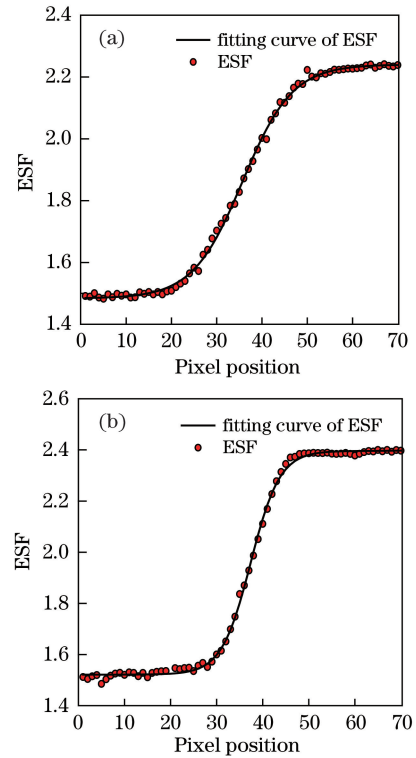


图 3 器件的 ESF 曲线图。(a)无金属框结构; (b)有金属框结构

Fig. 3 ESF curves of devices. (a) Without metal frame; (b) with metal frame

属框结构对来自相邻像元区域的横向扩散载流子有明显的吸收作用。在曲线拟合时,采用与 ESF 曲线形状相似的 3 个费密函数<sup>[11]</sup>进行拟合,拟合公式为

$$F(x) = D + \sum_{i=0}^2 \frac{a_i}{\exp[(x - b_i)/c_i] + 1}, \quad (4)$$

式中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 、 $D$  都为常量。对 ESF 曲线进行有限微分,得到线扩散函数(LSF)曲线的表达式为

$$f_{LSF} = \left| \frac{dF(x)}{dx} \right| = \left| \sum_{i=0}^2 \frac{a_i \exp[(x - b_i)/c_i]}{c_i \{ \exp[(x - b_i)/c_i] + 1 \}^2} \right|. \quad (5)$$

LSF 曲线如图 4 所示。MTF 曲线<sup>[12-13]</sup>如图 5 所示,MTF 曲线是通过求取 LSF 傅里叶变换的模值得到的<sup>[14]</sup>。为了得到更加准确的器件 MTF 值,在傅里叶变换过程中仅对信号采取加方窗计算。

已知测试所用的红外中波镜头在器件 Nyquist 频率处的 MTF 值约为 0.8,计算时需将所测量的 MTF 值除去镜头的 MTF 值,对两种结构分别在 293, 303, 308 K 的黑体温度下进行测试,其 MTF 曲线如图 5 所示。根据 56  $\mu\text{m}$  的像元中心距,可计算出像元空间截止频率为 17.8  $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,对应的 Nyquist 频率为 8.9  $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。从 MTF 曲线的空间频率坐标可以看出,有金属框结构的器件的 MTF

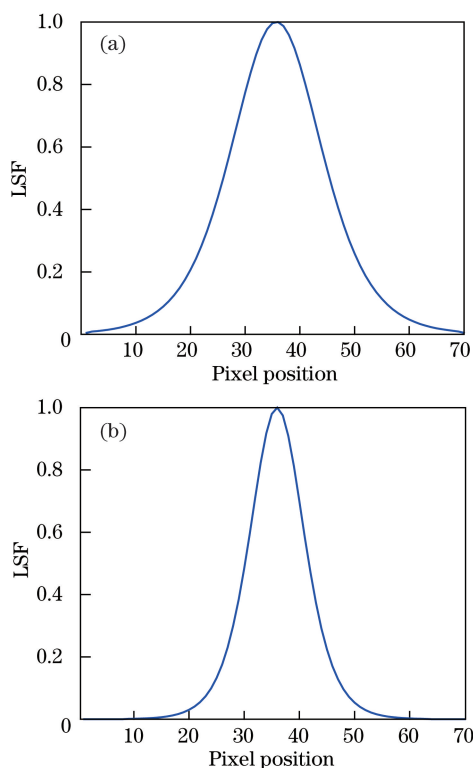


图4 器件的 LSF 曲线图。(a)无金属框结构;  
(b)有金属框结构

Fig. 4 LSF curves of devices. (a) Without metal frame;  
(b) with metal frame

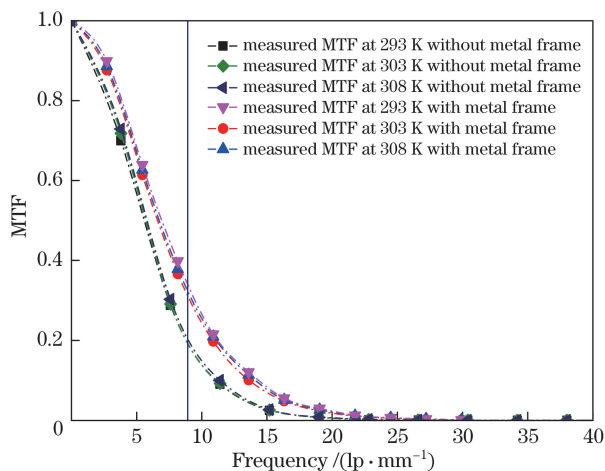


图5 无金属框结构和有金属框结构探测器的 MTF 曲线  
Fig. 5 MTF curves of detectors without and  
with metal frame structure

值在整个频率范围内明显高于无金属框结构的器件。测试表明:3个不同黑体辐射温度下的 MTF 值的重复性较高,器件 MTF 值随温度的升高几乎不变;有金属框结构的器件在 Nyquist 频率处的 MTF 值为  $0.32 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,除去镜头的 MTF 值后约为  $0.4 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;无金属框结构的器件在 Nyquist 处的频率约为  $0.18 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,除去镜头的 MTF 值后约

为  $0.23 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;通过对比可得金属框结构对于器件的 MTF 数值提升较为明显。由 MTF 值可以看出,无金属框结构的器件受到电学串音的影响较为明显。当引入金属框结构后,由器件空间区域及相邻像元处产生的部分横向扩散载流子会被金属框吸收,这不仅使得电学串音被有效抑制,还将光敏元的有效吸收区域限制在一定的范围之内,提高了器件像元响应的一致性。测试结果表明金属框结构设计对于提高红外探测器的 MTF 值效果明显。

## 4 结 论

MTF 是 HgCdTe 红外探测器的一项重要指标,串音是造成探测器 MTF 性能退化的重要因素之一。针对如何有效减小电学串音对器件 MTF 值的影响,引入一种金属框结构。金属框结构将光敏元有效吸收区域限制在一定的范围内,能够吸收来自于相邻像元的部分横向扩散载流子,在减小电学串音干扰的同时也有效提高了像元的响应均匀性。将无金属框结构与有金属框结构的两种线列探测器进行了 MTF 测试及对比。测试结果表明,金属框结构可有效提高器件的 MTF 值,对于后续的高质量大面阵器件制备具有一定的参考意义。但因金属框位置在器件外部,吸收横向扩散载流子的数量有限,如何提高吸收效率并减小电学串音干扰是后续研究的重点之一。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Z D, Chen L, Fu X L, *et al.* Dark current mechanism in long-wavelength HgCdTe infrared detectors on alternative substrates[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(2): 186-190. 赵真典, 陈露, 傅祥良, 等. 替代衬底上的碲镉汞长波器件暗电流机理[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(2): 186-190.
- [2] Qiu W C, Hu W D, Lin C, *et al.* Surface leakage current in  $12.5 \mu\text{m}$  long-wavelength HgCdTe infrared photodiode arrays[J]. Optics Letters, 2016, 41(4): 828-831.
- [3] Schuster J, Bellotti E. Numerical simulation of crosstalk in reduced pitch HgCdTe photon-trapping structure pixel arrays[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14712-14727.
- [4] Djite I, Estribeau M, Magnan P, *et al.* Theoretical models of modulation transfer function quantum efficiency, and crosstalk for CCD and CMOS image sensors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(3): 729-737.

- [5] Li Y F, Tang H J, Zhu Y M, *et al.* Optimum guard-ring for planar InP/InGaAs photodiode: characterized with AFM, SCM and LBIC[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(6): 401-405.  
李永富, 唐恒敬, 朱耀明, 等. AFM/SCM 及 LBIC 技术在平面型保护环结构 InGaAs 探测器设计中的应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(6): 401-405.
- [6] Hyun K S, Paek Y, Kwon Y H, *et al.* Pre-breakdown suppression in planar InP/InGaAs avalanche photodiode using deep floating guard ring[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(23): 5547-5549.
- [7] Fourreau Y, Pantzas K, Patriarche G, *et al.* Nondestructive characterization of residual threading dislocation density in HgCdTe layers grown on CdZnTe by liquid-phase epitaxy[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(9): 4518-4523.
- [8] Najafi S, Madanipour K. Measurement of the modulation transfer function of a charge-coupled device array by the combination of the self-imaging effect and slanted edge method[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4724-4727.
- [9] Yuan H F, Guo Y F, Si G L, *et al.* MTF measurement method based on slanted-edge image simulated by normal distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0712001.  
袁航飞, 郭永飞, 司国良, 等. 正态分布模拟倾斜刃边图像的 MTF 测量方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0712001.
- [10] Li H, Yan C X, Shao J B. Measurement of the modulation transfer function of infrared imaging system by modified slant edge method[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2016, 20(3): 381-388.
- [11] Tzannes A P, Mooney J M. Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1808-1817.
- [12] Liu C, Ding Y L, Tian D P, *et al.* Dynamic modulation transfer function analysis and research of image rotation for aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0211001.  
刘超, 丁亚林, 田大鹏, 等. 航空相机像旋动态调制传递函数分析与研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0211001.
- [13] Li J, Xing F, Wang C. High-precision on-orbit assessment of MTF for space CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211003.  
李进, 邢飞, 王翀. 空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211003.
- [14] Alaruri S D. Calculating the modulation transfer function of an optical imaging system incorporating a digital camera from slanted-edge images captured under variable illumination levels: Fourier transforms application using MATLAB[J]. *Optik*, 2016, 127(15): 5820-5824.