

截止波长 2.2 μm 的平面型延伸波长 InGaAs 探测器

程吉凤^{1,2,3}, 李雪^{1,2*}, 邵秀梅^{1,2}, 李涛^{1,2}, 王红真^{1,2,3}, 马英杰^{1,2},
杨波^{1,2}, 龚海梅^{1,2*}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用闭管扩散的方法成功研制了截止波长 2.2 μm 的平面型延伸波长 InGaAs 探测器芯片。在分子束外延法 (MBE) 生长的 $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ 外延材料上, 采用砷化锌作为扩散掺杂源、 SiN_x 作为扩散掩膜层, 实现了扩散成结。分析了扩散结深和载流子侧向收集宽度、 I - V 特性、光谱响应特性和探测率, 结果表明: 150 K 温度下, 器件暗电流密度 0.69 nA/cm²@-10 mV, 响应截止波长和峰值波长分别为 2.12 μm 和 1.97 μm , 峰值响应率为 1.29 A/W, 峰值量子效率达 82%, 峰值探测率为 1.01×10^{12} cm²·Hz^{1/2}/W。这些结果对后续进一步优化平面型延伸波长 InGaAs 焦平面探测器有重要的指导意义。

关键词: 延伸波长; InAlAs/InGaAs; 扩散; 暗电流密度; 量子效率
中图分类号: TN215 文献标识码: A

Planar wavelength-extended $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ detector with 2.2- μm cut-off wavelength

CHENG Ji-Feng^{1,2,3}, LI Xue^{1,2*}, SHAO Xiu-Mei^{1,2}, LI Tao^{1,2}, WANG Hong-Zhen^{1,2,3}, MA Ying-Jie^{1,2},
YANG Bo^{1,2}, GONG Hai-Mei^{1,2*}

- (1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Planar-type 2.2 μm wavelength-extended InGaAs photodetectors (PDs) using the sealed-ampoule diffusion method was reported. The zinc arsenide powder was used as the dopant source, which was driven into the cap of the $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ hetero structure materials grown by molecular beam epitaxy (MBE), using a SiN_x as diffusion mask deposited by ICP-CVD. The junction depth, the lateral collection width of photogenerated carriers, the I - V characteristics, the spectral response and the detectivity of the detector at different temperatures were analyzed. The results indicate that the PD exhibits a low dark current density of 0.69×10^{-9} A/cm² at -10 mV at 150 K. The cutoff wavelength and peak wavelength were 2.12 μm and 1.97 μm . The peak detectivity, peak responsivity and quantum efficiency was 1.01×10^{12} cm²·Hz^{1/2}/W, 1.29 A/W and 82% respectively. These results suggest that the planar-type InGaAs can reach high performance.

Key words: wavelength-extended, InAlAs/InGaAs, diffusion, dark current density, quantum efficiency

收稿日期: 2022-02-15, 修回日期: 2022-03-30

Received date: 2022-02-15, revised date: 2022-03-30

基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人计划资助(21XD1404200); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2019-3); 中国科学院联合基金(6141A01170106); 上海市级科技重大专项(2019SHZDZX01); 国家自然科学基金(62075229), 国家自然科学基金(62175250).

Foundation items: Supported by the Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader under Grant (21XD1404200), Key deployment projects of the Chinese Academy of Sciences (ZDRW-CN-2019-3), Joint fund of Chinese Academy of Sciences (6141A01170106), the Shanghai Municipal Science and Technology Major Project (2019SHZDZX01) and the National Natural Science Foundation of China (62075229, 62175250)

作者简介 (Biography): 程吉凤 (1981-), 女, 河南固始人, 高级工程师, 博士学位, 主要研究领域为短波红外探测器. Email: chengjif@mail.sitp.ac.cn.

* 通讯作者 (Corresponding authors): e-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn; lixue@mail.sitp.ac.cn

引言

常规的短波红外(SWIR)InGaAs 探测器在室温下的响应波长范围为 0.9~1.7 μm ,具有材料生长工艺成熟、功耗低、响应率高等优点,在遥感、夜视、天文等多个应用领域都引起了越来越多的研究兴趣^[1-2]。同时,地球观测、多光谱和高光谱成像等应用领域,需要具有 1.0~2.5 μm 光谱响应的短波红外探测器,例如 1.9~2.5 μm 波段应用于资源卫星中高分辨率多光谱成像,可实现农作物水分探测^[3]; 2.26~2.38 μm 近红外光谱包含 CH_4 、 CO 、 H_2O 和 N_2O 的吸收线,用于 ENVISAT 卫星的对地观测;欧空局的 EarthCARE 有效载荷集成了截止波长 1.7 μm 、2.2 μm 和 2.5 μm 波段的 InGaAs 探测器,用于对云层、气溶胶和大气辐射的观测^[4-5],这些涉及国计民生的重要应用都是推动响应波长范围 1.0~2.5 μm 的延伸波长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.53 < x < 0.83$) 探测器持续发展的主要动力。

III-V 族化合物 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.53 < x < 1$) 是 III-V 二元系直接带隙半导体材料,可通过 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 化合物中 In 组分在 0.53~0.83 之间的逐渐增加,实现截止波长从 1.7 μm 至 2.6 μm 的延伸。高铟含量的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 通常使用金属有机化学气相沉积(MOCVD)或分子束外延(MBE)等技术在 InP 或 GaAs 衬底上生长^[6]。

根据成结方式的不同,InGaAs 探测器可分为台面型器件和平面型器件。台面型器件因 PN 结截面裸露在外,对器件钝化工艺提出很高要求;平面型器件的 PN 结处在材料内部,降低了器件钝化难度,因此器件暗电流低、可靠性高,且器件占空比接近 100%,被常规波长的 InGaAs 探测器广泛采用。相比于常规波长的 InGaAs 材料,高 In 组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.53 < x < 1$) 外延层同衬底之间存在较大的晶格失配,材料内部存在较多的位错、缺陷,杂质元素可能会沿缺陷快速扩散,扩散机制更为复杂,结深较难精确控制,因而延伸波长平面型器件的研制面临更大困难。目前,国外延伸波长的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 平面型结构探测器已经较为成熟:Epitaxx 公司、UTC 航空航天系统公司、Sensor Unlimited 公司等报道了不同截止波长的平面型线列和面阵延伸波长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器^[7-9],规模范围为 256 \times 1、512 \times 1、1024 \times 1 至 320 \times 256,像素中心距为 25 μm 到 12.5 μm 。普林斯顿红外技术公司(Princeton Infrared Technologies)最近也展示了一款平面型中心距 12 μm 的百万像素

$\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{As}/\text{InAs}_{0.25}\text{P}_{0.75}$ 焦平面^[10]。国内延伸波长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 平面型探测器的研究仍处于探索阶段。

本文采用闭管扩散技术,在 MBE 技术生长的高 In 组分 InGaAs 外延材料上制备了平面型延伸波长 InGaAs 探测器,展示了通过扩散成结法精确控制延伸波长器件的可行性,采用扫描电容显微技术(Scanning Capacitance Microscopy, SCM)表征了扩散结深,通过激光诱导电流技术(Light Beam Induced Current, LBIC)研究了载流子的侧向收集宽度。并对探测器变温条件下的暗电流特性、光谱特性以及探测率的温度响应特性进行了研究,为延伸波长 InGaAs 器件的新工艺途径提供参考。

1 器件制备

采用分子束外延法生长的 NIN 型 $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 外延材料,在厚度 350 μm 的 InP 衬底上依次生长了 $n^+\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 线性渐变缓冲层(x : 0.52 \rightarrow 0.74, Si 掺杂浓度为 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、 $n^-\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 吸收层(Si 掺杂浓度约 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)、 $n^-\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ 帽层(Si 掺杂浓度约 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$),材料结构和器件结构示意图如图 1 所示。

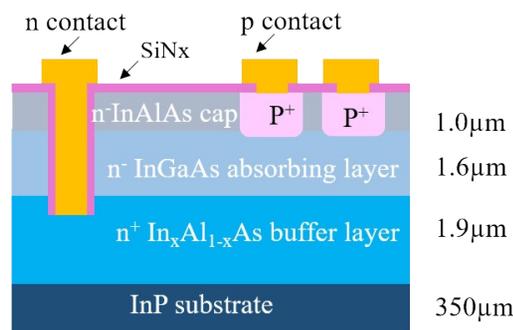


图 1 平面型 InGaAs 器件的剖面示意图

Fig. 1 The cross section scheme of planar type InGaAs detector

采用氮化硅作扩散掩膜、 Zn_3As_2 粉末作为掺杂元素进行扩散掺杂,扩散条件为:500 $^\circ\text{C}$ 、10 min;继而进行 450 $^\circ\text{C}$ 、10 min 热激活处理;接着,采用 ICP 刻蚀 N 槽,生长 SiN_x 钝化膜,开 P、N 孔,生长 P、N 接触电极。最终制备了 7 \times 1 元测试结构器件,如图 2 所示。样品制备完成后,测试其变温 I-V 特性。

2 实验结果及讨论

2.1 扩散结果分析

PN 结的结深是影响器件性能的关键参数,理想

表 1 7×1 元阵列结构各光敏元尺寸

Table 1 Size of each pixel of 7×1 linear arrays

	1	2	3	4	5	6	7
光敏元尺寸/ μm^2	30×30	50×50	100×100	120×120	150×150	200×200	500×500

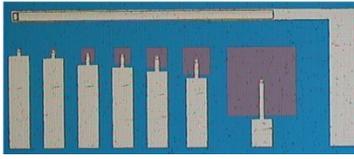


图 2 7×1 元阵列器件照片

Fig. 2 The microscopic picture of 7×1 linear arrays

的 PN 结为掺杂后的 $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ 帽层 P 型区界面顶端刚好到达 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 吸收层。扫描电容显微技术 (SCM) 是获得 p-n 结电学分布的重要微观表征手段, 扫描图像的获得主要依赖材料表面载流子的耗尽和积累, 非本征材料中的载流子主要来源于激活的掺杂元素, 通过 SCM 测试可以获得外延层的厚度和 p-n 结深度^[11-14]。 $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 异质结构扩散后的横截面 SCM 测试结果如图 3 所示, 由图可以明显看出, 样品由四层材料组成, 从左到右分别为: 扩散形成的 p 型 InAlAs 帽层、轻 n⁻ 掺杂的 InGaAs 层、重 n⁺ 掺杂的渐变缓冲层及衬底 InP 层。可以观察到: 500 °C, 10 min 闭管扩散后, Zn 元素均匀地扩散进入帽层并抵达 InGaAs 吸收层界面处, 且 SCM 图像中显示的帽层厚度与材料生长设计的帽层厚度一致。由 SCM 测得 p-n 结深度为 1.09 μm 。

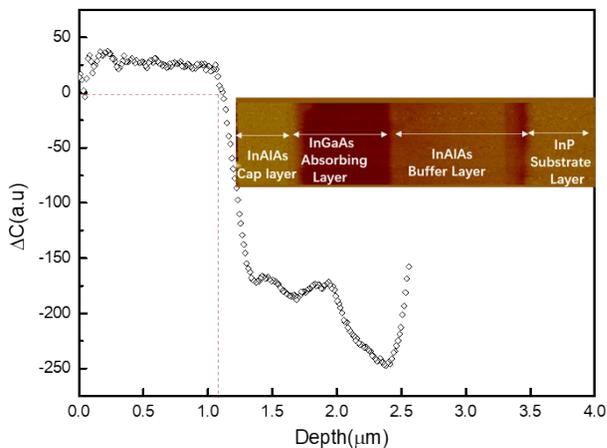
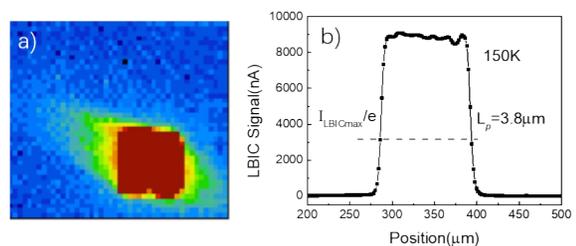


图 3 SCM 测得外延层的 p-n 结深

Fig. 3 P-n junction depth of epitaxial layer by SCM

在光敏元扩散孔尺寸确定的情况下, 造成平面型器件光敏元扩大的原因有两个: 扩散成结过程中的掺杂元素的横向扩散和 PN 结对结区外围载流子

侧向收集作用^[15]。其中, 扩散中 PN 结的横向扩散一般是一个小量; 影响平面型器件有效光敏元扩大的主要因素来自 PN 结对结区外围载流子的侧向收集。为了观察侧向收集区域对光敏元扩大的影响, 采用激光诱导电流 (LBIC) 技术测试了载流子的侧向收集宽度。100×100 μm^2 光敏芯片的 LBIC 信号分布如图 4 (a) 所示, 光敏区外存在显示误差, 可通过 LBIC 信号电流校正测试结果。图 4 (b) 所示为扫描图提取的横向 LBIC 响应信号曲线, 取电流信号下降至最大值的 1/e 时的宽度计算得到器件在 150 K 下的侧向收集宽度为 3.8 μm 。对于平面型面阵器件, 侧向收集效应一方面有利于器件占空比的提高, 另一方面可能会使相邻光敏元之间信号收集产生串扰。为了获得最大化的占空比同时减小信号串扰, 在光敏元中心距确定的情况下, 光敏元扩散孔之间的设计距离应考虑到载流子的侧向收集宽度。侧向收集宽度的表征为光敏元扩散孔尺寸设计和器件结构的优化提供参考, 对提高器件占空比和串音抑制有重要意义。

图 4 150 K 条件下 100×100 μm^2 光敏芯片的 (a) LBIC 扫描图, (b) 横向 LBIC 响应信号曲线Fig. 4 (a) LBIC mapping and (b) the lateral LBIC signal of the 100×100 μm^2 detector at 150 K

2.2 暗电流特性

暗电流的温度依赖性探测器的一个关键参数, 通过 Agilent B1500A 半导体器件分析仪进行了探测器变温下的暗电流的测量。在测试中, 将器件密封在杜瓦中, 采用液氮致冷, 并用 Laker Shore 控温仪进行温度控制。图 5 为 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 器件 7×1 元阵列中 30×30 μm 光敏元在 150 ~ 300 K 范围的暗电流密度特性曲线。在 -10 mV 偏压下, 器件 300 K 和

150 K 暗电流密度分别为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 和 $0.69 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, 相应的优值因子 R_0A 分别为 $99.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $1.94 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 暗电流密度随着温度每 25 ~ 30 °C 下降一个数量级。

为了分析暗电流和温度之间的关系, 在不同反向偏置电压下绘制了 Arrhenius 图, 如图 6 所示, 器件的暗电流与温度的变化关系可以表示为:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: I_0 为反向饱和电流; k 为 Boltzman 常数, E_a 称为激活能。通过不同斜率的线性相关性, 使用式 (1) 拟合计算激活能。在整个温度范围 (150 ~ 300 K) 内, 探测器的暗电流有两个不同的斜率, 在 260 ~ 300 K 的温度范围内, 以 -10 mV 偏压条件作为典型曲线, 提取的 E_a 为 0.50 eV, 这与 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 的相应带隙 (E_g) 非常接近^[16], 说明平面型器件 PN 结侧面的漏电流已得到有效抑制, 并实现了扩散电流占主导的状态; 在 150 ~ 240 K 的温度范围内, 提取的 E_a 为 0.259 eV, 激活能接近于 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 的 $E_g/2$, 说明在该温度范围内, 产生复合电流仍为暗电流的主要成分。另外, 暗电流随温度变化受偏压影响很小, 说明平面型器件 PN 结侧面漏电非常低。

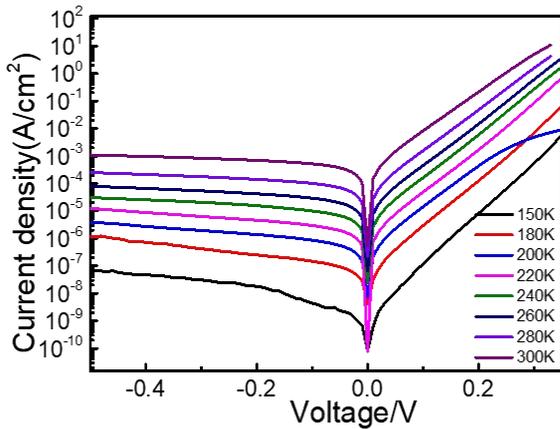


图 5 变温 I - V 特性曲线

Fig. 5 Dark current density curves ranging from 150 K to 300 K for the detector

图 7 为线列器件 180 K 下 P/A 比与暗电流密度关系曲线, 曲线斜率为反向, 且不同偏压下表现一致, 说明器件侧面漏电低, 暗电流主要来自于体电流。由于所用材料缺陷密度较大, 7×1 元线列中面积较大的光敏元缺陷多, 相应体漏电流大; 面积较小的光敏元缺陷少甚至没有落入缺陷, 相应体漏电流低, 因此 P/A 比与器件暗电流密度曲线斜率呈反向

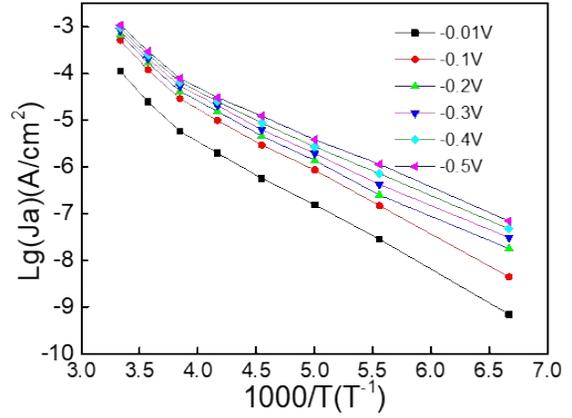


图 6 反向 I - V 的温度响应特性

Fig. 6 Temperature-dependent reversed I - V characteristics

关系。

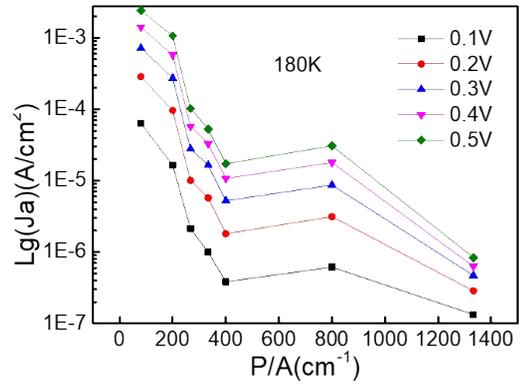


图 7 7×1 线列器件 180 K 下 P/A 比与暗电流密度关系曲线

Fig. 7 Relationship of P/A and Current density at 180 K for the 7×1 linear arrays

2.3 响应光谱特性

实测的响应光谱随温度的变化曲线如图 8 所示, 随着温度的降低, 器件的截止波长向短波方向移动。在 150 K 和 300 K 温度下, 峰值响应 50% 的长波截止波长分别为 2.12 μm 和 2.27 μm。对于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 三元体系, 禁带宽度随温度及组分的变化可以表示为^[17]:

$$E_g(x, T) = E_g^{\text{InAs}}(0) - \frac{\alpha^{\text{InAs}}(0)T^2}{T + \beta^{\text{InAs}}} + \left[E_g^{\text{GaAs}}(0) - \frac{\alpha^{\text{GaAs}}T^2}{T + \beta^{\text{GaAs}}} - E_g^{\text{InAs}}(0) + \frac{\alpha^{\text{InAs}}T^2}{T + \beta^{\text{InAs}}} \right] x - 0.475x(1-x) \quad (2)$$

式中: $E_g^{\text{InAs}}(0)$ 、 $E_g^{\text{GaAs}}(0)$ 分别表示 0 K 时 InAs 和 GaAs 的禁带宽度, $E_g^{\text{InAs}}(0)=0.35 \text{ eV}$; $E_g^{\text{GaAs}}(0)=1.43 \text{ eV}$; $\alpha^{\text{InAs}}=2.7 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$; $\alpha^{\text{GaAs}}=5.1 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$; $\beta^{\text{InAs}}=83$

K; $\beta^{InAs} = 190$ K。

由上式计算得, $x=0.75$ 时, $T=150$ K 和 300 K 条件下 $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ 禁带宽度 E_g 分别为 0.58 eV、 0.53 eV, 对应的截止波长 λ_c 分别为 $2.13 \mu m$ 、 $2.32 \mu m$; 实测截止波长如表 2 所示, 可见低温条件下实测值与理论计算值基本吻合。

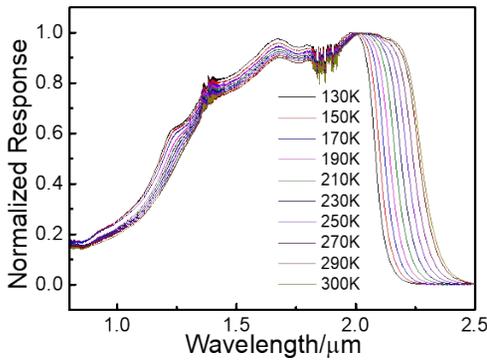


图 8 器件响应光谱及其温度特性

Fig. 8 Spectrum response of detectors versus temperature

表 2 不同温度下的峰值波长和峰值响应率、量子效率

Table 2 The measured peak wavelength, peak responsivity and quantum efficiency at different temperatures

温度 /K	截止波长/ μm	峰值波长/ μm	G	峰值响应率 A/W	量子效率 %
130	2.10	1.95	22	1.27	81
150	2.12	1.97	21	1.29	82
170	2.14	1.98	20	1.30	82
190	2.16	1.98	19	1.31	83
210	2.18	1.99	18	1.32	83
230	2.20	2.00	17	1.34	84
250	2.22	2.01	16	1.35	84
270	2.24	2.02	15	1.35	83
290	2.26	2.03	14	1.36	84
300	2.27	2.03	13	1.30	80

2.4 探测率分析

采用黑体作为辐射光源, 将所研制的线列探测器密封在真空杜瓦中, 对线列中的 $500 \times 500 \mu m^2$ 光敏元进行了信号测试, 并将杜瓦置于屏蔽盒中进行噪声测试, 信号测试条件: 黑体温度 900 K, 黑体孔径 8 mm, 固定测试距离 23.0 cm, 测试环境温度 300 K, 测试频率带宽 80 Hz。采用以下公式计算了探测率:

$$P = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{2\sqrt{2}\pi L^2} \times \frac{\pi d^2}{4} \times A_D \quad (3)$$

$$D_{bb}^* = \frac{V_s/V_N}{P} \sqrt{A_D \Delta f} \quad (4)$$

$$D_{\lambda_c}^* = G \times D_{bb}^* = G \times \frac{V_s/V_N}{P} \sqrt{A_D \Delta f} \quad (5)$$

式(3)中: P 代表黑体辐射功率, L 为黑体辐射孔和探测器距离, σ 为斯忒潘常数, T_1 为黑体温度, T_2 为调制盘温度(一般是室温), d 为黑体出射孔直径, A_D 为光敏区面积。

式(4)中, V_s 为信号电压, V_N 为噪声电压, Δf 为带宽;

式(5)中, G 为 G 因子^[18], 取值如表 2 所示。

探测器在不同温度下的信号与噪声测试结果如图 9 所示, 测试结果表明: 信号随温度的升高呈单调变大, 而噪声先是缓慢增加, 当温度高于 230 K 后呈非线性增大, 峰值探测率在 150 K 达到 $1.02 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值响应率 1.29 A/W, 量子效率 82% 。

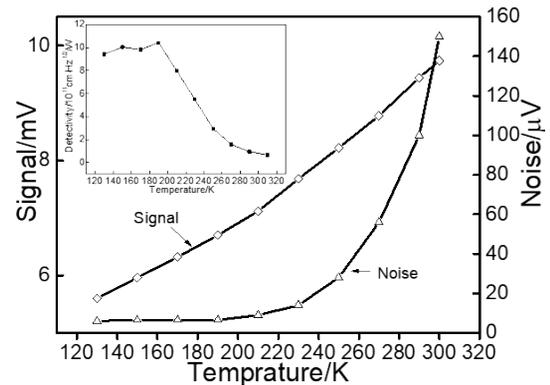


图 9 信号及噪声与温度的关系

Fig. 9 Signal and noise versus temperature

3 结论

研制了平面型延伸波长的测试结构短波红外 InGaAs 探测器, 测试并分析了探测器在不同温度下的光电性能。在 $260 \sim 300$ K 的温度范围内, 提取的 E_g 为 0.50 eV, 这与 $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ 的相应带隙 (E_g) 非常接近, 说明平面型器件 PN 结侧面漏电流已得到有效抑制, 实现了扩散电流占主导的状态; 随着温度的降低, 器件逐渐变为以产生复合电流主导的状态。 150 K 下器件响应截止波长为 $2.12 \mu m$, 峰值探测率为 $1.01 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值响应率为 1.29 A/W, 量子效率为 82% , 并显示出良好的暗电流性能。

后续进一步优化材料生长参数,降低缺陷密度,预期器件性能将进一步提高,并在 2.2 μm 大面阵焦平面器件研制中推广应用。

References

- [1] M D Michael, H Andrew, G Jon, *et al.* InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging [J]. *Proc. SPIE*, 2011, **8012**:801221-1-801221-10.
- [2] J Battaglia, M Blessinger, M Enriquez, *et al.* An uncooled 1280 \times 1024 InGaAs focal plane array for small platform, shortwave infrared imaging [J]. *Proc. SPIE*, 2009, **7298**:72983C-1-72983C-8.
- [3] ZHU Yao-Ming, LI Yong-Fu, LI Xue, *et al.* Extended-wavelength 640 \times 1 linear InGaAs detector arrays using N-on-P configuration for back illumination [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2012, **31**(1):11-15. (朱耀明,李永富,李雪,等. 基于 N-on-P 结构的背照射延伸波长 640 \times 1 线列 InGaAs 探测器 [J]. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(1):11-15.
- [4] A M S Gloude-mans, H Schrijver, Q Kleipool, *et al.* The impact of SCIAMACHY near-infrared instrument calibration on CH₄ and CO total columns [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, **5**:2369 - 2383.
- [5] G Hopkinson, L G Rojasa, M Skipper, *et al.* Testing of InGaAs, microbolometer and pyroelectric detectors in support of the Earth CARE mission [J]. *Proc. SPIE*, 2020, **7106**:710610-1-710610-12.
- [6] Yong Gang Zhang, Yi Gu, Kai Wang, *et al.* Properties of gas source molecular beam epitaxy grown wavelength extended InGaAs photodetector structures on a linear graded InAlAs buffer [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2008, **23**(12):125029.
- [7] Olsen G, Joshi A, Mason S, *et al.* Room-Temperature InGaAs Detector Arrays For 2.5 μm [J]. *Proc. SPIE*, 1990, **1157**:276-282.
- [8] P Mushini, W Huang, M Morales, *et al.* 2D SWIR Image sensor with extended wavelength cutoff of 2.5 μm on InP/InGaAs epitaxial wafers with graded buffer layers [J]. *Proc. SPIE*, 2016, **9819**:98190D-1-98190D-9.
- [9] Gregory H Olsen, Michael J Lange. Three-band 1.0-2.5 μm near-infrared InGaAs detector array [J]. *Proc. SPIE*, 1994, **2225**:151-159.
- [10] Martin H Ettenberg, Hai Nguyen, Christopher R Martin. High Resolution 1.3 Megapixel Extended Wavelength InGaAs [J]. *Proc. SPIE*, 2018, **10624**:1062404-1-1062404-7.
- [11] Kazuhiko Itaya, Mark J Mondry, Philip D Floyd, *et al.* Impurity-Induced Disorder of AlGaInAs Quantum Wells by Low Temperature Zn Diffusion [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1996, **25**(4):565 - 569.
- [12] Wintner E, Ippen E P, *et al.* Nonlinear carrier dynamics in Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y} compounds [J]. *Applied Physics Letters*, 1984, **44**(10):999-1001.
- [13] Wichman A R, Dewames R E, Bellotti E. Three-dimensional numerical simulation of planar P⁺n heterojunction In_{0.53}Ga_{0.47}As photodiodes in dense arrays part I: dark current dependence on device geometry [J]. *Proc. of SPIE*, 2015, **9070**:907003-1-907003-21.
- [14] DENG Hong-Hai. Study on high-performance planar InGaAs short wavelength infrared detector [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2013, pp26. (邓洪海. 高性能平面型 InGaAs 短波红外探测器研究 [D]. 中国科学院大学, 2013, pp26.)
- [15] DENG Hong-Hai, TANG Heng-Jing, Li Tao, *et al.* The temperature-dependent photoresponse uniformity of InGaAs sub-pixels infrared detector by LBIC technique [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, **27**(115018):1-5.
- [16] Goetz K H, Bimberg D, Jurgensen H, *et al.* Optical and crystallographic properties and impurity incorporation of Ga_xIn_{1-x} (0.44 < x < 0.49) grown by liquid phase epitaxy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(8):4543-4552.
- [17] Sjal P, Roy J B, Basu P K. Empirical expressions for the alloy composition and temperature dependence of the band gap and intrinsic carrier density in Ga_xIn_{1-x}As [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, **69**(2):827-829.
- [18] Kang Rong, LI Li-Hua, PENG Man-Ze, *et al.* How to Determine the Peak Detectivity from Measuring Blackbody Detectivity—the Calculation of Factor G [J]. *Infrared technology*, 2005, **27**(3):263-265. (康容,李立华,彭曼泽,等. 由黑体 D_{bb}^{*} 确定峰值 D _{λ} ^{*} 以及黑体波段 D _{$\Delta\lambda$} ^{*} ——G 因子的计算 [J]. *红外技术*), 2005, **27**(3):263-265.