材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260210002

原位热退火对1.8 μm延伸波长InGaAs探测器性能的影响

李水星[1,2]，张桂雪[1]，刘博文[1,2]，杨力怡[1]，夏润泽[1]，于春蕾[1*]，顾　溢[1*]，朱宪亮[1]，李　淘[1]，邵秀梅[1]，李　雪[1]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室，上海 200083；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 文章研究了1.8 μm延伸波长InGaAs材料与焦平面阵列（FPA）性能的关联性，重点关注失配体系中常用的材料原位退火工艺对该材料缺陷的影响。基于分子束外延技术生长的晶格失配的4英寸（1英寸＝2.54 cm）$In_{0.57}Ga_{0.43}As$材料，研究原位热退火处理对外延材料质量的影响。采用未退火与退火后材料，分别研制了640×512平面型$In_{0.57}Ga_{0.43}As$探测器FPA。与基于未退火材料制备的FPA相比，采用700℃退火材料制备的FPA暗电流增大两倍，非均匀性、探测率、盲元率等指标均有不同程度的劣化，表明原位热退火处理并不适用于改善截止波长1.8 μm低失配的$In_{0.57}Ga_{0.43}As$焦平面探测器阵列性能。而在223 K下所制备的FPA实现了0.79 nA/cm^{2}的低暗电流密度与2.7×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}的探测率，表明保持材料未退火状态可实现波长延伸与高性能之间的良好平衡。

关键词： 铟镓砷；焦平面；热退火；延伸波长

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0521－07

Effect of In-Situ Thermal Annealing on Key Performance of 1.8 μm Extended-Wavelength InGaAs Focal Plane Array Detectors

LI Shuixing[1,2], ZHANG Guixue[1], LIU Bowen[1,2], YANG Liyi[1], XIA Runze[1], YU Chunlei[1], GU Yi[1], ZHU Xianliang[1], LI Tao[1], SHAO Xiumei[1], LI Xue[1]

(1. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In this study, we investigated the correlation between 1.8 μm extended-wavelength InGaAs material properties and the performance of focal plane arrays (FPAs), with a particular focus on the impact of in-situ annealing, which is a commonly used optimization technique in lattice-mismatched systems. Using lattice-mismatched 4-inch $In_{0.57}Ga_{0.43}As$ materials grown by molecular beam epitaxy (MBE), the influence of in-situ thermal annealing on the quality of the epitaxial material was examined. Both as-grown and annealed materials were used to fabricate 640×512 planar-type InGaAs detector FPAs. Compared to the FPA fabricated from as-grown material, the FPA based on material annealed at 700°C exhibited a twofold increase in dark current, along with varying degrees of degradation in non-uniformity, detectivity, and the non-effective pixel factor.

收稿日期：2026－02－10.

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2022YFB3904803）；国家自然科学基金资助项目（62475272，62274169）；上海市自然科学基金资助项目（22ZR1472600）.

* **通信作者：**于春蕾，顾　溢

These results indicate that in-situ thermal annealing is not suitable for improving the performance of low-mismatch $In_{0.57}Ga_{0.43}As$ FPA detectors with a 1.8 μm cutoff wavelength. The fabricated FPA achieved a low dark current density of 0.79 nA/cm^2 and a detectivity of 2.7×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1} at 223 K, demonstrating an excellent balance between wavelength extension and device performance.

Key words: focal plane array; InGaAs; thermal annealing; wavelength-extended

0 引言

短波红外探测技术广泛应用于遥感、夜视、光通信、工业分选和气体检测[1-3]。$In_xGa_{1-x}As$因电子迁移率高、量子效率高且组分可调(覆盖0.9~2.6 μm),成为红外材料研究热点。传统的截止波长为1.7 μm的晶格匹配$In_{0.53}Ga_{0.47}As$材料已被广泛应用于高性能探测器。然而,为了满足对更长波段的探测需求,需通过增加In组分来使波长延伸。但这会导致外延层与InP衬底之间发生晶格失配,从而产生更多位错,增加缺陷密度,进而导致探测器的暗电流增大、量子效率降低、响应非均匀性变差等性能劣化问题[4]。因此,如何在实现波长延伸的同时,有效抑制材料和器件性能退化,是延伸波长InGaAs探测器技术发展的核心挑战。目前,已有截止波长在1.9 μm左右探测器的报道[4-5],但对延伸波长1.8 μm的InGaAs材料与器件性能的报道较少。

对于晶格失配较大的异质外延材料,失配应力通常从生长初期就会通过产生位错和晶圆翘曲得到有效弛豫,使得材料能够较快实现完全弛豫。引入较厚的缓冲层可将大部分位错限制在缓冲层内,阻止其向上层延伸[5-9]。对于截止波长为1.8 μm的InGaAs探测材料,将In组分提升至约0.57,对应的晶格失配仅为0.28%。为保证足够的量子效率,其光吸收层厚度需达到1~3 μm,这远超$In_{0.57}Ga_{0.43}As$/InP约150 nm的临界厚度。因此,该材料无法保持完全应变的赝晶生长状态,仍需实现完全弛豫。如何在较小晶格失配条件下获得低位错密度和低晶圆翘曲,是生长1.8 μm延伸波长InGaAs材料面临的主要挑战[12-13]。

在延伸波长InGaAs材料体系中,缺陷的演化规律与晶格失配度密切相关。材料退火是一种减少材料位错、改善材料质量的常用方法。对于截止波长为2.2 μm的$In_{0.75}Ga_{0.25}As$材料和截止波长为2.5 μm的$In_{0.83}Ga_{0.17}As$材料,其与InP衬底的晶格失配度高达约1.5%和2.06%。在此类大失配材料体系中,外延层内存在高密度的位错,热退火可以显著降低材料的缺陷密度并提升器件性能[14-15]。然而,针对晶格失配度更小的截止波长为1.8 μm的延伸波长InGaAs材料,退火工艺对其材料质量、缺陷行为及最终器件性能的影响尚缺乏研究。相比于更大失配的材料体系,较小的晶格失配会导致其位错产生以及弛豫机制不同,因此有必要探究针对大失配体系有效的退火工艺在轻微失配体系中的适用性,为后续工艺优化与性能提升提供实验依据。

实验制备了截止波长为1.8 μm的延伸波长640×512焦平面阵列(FPA),系统探究了原位热退火对截止波长为1.8 μm的$In_{0.57}Ga_{0.43}As$材料质量及最终器件性能的影响。对通过分子束外延生长的未退火与退火的$In_{0.57}Ga_{0.43}As$探测器材料进行相关材料表征与器件测试,明确了热退火处理对1.8 μm波段材料和探测器性能的实际影响。相关结论可为高性能延伸波长InGaAs焦平面探测器的研制提供理论依据与工艺参考。

1 实验过程

4英寸(1英寸=2.54 cm)InGaAs探测器晶圆采用分子束外延技术生长,图1展示了其材料结构示意图。整体结构自下而上依次为:625 μm半绝缘InP衬底,1.8 μm $In_xAl_{1-x}As$缓冲层(包含0.4 μm $In_{0.52}Al_{0.48}As$层、0.4 μm $In_xAl_{1-x}As$层和1 μm重掺杂n型$In_{0.57}Al_{0.43}As$层,掺杂浓度为2×10^{18} cm^{-3}),轻掺杂n型$In_{0.57}Ga_{0.43}As$吸收层(掺杂浓度为5×10^{15} cm^{-3})以及轻掺杂n型$In_{0.57}Al_{0.43}As$(掺杂浓度为3×10^{16} cm^{-3})。在样品结构生长完成后立即进行原位热退火处理,并保持砷气氛围,防止高温下砷原子脱附。设计了退火温度分别为660℃,680℃,700℃,720℃和750℃的五组实验,每组实验样品均从550℃开始升温达到目标退火温度,并在最高温度下保持20 s,再降温至550℃。原位热退火过程中升温速率和冷却速率均为20℃/min。采用配备液氮制冷InSb探测器、GaF_2分束器、532 nm波长激光激发光源、集成光路组件及光谱测量分析计算机的

Thermo Scientific Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪进行光致发光(PL)表征。利用透射电子显微镜(TEM)对外延材料进行截面表征，TEM 分析可直观呈现缺陷的情况来系统评估原位热退火对材料缺陷的影响。

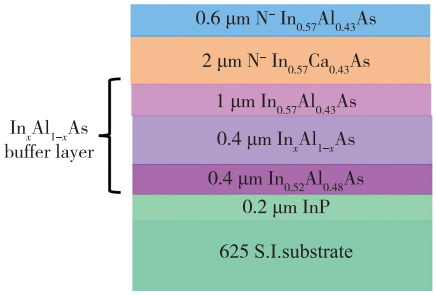


图 1　InGaAs 外延片材料结构示意图

基于退火与未退火材料制备了平面型 640×512 InGaAs 焦平面阵列，其器件三维结构及截面分别如图 2 和图 3 所示。

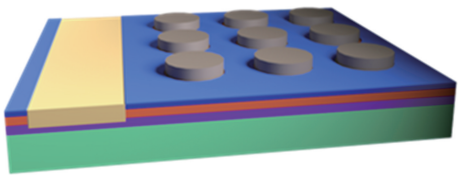


图 2　InGaAs 外延片材料三维结构示意图

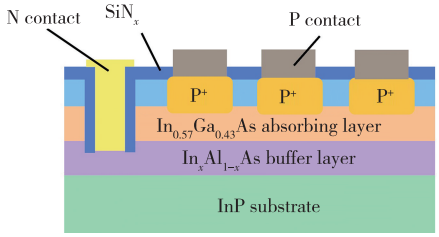


图 3　InGaAs 芯片截面结构示意图

首先利用 InGaAs 外延片为衬底，采用金属有机化学气相沉积技术实现 p 型掺杂。Zn 主要通过金属有机物前驱体的分解扩散进入半导体晶格，形成间隙位或替位式 Zn。通过磁控溅射及金属剥离工艺制备 p 型电极和 n 型电极，SiN_x 在此制备过程中作为掩模层和钝化层。使用 Agilent B1500A 半导体参数分析仪在室温下测量探测器芯片不同位置的暗电流，从而对像素间的均匀性进行统计评估。随后对晶圆背面进行减薄抛光，并沉积增透膜。通过铟柱将探测器芯片与 640×512 读出集成电路(ROIC)进行混成互连，使每个像元的 p 端通过铟柱与对应的 ROIC 输入节点相连。最终，将焦平面阵列进行引线键合并封装于金属管壳中，以用于性能表征实验。采用黑体响应测试系统对制备的焦平面阵列进行光电性能表征，该系统通过黑体辐射照射探测器阵列，经光电转换产生光电流信号。该电流信号首先经过跨阻前置放大器放大为电压信号，再通过锁相放大器进行频率与相位选择处理。通过该测试系统最终可获得包括信号电压、暗信号电压、暗噪声电压、非均匀性、探测率(D^*)在内的多项探测器参数。

2　分析与讨论

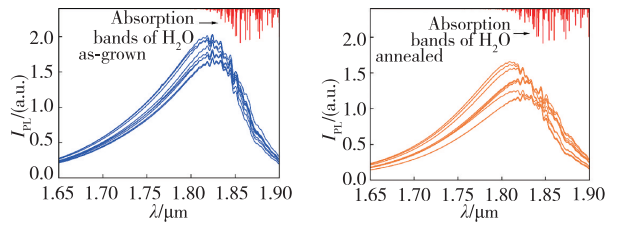
2.1　材料表征

所有外延片均呈现光亮表面，晶圆翘曲度小于 20 μm。前期通过 PL 测试研究了不同退火温度的样品，发现当原位热退火温度低于 700℃时，与未退火材料相比退火材料未观察到材料性能有显著变化；然而当退火温度高于 700℃时，随着退火温度升高，PL 强度显著减弱。这表明对于 $In_{0.57}Ga_{0.43}As$ 外延材料，当退火温度不高时热退火并不能显著改善材料质量，而在过高温度退火后反而可能引入砷反位缺陷作为非辐射复合中心，俘获载流子并降低 PL 强度[16]。因此，本研究主要对 700℃退火样品与未退火样品进行对比分析。

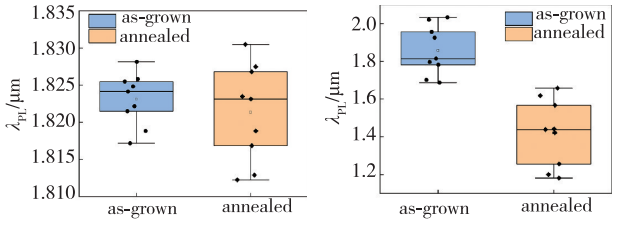
图 4(a)和(b)分别展示了未退火与 700℃退火材料的 PL 测试结果，在每个外延片各选取 9 个不同位置进行测试。PL 曲线中箭头指出的波动(红色线条)源自测试环境中的水汽干扰。图 4(c)和(d)统计了两个样品所有测试位置 PL 波长与强度的平均值。可以看出，未退火样品的 PL 强度明显高于退火样品，说明其非辐射复合较少，材料质量较好。未退火样品的 PL 波长箱形图显示出更窄的四分位距和更集中的数据分布，说明其均匀性也更好。上述结果与大失配体系的研究结果截然不同，文献中报道对于失配度较大的 2.2 μm 的 $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ 材料和 2.5 μm 的 $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ 材料，退火可显著提升 PL 强度，表明退火有效修复了其高密度的非辐射复合中心[14-15]。然而，在 1.8 μm 轻微失配体系中，由于初始晶格失配度较小、质量较高，退火引入的热损伤可能超过了其对位错的修复作用，造成热退火过程局部组分不均匀或缺陷聚集[17]。

为获得 $In_xAl_{1-x}As$ 缓冲层中的位错情况，采用 TEM 对样品材料的截面进行表征，结果如图 5 所示。黄色虚线标注区域为 $In_xAl_{1-x}As$ 缓冲层，其作

用在于缓解 $In_{0.57}Ga_{0.43}As$ 吸收层与 InP 衬底间的晶格失配应力，并将位错限制在缓冲层内以保护吸收层。从 TEM 图像可以看出，位错集中分布在缓冲层底部附近。未退火样品存在明显位错的区域，其厚度为 122 nm，经热退火后位错区域厚度增至 217 nm，且位错终止位置更靠近 $In_{0.57}Ga_{0.43}As$ 吸收层。在 $In_xAl_{1-x}As$ 缓冲层顶部与底部分别存在两个无失配位错（MD）区域[18-19]。根据 Tersoff 理论[18]，Z_c 为顶部无 MD 区域的边界，该区域内几乎不存在位错，无 MD 区域的厚度反映了阻隔位错的有效性。对于退火样品，其无 MD 区厚度为 117 nm，较未退火样品的 189 nm 更薄。已有研究表明[14-15]，在大失配体系 2.2 μm 和 2.5 μm 材料中，热退火能显著降低外延层上部的穿透位错密度，并使界面处的位错分布更加规整。通过结果对比可以看出，在小失配材料体系的低应变环境下，热退火并未显著降低位错密度，反而可能由于热应力诱导了位错向吸收层方向的延伸，位错发生攀移等运动[20-22]改变了其在缓冲层中的分布以及位错层和无 MD 区的厚度，这种变化可能受到结构与工艺的共同影响。



（a） 未退火材料不同位置的 PL 谱　（b） 经700℃,20 s原位热退火处理材料不同位置的PL谱



（c） 两种材料 PL 波长非均匀性的箱线图　（d） 两种材料 PL 强度非均匀性的箱线图

图 4　未退火与退火材料 PL 结果分析

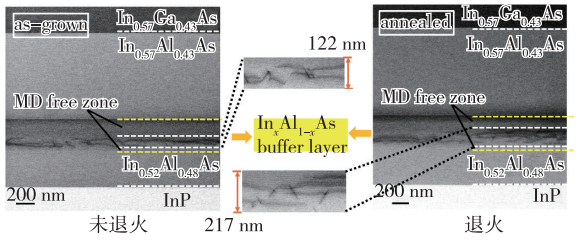
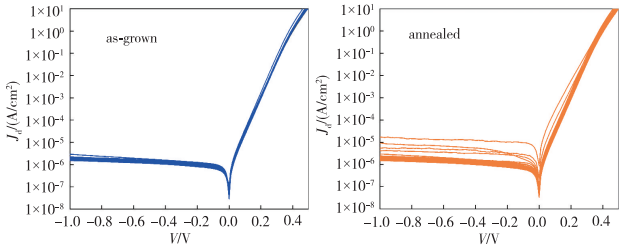


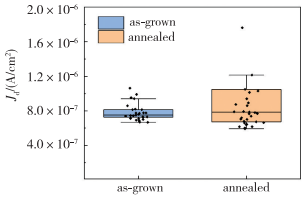
图 5　未退火与退火材料 TEM 结果

2.2　探测器芯片制备与性能测试对比

基于上述研究的未退火与原位热退火材料，制备了 640×512 平面型 InGaAs 探测器芯片。由于阵列像元数量众多，难以逐个像元对暗电流进行测量。因此，在芯片阵列上选取 6 个大小相似的区域（左上、中上、右上、左下、中下、右下），在每个区域随机选取 5 个像元在室温下进行暗电流测试。图 6（a）和（b）分别为未退火样品与原位热退火样品的暗电流结果。在 −0.1 V 偏压下对所有测试像元暗电流进行统计分析，未退火样品的暗电流密度平均值为 9.04×10^{-5} A/cm²，而退火样品为 2.32×10^{-4} A/cm²。这表明在相同条件下，未退火样品具有更低的暗电流密度。图 6（c）为两个样品在 −0.1 V 偏压下的暗电流密度统计箱形图。通过计算得到未退火和退火样品暗电流密度非均匀性分别为 0.048% 和 0.136%。从图中也可以直观看出，基于未退火材料制备的探测器芯片，其暗电流密度分布更为集中，表现出良好的均匀性。相比之下，材料原位退火处理的样品，数据分布范围更广，离散程度更高，均匀性显著下降。这可能与材料的缺陷特性相关，退火处理非但未能有效抑制暗电流，反而可能因退火处理后材料缺陷分布的不均匀性[21]，导致器件的电学性能的劣化。



（a）未退火样品　（b）退火样品



（c）两个样品在 −0.1 V 偏压下的暗电流密度统计箱形图

图 6　室温下器件暗电流密度统计分析

2.3　焦平面探测器性能

通过铟柱将探测器芯片 640×512 读出电路混成互连得到 InGaAs 焦平面探测器阵列。为评估所制备焦平面探测器的光电性能及验证退火工艺的

影响，将 640×512 InGaAs FPA 封装于金属管壳中，并通过三级热电制冷（TEC）系统冷却至 223 K 进行测试，测试结果包括暗噪声、光信号、像素良率及 D^*。在 223 K 温度、1 ms 积分时间下获得的 FPA 光电性能参数如表 1 所示。探测率是衡量探测器探测微弱光信号能力的综合指标，D^* 越高说明探测器能探测到的最小光信号越弱，探测能力越强。通常用峰值波长处的峰值探测率 $D^*_{\lambda p}$ 来描述器件的性能，可以用黑体探测率 D^*_{bb} 和 G 因子的乘积来计算，其具体计算公式为：

$$D^*_{\lambda p} = G \times D_{bb} \tag{1}$$

黑体探测率 D^*_{bb} 计算公式为：

$$D^*_{bb} = \frac{V_s}{V_n} \times \frac{\left(A_d \triangle f\right)^{\frac{1}{2}}}{P_s} \tag{2}$$

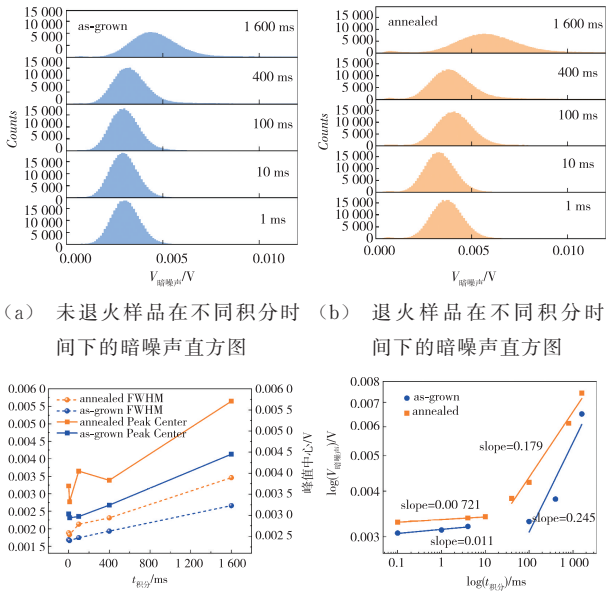
式中，V_s 为探测器信号电压，V_n 为探测器噪声电压，P_s 为黑体辐射功率，$\triangle f$ 为带宽。

表 1　对应的 FPA 光电参数

	As-grown	Annealed
像素间距/μm	15	15
积分时间/ms	1	1
非均匀性/%	3.30	3.89
盲元占比/%	0.214	0.321
D^*/(cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1})	2.7×10^{12}	2.3×10^{12}

表 1 中计算的 D^* 为峰值探测率。在相同积分时间下，二者的 D^* 分别达到 2.7×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1} 和 2.3×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，满足对探测器高灵敏度的检测要求。像元良率超过 99.7% 也说明了制备的焦平面阵列具有优异的均匀性与工艺成熟度。

图 7 进一步分析了退火对焦平面阵列性能的影响。如图 7(a)和(b)所示，无论是未退火还是退火处理的焦平面阵列，其暗噪声电压分布均呈现典型的高斯分布特征，且随着积分时间从 1 ms 增加至 1 600 ms，分布的平均值与宽度也随之增加。通过对噪声统计特性的高斯分布曲线进行定量分析[23]，统计了峰值中心和半高全宽（FWHM），结果如图 7(c)所示。在所有积分时间下，退火器件的 FWHM 均高于未退火器件。峰值中心代表平均暗电压，退火器件的峰值中心略高于未退火器件，发现退火处理并未改善器件的噪声性能。进一步分析暗噪声与积分时间的双对数关系，如图 7(d)所示。可以发现，两种器件的拟合斜率在较短积分时间内均接近零且基本一致，说明噪声主要受读出电路噪声主导，退火处理对器件的主要噪声来源改善有限。通过暗信号拟合在 223 K 温度下提取得到未退火焦平面的暗电流为 0.793 nA/cm^2，低于退火焦平面暗电流 1.605 nA/cm^2。综合分析来看，退火处理以牺牲器件关键灵敏度性能为代价，未退火器件保持了更高的 D^*(2.7×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1})和更低的非均匀性(3.30%)。未退火焦平面阵列的盲元占比为 0.214%，也低于退火器件的 0.321%，这很可能受到缺陷或位错相关的材料质量的影响[24]。



（a）未退火样品在不同积分时间下的暗噪声直方图　（b）退火样品在不同积分时间下的暗噪声直方图

（c）不同积分时间下直方图的半高全宽与峰值中心　（d）223 K 下不同积分时间暗噪声对数对比图

图 7　未退火样品与退火样品暗噪声分析

器件性能的对比进一步验证了热退火对不同失配材料体系影响的差异。2.2 μm FPA 在经过最优温度退火后，其暗电流密度实现了约一个数量级的下降，峰值探测率显著提升[14]。在 2.5 μm 材料体系中，退火可使探测器暗电流降低约 5.7 倍[15]。但是本研究中 1.8 μm FPA 在退火后暗电流增大两倍，且盲元率和非均匀性均有所恶化，这表明针对大失配体系有效的退火工艺并不适用于 1.8 μm 延伸波长探测器。

为获得 1.8 μm 波长 InGaAs 焦平面阵列响应光谱特性，在室温下利用傅里叶红外光谱仪测试处理得到了两个焦平面阵列的归一化响应光谱，如图 8 所示。二者的 50% 截止波长均为 1 800 nm，峰值响应波长位于 1 600～1 700 nm 范围内。为提升探测效果，常通过降低工作温度以减小焦平面阵列暗电流，但这会进一步导致截止波长蓝移。当工作温度降至 223 K 时，计算可得 50% 截止波长缩短至

约 1 740 nm，峰值响应波长也偏移至 1 500～1 600 nm[25]。此外，两个器件的光谱曲线也表现出较高一致性，说明退火工艺对材料的带隙宽度与光吸收特性影响较弱。

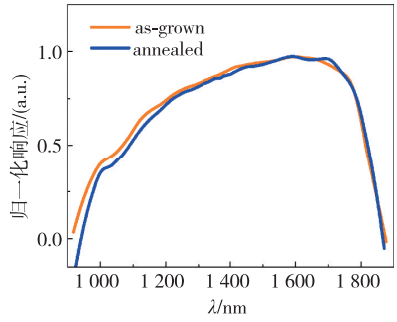


图 8 室温下测得的归一化光谱响应曲线

2.4 焦平面探测器性能对比

实验制备的 1.8 μm FPA 除波长延伸外，另一关键优势在于其宽温域兼容性与高性能特性。为评估所制备器件的适用范围及性能，与调研的行业内其他相近截止波长 InGaAs 探测器进行比较，分析了暗电流密度与温度及波长的关系如图 9 和图 10 所示。

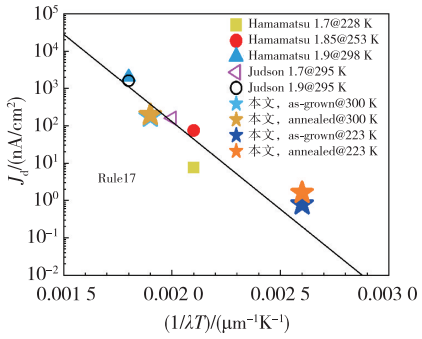


图 9 文献报道与本研究制备焦平面阵列的暗电流密度 J_d 与截止波长 λ 及工作温度 $1/\lambda T$ 的关系

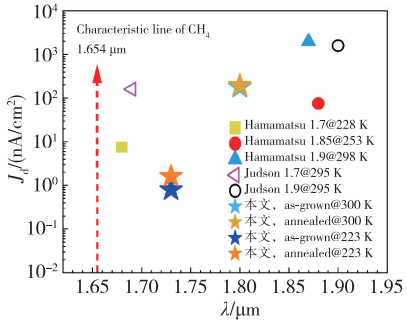


图 10 不同截止波长下文献报道器件与本工作制备焦平面阵列的暗电流密度对比

从图 9 中可以看出，在室温下测得的暗电流密度接近 200 nA/cm²，当工作温度降 223 K 时，器件的暗电流密度降至 1 nA/cm²量级，均接近 Rule 17 的预测曲线[26-28]，甚至室温暗电流密度低于该理论预测值。图 10 则更直观地对比了不同截止波长器件的暗电流性能，在宽温域范围内的低暗电流特性赋予了其极大的应用灵活性，使焦平面阵列具有较广的适用场景。对成本与系统复杂度要求较低的一般探测领域，可以显著简化系统制冷设计使器件可在室温下工作；而对绝对灵敏度要求较为严格的高精度探测领域，在 223 K 工作温度下 1 nA/cm²的低暗电流可提供可靠的高性能保障。因此，该波段焦平面阵列既能作为高性价比的非制冷探测器，也可作为高性能制冷型探测器。

3 结论

本文研制截止波长 1.8 μm 的 640×512 FPA，并研究原位热退火对轻微晶格失配材料的作用。热退火对于 2.2 μm 和 2.5 μm 大失配体系是有效的优化方法，但对于 1.8 μm 等轻微失配体系材料质量和最终器件性能并无明显改善效果。所制备的延伸波长 InGaAs 探测器芯片在室温下的暗电流密度约为 178 nA/cm²，在 223 K 温度下降至 0.79 nA/cm²；FPA 在 223 K 温度下的探测率达到了 2.7×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，像元良率超过了 99.7%。结果表明，1.8 μm 焦平面探测器可在宽温域范围内工作，并在 223 K 温度下具有低暗电流与高探测率，实现了波长延伸、高探测器性能与广泛适用性之间的良好平衡，高度契合不同应用场景下的探测需求。

参考文献：

[1] Cheng J, Li X, Shao X, et al. Planar wavelength-extended $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ detector with 2.2-μm cut-off wavelength [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(5): 804-809.

[2] Cao J, Li T, Wang H, et al. Study on InP/InGaAs heterostructure detector with unintentionally doping absorption laye [J]. Infrared and Laser Engineering. 2021, 50(11): 20210073.

[3] 李 雪，邵秀梅，李 淘，等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. 红外与激光工程，2020，49(1)：56-63.
Li Xue, Shao Xiumei, Li Tao, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(1): 56-63.

[4] Yu J, Fu Y, Lu L, et al. Extended shortwave infrared T2SL detector based on AlAsSb/GaSb barrier optimization [J]. Micromachines, 2025, 16(5): 575.

[5] De Kernier I, Wanwanscappel Y, Boutolleau D, et al. C-RED 2 ER: high speed extended range InGaAs cameras[J]. Proc. of SPIE, 2022, 12191: 121912M.

[6] Seshadri S, Cole D M, Hancock B, et al. Comparing the low-temperature performance of megapixel NIR InGaAs and HgCdTe imager arrays[J]. Focal Plane Arrays for Space Telescopes III, 2007, 6690: 669006.

[7] Quitoriano N J, Fitzgerald E A. Relaxed, high-quality InP on GaAs by using InGaAs and InGaP graded buffers to avoid phase separation[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(3): 033511.

[8] Chen X Y, Zhang Y G, Gu Y, et al. GaAs-based $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ photodetector structure grown by gas source molecular beam epitaxy[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 393: 75-80.

[9] Kumar R, Bag A, Mukhopadhyay P, et al. Comparison of different grading schemes in InGaAs metamorphic buffers on GaAs substrate: tilt dependence on cross-hatch irregularities[J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 922-930.

[10] Jiao Z J, Guo T Y, Gu Y, et al. Recombination lifetimes and mechanisms of $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ and $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ as a function of doping density[J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 141: 105462.

[11] Chauveau J M, Cordier Y, Kim H J, et al. Interplay between relaxation, surface morphology and composition modulation in InAlAs graded buffer layers[J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 251(1-4): 112-117.

[12] Bean J C, Sheng T T, Feldman L C, et al. Pseudomorphic growth of Ge_xSi_{1-x} on silicon by molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 1984, 44(1): 102-104.

[13] Li Q, Lau K M. Epitaxial growth of highly mismatched III-V materials on (001) silicon for electronics and optoelectronics[J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2017, 63(4): 105-120.

[14] Liu B, Gu Y, Huang W, et al. Effects of *in—situ* thermal annealing on metamorphic InGaAs photodetector materials grown by molecular beam epitaxy[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2023, 165: 107656.

[15] Wang S, Ma Y, Liu Y, et al. Dislocation evolvement in metamorphic $In_{0.83}Ga_{0.17}As$/InP photodetectors through ex-situ rapid thermal annealing[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2022, 58(3): 4000107.

[16] Naz N A, Qurashi U S, Zafar Iqbal M. Thermal annealing behaviour of deep levels in as-grown p-type MOCVD GaAs[J]. Physica B: Condensed Matter, 2009, 404(23-24): 4977-4980.

[17] Balagula R M, Jansson M, Yukimune M, et al. Effects of thermal annealing on localization and strain in core/multishell GaAs/GaNAs/GaAs nanowires[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 8216.

[18] Tersoff J. Dislocations and strain relief in compositionally graded layers[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(7): 693-695.

[19] Arif O, Canal L, Ferrari E, et al. Influence of an overshoot layer on the morphological, structural, strain, and transport properties of InAs quantum wells[J]. Nanomaterials, 2024, 14(7): 592.

[20] Re M, Scalese S, Mirabella S, et al. Structural characterisation and stability of $Si_{1-x}Ge_x$/Si (100) heterostructures grown by molecular beam epitaxy[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 227-228: 749-755.

[21] Wang H, Gu Y, Yu C, et al. Direct correlation of defects and dark currents of InGaAs/InP photodetectors[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 123: 105540.

[22] Weertman J. Theory of steady-state creep based on dislocation climb[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(10): 1213-1217.

[23] Li X, Gong H, Fang J, et al. The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 80: 112-119.

[24] Li C, Zhang Y G, Gu Y, et al. Analysis and evaluation of uniformity of SWIR InGaAs FPA - Part II: processing issues and overall effects[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 58: 69-73.

[25] Higashi T, Yamamoto T, Ogita S, et al. Experimental analysis of temperature dependence of oscillation wavelength in quantum-well FP semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1680-1689.

[26] Ma Y, Deng S, Cheng J, et al. Towards surface leakage free high fill-factor extended wavelength InGaAs focal-plane arrays[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(6): 4200208.

[27] Zhang Y G, Gu Y, Chen X Y, et al. IGA-rule 17 for performance estimation of wavelength-extended InGaAs photodetectors: validity and limitations[J]. Applied Optics, 2018, 57(18): D141-D144.

[28] Zhang Y G, Gu Y, Chen X Y, et al. An effective indicator for evaluation of wavelength extending InGaAs photodetector technologies[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 83: 45-50.

作者简介：

李水星(2001—)，硕士生研究生，主要从事短波红外探测器方面的研究；

于春蕾(1992—)，高级工程师，博士，主要从事短波红外探测器方面的研究；

顾　溢(1982—)，研究员，博士，主要从事Ⅲ-Ⅴ族材料分子束外延生长、Ⅲ-Ⅴ族半导体激光器与红外光电探测器研制工作。