

PbSe 光电导焦平面阵列探测器

陈岩松, 任梓洋, 徐翰纶, 朱海明, 王 垚, 吴惠桢*

(浙江大学 物理学院 浙江省量子技术和器件重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 应用半导体非平衡载流子连续性方程模拟了 PbSe 光电导红外探测器参数对光电响应的影响, 实验研制了小规模像元的 x - y 寻址型 PbSe 光电导焦平面阵列 (FPA) 探测器, 像元尺寸为 $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$, 像元间距为 $500\ \mu\text{m}$ 。实验表征了 PbSe FPA 探测器像元的光电响应性能, 有效像元率达到了 100%。500 K 温度黑体辐射和 3.0 V 偏压下像元的黑体响应率的范围是 70~146 mA/W, 平均响应率和平均探测率分别达到了 110 mA/W 和 $5.5\times 10^9\ \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。像元的噪声等效温差 (NETD) 范围是 15~81 mK, 平均噪声等效温差为 32 mK。使用中波红外成像装置, 初步演示了 PbSe FPA 探测器对 350~450°C 热辐射目标的红外成像。为后续研制高密度像元 PbSe FPA 探测器奠定了基础。

关键词: PbSe; 红外探测; 焦平面; 热成像

中图分类号: O472+3 **文献标识码:** A

Photoconductive focal plane arrays infrared detector based on PbSe

CHEN Yan-Song, REN Zi-Yang, XU Han-Lun, ZHU Hai-Ming, WANG Yao, WU Hui-Zhen*

(School of Physics, Zhejiang Province Key Laboratory of Quantum Technology and Devices, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The influence of the parameters of PbSe photoconductive infrared detector on the photoelectric response was simulated by the continuity equation of semiconductor non-equilibrium carriers. A small-scale pixel x - y addressable PbSe photoconductive focal plane array (FPA) detector was developed experimentally. The pixel size was $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$, and the pixel pitch was $500\ \mu\text{m}$. The photoelectric response performance of the pixels of the PbSe FPA detector was experimentally characterized, and the effective pixel rate reached 100%. Under 500 K temperature blackbody radiation and 3.0 V bias voltage, the average responsivity and detectivity reached 110 mA/W and $5.5\times 10^9\ \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, respectively. The noise equivalent temperature difference (NETD) of the pixels ranged from 15 to 81 mK, and the average noise equivalent temperature difference was 32 mK. Using a mid-wavelength infrared imaging device, the infrared thermal imaging of the PbSe FPA detector on the thermal radiation target of 350~450°C was preliminarily demonstrated. This work lays the foundation for the subsequent development of high-density pixel PbSe FPA detectors.

Key words: PbSe, infrared detection, focal plane arrays, thermal imaging

引言

自 20 世纪 80 年代开始出现红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Arrays, IRFPA) 技术, 红外成像技术取得了长足的发展^[1-2]。目前研究得比较成熟的 FPA 探测器主要是由 InSb、HgCdTe (MCT)、QWIP 和 InAs/GaSb II 类超晶格等材料制备的二维凝视型

焦平面芯片^[3-7]。但是它们都需要在液氮制冷或更低温度下才能获得高的红外探测性能^[1], 因此提高红外探测器的工作温度是人们关注的重要问题之一。IV-VI 族半导体化合物 (PbS、PbSe 和 PbTe 等) 是另一类物理性质独特的中波红外探测材料, 具有直接带隙、窄禁带宽度等特点, PbSe 光电导探测器室温下就可以获得良好的红外探测能力^[8-11], 因此

收稿日期: 2022-04-20, 修回日期: 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11933006), 中德科学基金 (GZ 1580)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11933006), and the Sino-German Center for Science (GZ 1580)

作者简介 (Biography): 陈岩松 (1996-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事 IV-VI 族半导体材料及其光电器件的研究

E-mail: 21936037@zju.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hzhu@zju.edu.cn

Received date: 2022-04-20, **Revised date:** 2022-09-07

很适合制作室温下工作的FPA红外探测器。2003年西班牙国防部的CIDA使用真空蒸发镀膜方式研制了一种 x - y 寻址电扫描型 8×8 PbSe FPA探测器,室温下峰值探测率达到 $3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,并且很快就扩展到 16×16 和 32×32 规模^[12-13]。美国的军工企业Northrop Grumman在2014年就实现了 320×256 PbSe FPA在第二代硅基读出电路工艺上的单片集成化^[14]。

近年来国内对于IV-VI族半导体的研究主要集中在异质结材料的光电特性上,例如浙江大学吴惠楨课题组的基于CdTe/PbTe异质结中二维电子气(2DEG)研制的高速中波红外探测器^[15-16],电子科技大学刘兴钊团队基于 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{PbSe}$ 异质结研制的高探测率红外探测器^[17],大连理工大学邱继军等人研制的PbSe/CdSe异质结光伏探测器^[18]。但是目前国内还没有PbSe光电导FPA探测器的相关报道。

本文通过光电导探测器的理论模拟获得探测器的设计参数,研制了基于PbSe薄膜材料的一种可在室温工作的FPA红外探测器,并测试和分析了器件室温下的光电响应性能和中波红外成像能力。

1 PbSe光电导探测器的理论模拟和FPA探测器制备

1.1 PbSe光电导探测器的理论模拟

影响红外光电导探测器性能的因素有多种,通过理论模拟可以探究器件的基本参数对光电特性的影响。假设PbSe光电导探测器器件光敏区的长、宽、厚分别为 l 、 w 、 t ,两端接上偏置电压 V ,如图1(a)所示。假设红外辐射从半导体的表面入射,在 (x, y) 平面的辐照强度均匀分布,由于PbSe对能量大于带隙的红外光子有很强的吸收,因此在 z 方向红外光强逐渐衰减,导致所产生的光生载流子密度分布不同,这样就会引起载流子的扩散,对于p型样品来说,器件中非平衡少数载流子(电子)的连续性方程为:

$$D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial z^2} - \frac{\Delta n}{\tau} + g(z) = 0 \quad (1)$$

其中 D_n 和 τ 分别表示扩散系数和载流子寿命, $g(z)$ 为某一深度电子-空穴对产生率,由下式表示:

$$g(z) = \eta \Phi_0 \alpha e^{-\alpha z} \quad (2)$$

其中 η 、 Φ_0 、 α 分别为量子效率、光子入射通量、吸收系数。

方程(1)具有如下边界条件:

$$\Delta n(0) = g(0)\tau = \eta \Phi_0 \alpha \tau \quad (3)$$

$$\Delta n(\infty) = 0 \quad (4)$$

那么方程(1)的解为:

$$\Delta n(z) = C_1 \exp\left(-\frac{z}{\sqrt{D_n \tau}}\right) - C_2 \exp(-\alpha z) \quad (5)$$

这是非平衡电子的浓度在 z 方向的分布,其中系数 C_1 和 C_2 为:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\eta \Phi_0 D_n \tau^2 \alpha^3}{D_n \tau \alpha^2 - 1} \\ C_2 = \frac{\eta \Phi_0 \tau \alpha}{D_n \tau \alpha^2 - 1} \end{cases} \quad (6)$$

则可以计算出不同位置处的电流密度:

$$J(z) = \Delta \sigma \xi = \Delta n(z) q \mu_n \cdot \frac{V}{l} \quad (7)$$

其中 $\Delta \sigma$ 和 ξ 分别为附加光电导率和电场强度。

由非平衡电子贡献的光电流可表示为:

$$\Delta I_n = \int_0^l J(z) w dz = q \mu_n w \int_0^l \Delta n(z) dz \quad (8)$$

考虑到是半导体的本征吸收,可近似认为非平衡空穴对光电流的贡献 ΔI_p 与非平衡电子一致,即 $\Delta I_n = \Delta I_p$,那么器件的电流响应率可以表示为:

$$R_i = \frac{\Delta I_n + \Delta I_p}{P_\lambda} = \frac{2 \Delta I_n}{\Phi_0 A h \nu} \quad (9)$$

其中 P_λ 为波长 λ 的单色光入射功率、 A 为探测器光敏面的面积、 $h\nu$ 为光子能量。

根据电导率与载流子浓度的关系,得到电流响应率表达式:

$$R_i = \frac{2C_1 \mu_n q V \sqrt{D_n \tau}}{\Phi_0 h \nu l^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\sqrt{D_n \tau}}\right) \right] + \frac{2C_2 \mu_n q V}{\alpha \Phi_0 h \nu l^2} [\exp(-\alpha t) - 1] \quad (10)$$

这里选取PbSe的材料参数代入, $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 3.5 \mu\text{m}$)^[19], μ_n 和 τ 分别取霍尔效应和脉冲激光响应测得的数据:迁移率 $\mu_n = 40 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,载流子寿命 $\tau \sim 0.5 \mu\text{s}$ 。理想情况下 η 取1。扩散系数 D_n 可由爱因斯坦关系

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_0 T}{q} \quad (11)$$

得到。将这些数值代入式(10)可得到:

$$R_i = \frac{80 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{7}\right) \right] V}{l^2} + \frac{23 [\exp(-t) - 1] V}{10^5 l^2} \quad (12)$$

其中 t 单位取 μm , l 单位取 mm , R_i 单位为 mA/W 。响应率与各个可变参数的关系,如图1(b-d)所示。

从图1(b-c)可以看到,探测器的响应率和光敏

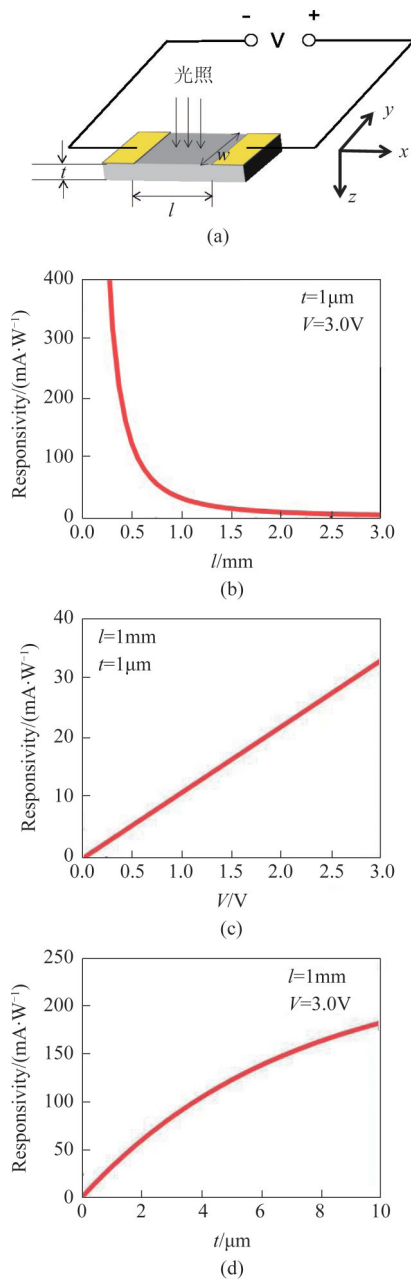


图1 (a) PbSe光电导模型示意图。PbSe光电导探测器理论响应率与光敏区宽度(b)、外加偏压(c)和薄膜厚度(d)的关系

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the PbSe photoconductive model. The relationship between the theoretical responsivity of PbSe photoconductive detector with the width of photosensitive region (b), bias voltage (c), and film thickness (d)

区宽度的平方呈近似反比关系,与外加偏压成正比关系;图1(d)显示随着PbSe薄膜的厚度增加,响应率逐渐升高并趋于平缓,但是实际制作探测器时,出于制造成本考虑和薄膜质量要求,一般下半导体薄膜厚度不会很大,薄膜厚度过大可能导致脱落和质量降低等问题。因此要获得更高的单色电

流响应率,应将探测器光敏面尺寸做小(例如500 μm 或更小),薄膜材料适当做厚,以及工作时加大偏压。

1.2 PbSe FPA探测器的制备

PbSe FPA探测器的制备通过一系列微纳加工工艺完成,下面简述其工艺流程。(1)首先使用磁控溅射在PbSe薄膜材料上沉积200 nm SiO_2 作为钝化层;(2)光刻并显影出 8×8 FPA像元图案;(3)使用ICP设备干法刻蚀暴露区域的 SiO_2 钝化层;(4)使用溴化氢和双氧水混合溶液湿法腐蚀PbSe;(5)光刻并显影出电极接触区域图案,干法刻蚀该区域的钝化层;(6)光刻并显影纵向电极图案,使用电子束蒸发沉积200 nm金(Au),在丙酮溶液中完成剥离;(7)制作绝缘隔离区域:先使用磁控溅射沉积300 nm SiO_2 ,然后经过光刻、显影和干法刻蚀,留下 (x, y) 电极交叉处的 SiO_2 ;(8)光刻并显影横向电极图案,然后使用电子束蒸发沉积200 nm金(Au),在丙酮溶液中完成剥离。

1.3 PbSe FPA探测器的性能表征方法

制备完成的PbSe FPA探测器使用单色光谱仪、黑体辐射源(HFY-200B)、脉冲激光等实验装置测试其光电响应性能,中波红外成像效果通过一个红外成像装置来演示。光电流谱的测量由光栅单色仪(Omni- λ 300)、电流放大器(SR570)和一个锁相放大器(SR830)组成的装置完成。脉冲激光响应测试使用高速放大器(DHPCA-100)将响应信号输出至数字示波器(TBS 1052B)显示并存储数据。图2(a-b)分别是探测器黑体响应测试和中波红外成像演示装置示意图,图(b)中的读出电路设计参考相关专利^[20]。

2 结果与讨论

制备的 x - y 寻址电扫描型PbSe FPA在光学显微镜下的照片如图3(a)所示,图3(b)为局部放大图。PbSe光电导FPA探测器的每个像元光敏面尺寸为500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$,像元间距为500 μm 。图3(b)中可以清晰地看到 (x, y) 电极交叉处 SiO_2 绝缘层的轮廓。

PbSe探测器的电阻与材料的电导率、载流子浓度和迁移率等相关,还会影响探测器的噪声水平。通过单独测量每个像元的 I - V 特性得到了每个像元的电阻值,见表1。测试结果显示所有像元的 I - V 特性都呈现线性关系,无短路或开路情况出现。

使用响应光谱测试装置测量PbSe FPA探测器

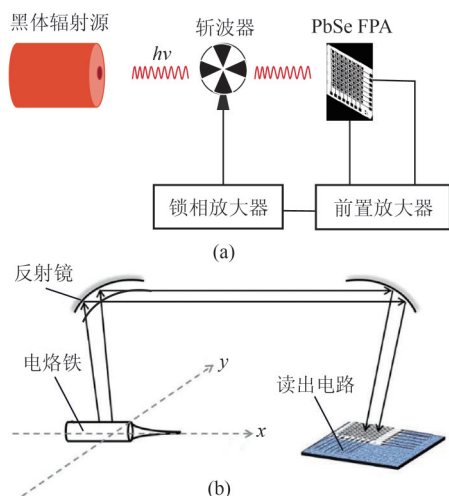


图2 探测器性能表征装置示意图 (a) 黑体响应, (b) 中波红外成像演示装置

Fig. 2 Schematic diagram of the detector performance characterization device (a) blackbody response, (b) mid-wave-length infrared imaging demonstration device

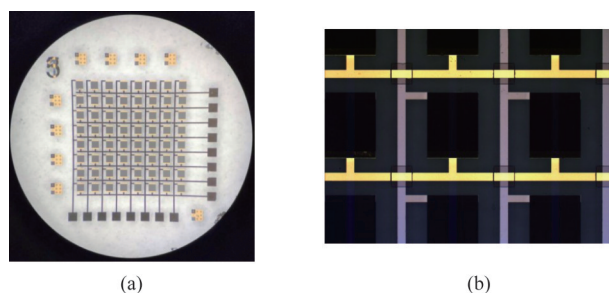


图3 x - y 寻址电扫描型 PbSe 光电导 FPA 探测器在光学显微镜下照片 (a) FPA 整体图像, (b) FPA 的局部放大图案 (横、纵电极交叉处方形区域为绝缘层)

Fig. 3 Photo of x - y addressed PbSe photoconductive FPA detector under optical microscope (a) overall image of FPA, (b) partial enlarged pattern of FPA (the square area at the intersection of horizontal and vertical electrodes is the insulating layer)

表1 PbSe 光电导 8×8 FPA 探测器像元电阻表

Table 1. The pixel resistance table of PbSe photoconductive 8×8 FPA detector

	第1列	第2列	第3列	第4列	第5列	第6列	第7列	第8列
第1行	484	465	485	474	493	501	538	626
第2行	342	323	322	328	341	361	401	491
第3行	295	274	278	285	295	312	354	450
第4行	273	255	256	265	278	292	322	428
第5行	262	245	247	254	268	282	321	416
第6行	257	240	243	250	260	277	316	411
第7行	260	243	245	252	263	280	319	412
第8行	283	266	268	275	287	305	342	434

像元的光电流响应谱, 在 3.0 V 偏压和 $2 \mu\text{A/V}$ 的放大器增益下, 典型的光谱响应如图 4(a) 所示, 峰值响应波长在约 $3.5 \mu\text{m}$ 处, 长波截止波长约为 $4.3 \mu\text{m}$, 与 PbSe 室温下禁带宽度 (0.278 eV) 对应的截止波长相近。FPA 像元的脉冲激光响应测试结果如图 4(b) 所示, 脉冲激光的波长和功率分别为 $3.5 \mu\text{m}$ 和 16 mW 。图中红色曲线为响应信号下降的拟合曲线, 拟合函数选取 $y = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{x-x_0}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{x-x_0}{t_2}\right)$, 拟合结果显示 $t_1 \sim 17$ 、 $t_2 \sim 638$, 表明存在两种载流子衰减机制。

像元的响应率、探测率和噪声等效温差 (NETD) 等光电特性表征使用了黑体辐射源。测试像元黑体响应率时, 固定黑体温度为 $227 \text{ }^\circ\text{C}$ (500 K), 黑体辐射源的出射光阑孔径大小为 1 cm (直径), 探测器与黑体出射光阑距离 10 cm 。前置放大器的增益为 $2 \mu\text{A/V}$, 使用功率计测得探测器所在位置的功率密度为 $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。改变像元的外加偏压, 得到黑体响应率的变化如图 4(c) 所示, 黑体响应率随外加偏压显示出良好的线性关系, 与图 2(c) 所示的理论模拟结果符合较好。在 3.0 V 偏压和 500 K 温度黑体辐射下, 测得所有像元的响应率的范围是 $70 \sim 146 \text{ mA/W}$ 。图 5(a) 展示了 FPA 中像元响应率的分布。可以看到, 响应率整体分布相对均匀, 只有第 1 行和第 8 列响应率相对较低, 但是探测器不存在响应率过低或噪声信号特别大的像元, 因此有效像元率为 100% 。统计所有像元的响应率可以得到 PbSe FPA 像元的平均黑体响应率为 $R_i = 110 \text{ mA/W}$ 。像元规模为 $M \times N$ 的 FPA 探测器响应率非均匀性定义为^[21]:

$$U_r = \frac{\sigma}{\bar{R}_i} = \frac{1}{\bar{R}_i} \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R_i(i,j) - \bar{R}_i]^2}, \quad (13)$$

使用式 (13) 计算出响应率非均匀性为 0.18 。使用噪声频谱仪测量探测器像元的噪声频谱, 如图 4(d) 所示。像元的噪声水平表现相近, 噪声电流密度低于 $1 \times 10^{-12} \text{ A/Hz}^{1/2}$, 计算出 PbSe FPA 像元的探测率为 $(3.5 \sim 7.3) \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 平均探测率为 $5.5 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

噪声等效温差是 FPA 探测器另一个重要的性能参数, 表示探测器像元能够识别的最小辐射变化能力。在两个不同温度黑体下辐射下, 分别测得

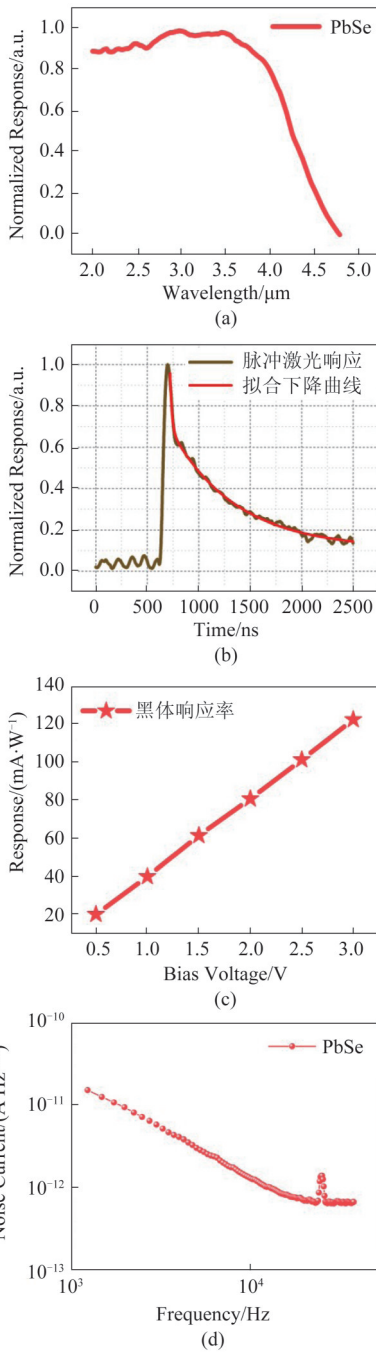


图4 探测器的光电响应表征 (a)像元的典型响应光谱,(b)像元的脉冲激光响应,(c)像元的黑体响应率随偏压变化,(d)像元的噪声电流谱
 Fig. 4 Characterization of the photoelectric response of the detector (a) typical responsivity spectrum of the pixel, (b) the pulsed laser response of the pixel, (c) the blackbody responsivity of the pixel varies with bias voltage, (d) noise current spectrum of the pixel

FPA 像元的响应电流信号和噪声电流,然后通过下式计算^[22]:

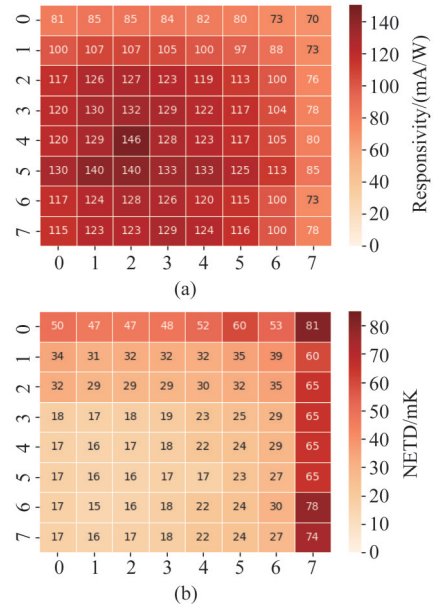


图5 (a)FPA中像元响应率分布,(b)FPA中NETD分布
 Fig. 5 (a) Pixel responsivity distribution in FPA, (b) NETD distribution in FPA

$$NETD = I_n \frac{\Delta T}{\Delta I_s} \quad (14)$$

其中 ΔT 为两个黑体温度差, I_n 为噪声电流, ΔI_s 是两个不同温度黑体辐射下的响应信号差值。

使用如图2(a)所示的测试装置,设置黑体辐射源的温度分别为 300 °C 和 310 °C,分别测得每个像元的输出响应信号,以响应电流信号的均方根作为噪声电流,根据式(14)计算得到所有像元的 NETD,结果及分布见图5(b)。可以看到,像元的 NETD 范围是 15~81 mK,可以计算出平均 NETD 为 32 mK。其中 PbSe FPA 的第 1 行及第 8 列 NETD 偏大,与图5(a)所示的响应率分布表现是一致的。

使用如图2(b)所示的红外成像系统,目标物体(电烙铁)辐射出的红外光经由两块凹面镜反射后被 PbSe FPA 探测器吸收,电烙铁和探测器都放置在反射镜的焦点处。探测器每次可以读取 64(=8×8) 个信号值,也就是一幅 64 像素的热成像图,如图6(a)所示。由于电烙铁体积较大,目前的成像系统无法对目标场景实现缩放,因此 PbSe FPA 探测器只能获取电烙铁局部的红外热成像,但是我们只需要将电烙铁在图2(b)所示的 x 方向移动很少的几步并采集探测器的响应信号,通过图像拼接就可以还原出电烙铁的热成像。分别设置电烙铁的温度为 350 °C、400 °C 和 450 °C,每次采集 4 帧局部热成像图进行拼接,最终红外成像效果如图6(b)所示。PbSe

FPA 探测器对三个温度的电烙铁都实现了红外热成像,并且随着温度升高,图像对比度也更高。图中可以发现有几列像素对比度相对微弱,这是来源于焦平面第 8 列像元的响应信号比较弱,从图 5 中像元的响应率及 NETD 分布都有体现,这也同时说明了 FPA 探测器的均匀性对于红外成像的重要性。

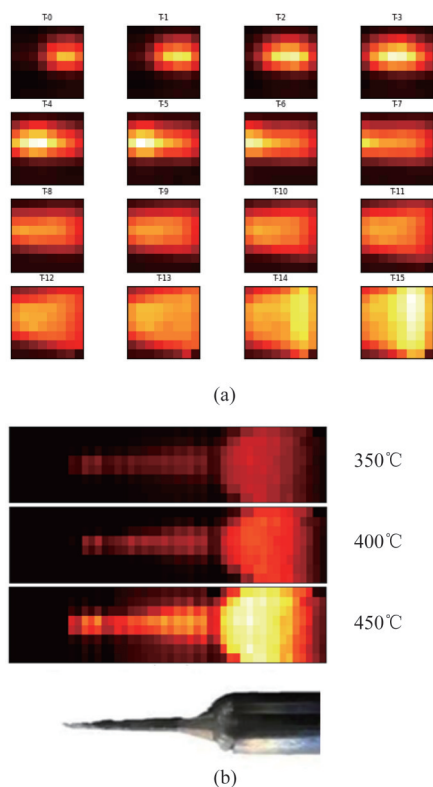


图 6 PbSe FPA 探测器红外成像 (a)局部热成像,(b)完整热成像图与实物对比

Fig. 6 Infrared imaging of PbSe FPA detector (a) partial thermal image, (b) comparison of complete thermal image with the real object

PbSe 光电导焦平面阵列探测器具有易于加工、制造成本低等优点,其电极引线为多路复用,并且探测器在室温下就具有较高的探测率,中波红外成像演示也获得了良好的表现,拓宽了 PbSe 探测器的应用场景。但是由于电极引线属于外挂式,FPA 的像元密度受到限制,因此制造大规模像元数量的 FPA 探测器比较困难。综合来看,PbSe FPA 探测器在非制冷中波红外探测领域具有较大优势。

3 结论

理论分析了 PbSe 光电导红外探测器器件参数对光电响应的影响,应用 PbSe 薄膜材料制备了 8×8 像素的 x - y 寻址型 PbSe 光电导 FPA 探测器,像元尺

寸为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$,像元间距为 $500 \mu\text{m}$ 。使用单色光谱仪测试得到了像元的典型响应光谱,室温下长波截止波长约为 $4.3 \mu\text{m}$,峰值响应波长为 $3.5 \mu\text{m}$ 。通过黑体辐射源表征了探测器像元的光电响应性能,响应率范围是 $70 \sim 146 \text{ mA/W}$,平均响应率和平均探测率分别达到 110 mA/W 和 $5.5 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$;像元的 NETD 范围是 $15 \sim 81 \text{ mK}$,平均 NETD 达到 32 mK 。除个别行列像元外,FPA 的响应率和 NETD 分布比较均匀。在室温下,初步演示了探测器对 $350 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ 热辐射目标的红外热成像。小规模 PbSe FPA 探测器的成功制备,为后续制造更大规模和更高密度的 PbSe FPA 探测器打下了基础。

References

- [1] Rogalski A. Progress in focal plane array technologies [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, **36** (2-3): 342-473.
- [2] Martyniuk P, Antoszewski J, Martyniuk M, et al. New concepts in infrared photodetector designs [J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, **1**(4):041102.
- [3] Nedelcu A, Bonvalot C, Taalat R, et al. III-V detector technologies at Sofradir: Dealing with image quality [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **94**:273-279.
- [4] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: Future prospect [J]. *Applied physics reviews*, 2017, **4**(3):031304.
- [5] Ting D Z, Rafol B, Keo S A, et al. InAs/InAsSb type-II superlattice mid-wavelength infrared focal plane array with significantly higher operating temperature than InSb [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(6):1-6.
- [6] Billaha M, Das M K. Performance analysis of AlGaAs/GaAs/InGaAs-based asymmetric long-wavelength QWIP [J]. *Applied Physics A*, 2019, **125**(7):1-7.
- [7] Bhan R K, Dhar V. Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization [J]. *Opto-Electronics Review*, 2019, **27**(2):174-193.
- [8] Suzuki N, Sawai K, Adachi S. Optical properties of PbSe [J]. *Journal of applied physics*, 1995, **77**(3):1249-1255.
- [9] Vergara G, Montojo M, Torquemada M, et al. Polycrystalline lead selenide: the resurgence of an old infrared detector [J]. *Opto-Electronics Review*, 2007, **15**(2):110-117.
- [10] Peng H, Song J H, Kanatzidis M G, et al. Electronic structure and transport properties of doped PbSe [J]. *Physical Review B*, 2011, **84**(12):125207.
- [11] Gupta M C, Harrison J T, Islam M T. Photoconductive PbSe thin films for infrared imaging [J]. *Materials Advances*, 2021, **2**(10):3133-3160.
- [12] Rodrigo M T, Sánchez F J, Torquemada M C, et al. Polycrystalline lead selenide x - y addressed uncooled focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44** (4):281-287.
- [13] Sánchez F J, Rodrigo M T, Vergara G, et al. Progress on monolithic integration of cheap IR FPAs of polycrystalline

- PbSe[C]//Infrared Technology and Applications XXXI. International Society for Optics and Photonics, 2005, **5783**: 441-447.
- [14] Green K, Yoo S S, Kauffman C. Lead salt TE-cooled imaging sensor development [C]//Infrared Technology and Applications XL. SPIE, 2014, **9070**:430-436.
- [15] Zhu J, Xu H, Ma S, *et al.* Ultrahigh-Speed Mid-Infrared Photodetectors With 2-D Electron Gas in a CdTe/PbTe Heterojunction [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, **67**(6):2432-2436.
- [16] Zhu J, Xu H, Wang Z, *et al.* Lateral photovoltaic mid-infrared detector with a two-dimensional electron gas at the heterojunction interface [J]. *Optica*, 2020, **7**(10): 1394-1401.
- [17] Ren Y, Li Y, Li W, *et al.* High Sensitivity and Fast Response Infrared Detector Fabricated with the Bi₂Se₃-PbSe Heterojunction [J]. *Applied Surface Science*, 2022: 152578.
- [18] Qiu J, Liu Y, Cai Z, *et al.* CdSe: In Mid-infrared transparent conductive films prospering uncooled PbSe/CdSe heterojunction photovoltaic detectors [J]. *Materials Advances*, 2022, **3**(2):1079-1086.
- [19] Suzuki N, Sawai K, Adachi S. Optical properties of PbSe [J]. *Journal of applied physics*, 1995, **77**(3):1249-1255.
- [20] XU Han-Lun, WANG Zheng-Lai, XU Xin-Min, *et al.* A focal plane detector readout the array of non-uniformity [P]. . China ZL202020155508.X(徐翰纶, 王正来, 徐新民, 等。一种可校正阵列非均匀性的焦平面探测器读出电路。中国 ZL202020155508.X)。2020-10-30.
- [21] Institute of Electronic Industry Standardization in Industry and Information Technology. GB/T 17444-2013. Infracation flat array parameter test method [S]. Beijing: China Standard Press(工业和信息化部电子工业标准化研究所. GB/T 17444 - 2013. 红外焦平面阵列参数测试方法。北京: 中国标准出版社) 2014.
- [22] CHEN Bo-Liang, LI Xiang-Yang. Infrared imaging detectors for space applications [M]. Beijing. Science Press(陈伯良, 李向阳。航天红外成像探测器。北京, 科学出版社), 2016.