

InAs/GaSb II 类超晶格长波焦平面红外探测器 应力适应性研究

薛勇^{1,2}, 徐庆², 黄敏², 王珍², 梁钊铭², 徐庆庆², 白治中^{2*}, 陈建新^{2*}

(1. 上海大学微电子学院, 上海 201800;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 超晶格长波红外焦平面探测器工作在低温条件下, 探测器各层材料之间热膨胀系数的差异会引起探测器形变产生热应力, 进而影响探测器的光电性能。本研究设计了两种应力调控方法的结构模型, 实现了超晶格探测器应力的调控。探讨了不同应力作用下 InAs/GaSb II 类超晶格长波焦平面红外探测器的暗电流和光谱响应的变化。研究表明, 在 -10.7~131.9 MPa 应力区间内, 探测器光电性能变化幅度小。对探测器进行了温度冲击试验, 探测器显示出高可靠性。研究结果对于 InAs/GaSb II 类超晶格长波焦平面红外探测器的结构设计具有指导意义, 为其性能和可靠性评估提供了依据。

关键词: InAs/GaSb 超晶格; 焦平面; 长波探测器; 应力; 可靠性

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Research on stress adaptability of InAs/GaSb type II superlattice long-wave focal plane infrared detectors

XUE Yong^{1,2}, XU Qing², HUANG Min², WANG Zhen², LIANG Zhao-Ming², XU Qing-Qing²,
BAI Zhi-Zhong^{2*}, CHEN Jian-Xin^{2*}

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The superlattice long-wavelength infrared focal plane detectors operate at low temperatures. The differences in the thermal expansion coefficients among the various material layers of the detectors can lead to deformation and generate thermal stress, which in turn affects the optoelectrical performance of the detector. This study designed two structural modules to achieve the regulation of stress in the superlattice detectors. The changes in the dark current and spectral response of InAs/GaSb type II superlattice long-wave infrared focal plane detectors under different stress conditions were explored. The research indicates that within the stress range of -10.7 MPa to 131.9 MPa, the variation in the optoelectrical performance of the detector is small. The detector was subjected to a temperature shock test, and it demonstrated high reliability. The research results provide guidance for the structural design of InAs/GaSb type II superlattice long-wave infrared focal plane detectors and offer a basis for their performance and reliability assessment.

Key words: InAs/GaSb superlattice, focal plane, long-wave detector, stress, reliability

收稿日期: 2025-02-17, 修回日期: 2025-03-10

Received date: 2025-02-17, Revised date: 2025-03-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB0980000); 国家自然科学基金(62335017、62222412、62104236、62104237); 上海市扬帆计划(22YF1455800、21YF1455000); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金(CX-513、CX-567)

Foundation items: Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDB0980000); the National Natural Science Foundation of China (62335017, 62222412, 62104236, 62104237); the Shanghai Sailing Program (22YF1455800, 21YF1455000); the Special Innovation Program of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (CX-513, CX-567)

作者简介(Biography): 薛勇(1999—), 男, 湖南长沙人, 硕士学位, 主要研究领域为 InAs/GaSb II 类超晶格封装技术

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: baizz@mail.sitp.ac.cn; jianxinchen@mail.sitp.ac.cn

引言

红外焦平面探测器作为红外成像系统的核心部件,其可靠性对整个红外成像系统的性能起着至关重要的作用,同时也是制约其工程化应用的关键因素之一。探测器的可靠性评估可以细化至焦平面芯片、杜瓦和制冷机等部分^[1],其主要的失效模式包括钢柱互连疲劳失效、像元性能退化、真空失效、引线键合失效以及芯片粘接失效。其中,焦平面芯片是可靠性评估的重点对象,而热应力是目前影响焦平面芯片可靠性的主要因素之一。红外焦平面探测器通常由光敏芯片、钢柱互连区、硅读出电路、引线基板等部分组成。由于这些材料的热膨胀系数存在差异,当红外探测器从室温降低至工作温度时,材料间的热失配将使得整个结构产生较大的低温形变和热应力^[2-3]。这种跨尺度应力将导致红外探测器出现光电性能退化、分层现象,甚至芯片开裂进而失效。此外,红外焦平面探测器的应力受到材料特性、阵列规模和结构等因素的影响。在不同的报道中,探测器应力有所不同,最大应力可高达数百兆帕,最小应力则可低至十几兆帕^[4-9]。为提升芯片可靠性并抑制热应力,目前采取的方法主要有表面应力释放^[10]、冷台优化^[11]和平衡层设计^[12]等。

红外焦平面探测器的可靠性与制造过程紧密相关。对探测器的评价应结合工艺过程控制要求,对焦平面芯片的适配性进行系统性预判与多维度评估。应力对探测器光电性能的调控机制具有多维耦合特性,影响较为复杂,相关报道相对较少。目前,应力对红外探测器光电性能影响的研究主要涵盖以下几个方面:通过光谱响应研究应力对HgCdTe带隙的变化^[13];通过霍尔研究应力对HgCdTe载流子迁移率的影响^[14];通过暗电流研究应力应变对InSb二极管漏电流的影响^[15]。

II类超晶格材料(T2SLs)作为一种红外探测材料,凭借其独特的能带结构调控方式,在响应波长灵活可调(3~30 μm)^[16]、低俄歇复合率^[17-18]和小隧穿电流^[19]等方面具有很大的优势。在过去30年里,T2SLs已成为当前红外探测器,尤其是长波红外探测器的研究热点,并朝着大面阵、高性能、长波长和集成化方向持续发展。然而,T2SLs器件的应力适应性研究仍存在显著不足。仅有少量研究利用经验紧束缚方法计算了热应变器件下的带隙和截止波长,并在实验中(硅读出电路厚度分别为600 μm 、300 μm 和100 μm)观察到光谱响应的移动^[20],而针

对热应力对II类超晶格长波探测器电学性能影响的研究几乎处于空白状态。暗电流是衡量红外探测器性能的重要参数之一,其大小直接影响到探测器的灵敏度。随着焦平面探测器阵列规模的不断扩大,因热失配导致的失效现象在大面阵探测器中愈发明显,这已经成为大规模红外焦平面探测器发展过程中不可避免的问题。焦平面阵列规模不断扩大,对应力控制提出了更高的要求。因此,开展T2SLs长波焦平面红外探测器的应力适应性研究具有重要意义,为评估探测器可靠性提供指导和参考。

1 模型设计

本文采用320×256长波超晶格红外焦平面探测器芯片开展研究,利用分子束外延技术(MBE)在GaSb衬底上生长长波超晶格红外探测器外延材料,通过刻蚀工艺和钝化工艺获得像元台面结构,利用溅射工艺形成金属电极。探测器截止波长为10.4 μm ,像元中心距为30 μm ,芯片尺寸为10.4 mm×8.848 mm×0.003 mm,计算所用的结构参数见表1。探测器芯片与硅引线基板通过钢柱互连,进而形成实验模块。图1所示为本研究T2SLs探测器实验模块结构,该模块由三部分组成:上层为GaSb衬底和T2SLs光敏层,中间为互连层(钢柱和底充胶),下层为模拟读出电路的硅引线基板层。T2SLs光敏层产生的信号通过互连的钢柱阵列传输至硅引线基板。

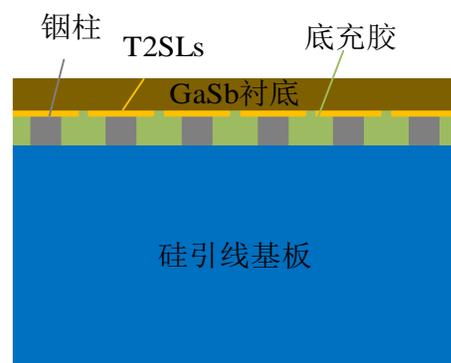


图1 T2SLs探测器实验模块结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of T2SLs detector experimental module

本文设计了两种应力调控方法,旨在实现不同区间应力的精确调制。方法I采用图1所示的模块结构,通过机械减薄工艺精确控制GaSb衬底厚度,

具体工艺流程如图2所示。整个模块可被视为一个弹性多层材料的系统,此类系统的热应力与各层材料的厚度以及膨胀系数有关^[21]。当此模块的多层结构从室温降至80 K低温时,由于各层材料膨胀系数存在差异,其自由收缩过程受到约束,进而产生热应力,致使该结构发生弯曲形变。以厚度最大的硅引线基板作为基本约束,在低温工作状态下,T2SLs光敏层受到拉应力作用。依据材料力学中薄膜的弯矩理论,结构的几何参数改变会影响其惯性矩,进而改变弯矩大小,弯矩的变化会对结构内部应力分布产生影响。因此,通过机械减薄控制GaSb衬底厚度,能够改变弯矩大小,从而实现探测器实验模块应力大小的调制,应力大小可通过有限元方法或多层薄膜弯矩形变公式近似计算。

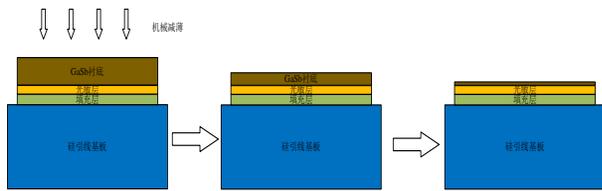


图2 调控方法I模块示意图

Fig. 2 Schematic diagram of module I

引入物理形变应力是实现应力调控的重要方法,本研究设计了应力调控方法II。如图3(a)所示,将去除衬底的II类超晶格焦平面探测器粘贴在金属压条上。金属压条一端固定,另一端可通过外力调节其形变。整个装置为一个微小版的悬臂梁,悬臂梁产生的应力与挠度、结构尺寸和材料参数等有关,但最大应力集中在固定端附近^[22]。通过对金属条进行上下调节,可以控制T2SLs芯片上的应力变化,其调节方法如图3(b)所示。仅考虑外力作用时,当金属条向上调动,芯片会受到压条的挤压。芯片为抵抗这种压缩,表现出压应力状态。依据胡克定律,在材料的弹性限度内,应力与应变成正比,而应变又与金属条向上的挠度程度相关。当向上挠度程度增大时,芯片的压缩应变增大,进而导致应力大小随之增加。同时,由于边缘效应,在芯片边缘区域,材料内部应力场的连续性受到破坏。根据弹性力学理论,边界条件的特殊性使得应力在边缘处无法像在芯片内部均匀分布,从而导致芯片边缘应力出现集中现象。当金属压条向下调节时,芯片受到拉伸作用,芯片上呈现为张应力状态。同理,应力大小随向下挠度程度的增大而增大。从弹性力学中应力分布的一般规律来讲,无论是压应力

还是张应力,应力沿受力方向的分布趋势具有相似性,只是应力的方向不同(压缩/拉伸)。由此可见,通过调控金属压条的挠度,能够获得不同的应力区间,外应力的大小可以借助压条挠度形变公式或有限元方法近似计算。

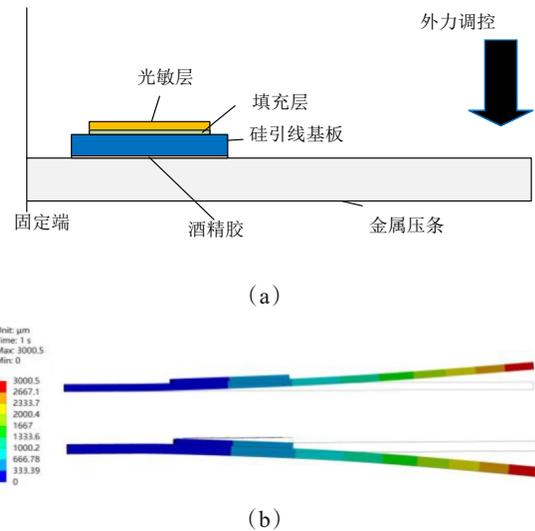


图3 调控方法II: (a)模块结构示意图; (b)有限元法(FEM)变形调节示意图

Fig. 3 Module II: (a) schematic diagram of module structure; (b) deformation adjustment diagram of finite element method (FEM)

2 应力计算与实验测试分析

2.1 应力计算

应力的计算需要相关材料参数,材料的杨氏模量、泊松比、热膨胀系数和发射率等参数来源于相关文献^[23-27]。假定各层材料均为弹性且各向同性,材料的线膨胀系数和杨氏模量取70~300 K温度范围的平均值,且不随温度变化,表2显示了需要的材料参数。器件模块的底面边界和冷平台始终处于接触状态,且提供支撑作用,在Z方向不产生位移,故在其底面的端点处施加Z方向位移为0的约束;中心轴施加X、Y方向位移为0的约束,以确保模型在仿真过程中有足够的约束。考虑到芯片从室温降至低温过程中存在导热差异的影响,将温度场和静力学场进行耦合计算。底面作为热源的边界,工作温度设置为从室温298.15 K均匀变化到80 K,也即温度激励载荷的初始点是298.15 K(和零应力状态相对应),结束温度点是80 K,同时使用斜坡加载的方式载入。而探测器工作在真空环境,不存在热对流,仅考虑各层结构之间的热传导和表面的热

辐射。

表1 结构参数

Table 1 Structural parameters

结构名称	长/mm	宽/mm	厚/mm
光敏层	10.4	8.848	0.003~0.2
互连层	10.4	8.848	0.01
硅引线基板	12.4	10.848	0.53
金属压条	50	3.63	0.96

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料	杨氏模量/GPa	线膨胀系数/ $10^{-6} K^{-1}$	泊松比	导热系数/ $Wm^{-1} \cdot K^{-1}$	发射率
光敏层	63	5	0.31	0.17	0.7
互连层	9.93	18.7	0.34	18.2	0.89
硅引线基板	130	1.15	0.24	150	0.6
因瓦	200	1.6	0.3	81.8	0.2

基于应力调控方法 I,对在低温环境下工作的 T2SLs 探测器进行研究。为减小运算量,利用对称边界,模型取四分之一进行计算。在计算过程中,

充分考虑各层结构之间的热传导以及表面的热辐射。80 K 下未减薄的初始模块结构 I 的温度云图如图 4(a)所示,各层结构温度差异极小,最大温差仅为 0.004 K,温度分布较为均匀。图 4(b)为 80 K 下的形变图,由于底充胶和钢柱的热膨胀系数相比于硅引线基板更大,探测器整体会产生一个向下凹陷的形变,且中心处最大形变量约为 31 μm ,光敏元区域承受较大的热应力。通过形变量和杨氏模量,计算不同 GaSb 衬底厚度下 T2SLs 探测器的热应力大小,结果如图 4(c)所示。随着 GaSb 衬底厚度减小,应力值呈现先减小后增大的趋势,在厚度约 400 μm 处,热应力达到最小值(44 MPa)。根据弯矩理论,这是因为随着 GaSb 衬底厚度增加,衬底对芯片的拉扯作用逐渐增强,应力应变中性层向衬底移动,芯片应力弯矩减小,在厚度为 400 μm 时达到最小;当厚度继续增加,中性层远离芯片层,弯矩增大,应力大小随之增加^[12]。结合实际情况,选取三个 GaSb 衬底厚度作为后续实验的测试点,分别为 200 μm (47 MPa)、100 μm (55 MPa) 和 40 μm (63 MPa)。

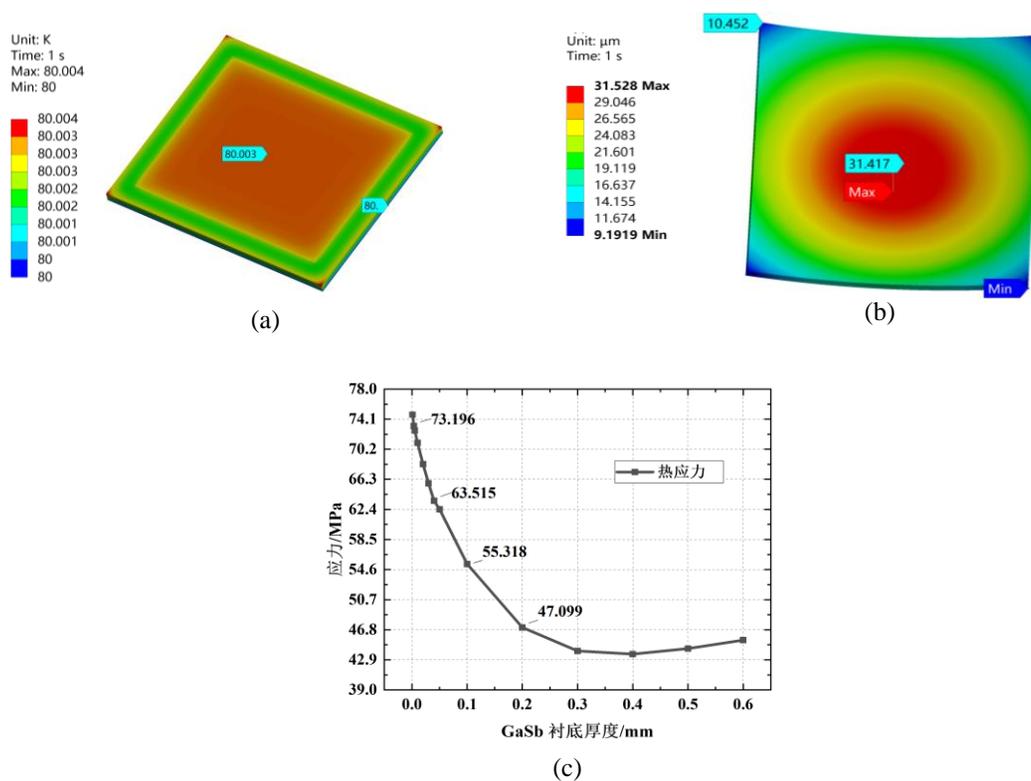


图4 调控方法I模块:(a)温度云图;(b)形变分布图;(c)等效应力随 GaSb 衬底厚度变化的曲线

Fig. 4 Thermal stress calculation based on Module I: (a) temperature cloud map; (b) deformation profile; (c) curve of equivalent stress variation with GaSb substrate thickness

应力调控方法 II 引入了外部作用力,芯片所受的应力为热应力和外加单轴应力的共同作用结果。通过金属压条的上下调节,在压条的方向(X 方向)上对芯片施加外力,芯片所受应力主要是 X 方向进行叠加。依据实际测试状态, X 方向应力分布情况如图 5 所示。在初始状态下,芯片仅受热应力影响,应力大小为 72.8 MPa。当压条上压为 4.1 mm 时,此时应力是由金属压条刚性位移产生的压应力和热失配导致的张应力叠加而成,应力降低。从热力学形变理论角度分析,在低温环境中,材料发生收缩,为金属压条向上刚性挤压创造了空间,材料收缩受限程度减小,从而导致应力降低,此时平均应力 -10.7 MPa。当金属压条下压为 2.9 mm 时,同理,应力是金属压条刚性位移产生的张应力和热失配产生的张应力叠加,应力增大,平均应力大小为 131.9 MPa。

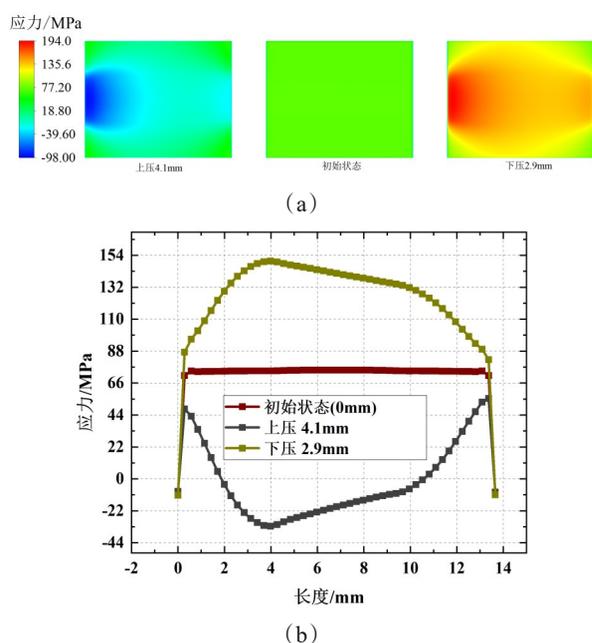


图 5 X 方向:(a)应力云图;(b)光敏层对角线上的应力
Fig. 5 X direction: (a) stress nephogram; (b) stress on the diagonal of the photosensitive layer

2.2 实验结果及分析

依据应力调控方法 I,对选定的测试点进行仿真计算,随后通过机械减薄衬底大方法制备测试模块。在确保杜瓦处于密闭状态且温度稳定的条件下,运用源表测量在这三种状态下的暗电流。由于 T2SLs 探测器工作于小反向偏置电压状态,故而重点关注小偏压下的暗电流特性。测试结果如图 6 (a)、6(b)所示,当衬底从 200 μm 减薄至 40 μm 时,

同一像元的暗电流呈现出差异,在小反偏压(-0.05 V)处,暗电流逐渐减小(黑色曲线>红色曲线>蓝色曲线)。图 6(c)展示了热应力和-0.05 V 偏压下暗电流的关系,不同颜色的点线图代表不同像元。由图可知,随着热应力的增大,暗电流略微减小。采用傅里叶变换红外光谱仪对模块的光谱响应进行测量,其测试结果如图 6(d)所示。光谱响应表现相对稳定,光谱形状和截止波长几乎无明显变化。研究表明,在 47~63 MPa 的热应力区间内,暗电流变化幅度最大仅为 4.5%,光谱响应相对稳定,表明在该区间内应力对 T2SLs 焦平面探测器光电性能影响较小。

将基于应力调控方法 II 所构建的模块整体放置于杜瓦内部。为确保温度的一致性,在压条上黏贴测温 Pt 电阻,通过测量测温电阻实时监控探测器芯片温度。依据仿真调节结果开展实验,依次测试:初始状态(0 mm)、上压为 4.1 mm 和下压为 2.9 mm 这三个状态的暗电流。暗电流测试结果如图 7(a)、7(b)所示,同一像元暗电流在小反偏压下出现差异:上压为 4.1 mm>初始状态(0 mm)>下压为 2.9 mm。根据红外探测器工作偏压区间,绘制出-0.05 V 偏压下 X 方向应力与暗电流的关系图,如图 7(c)所示。由图可知,随着应力增大,暗电流呈减小趋势。这表明在-10.7~131.9 MPa 的 X 方向应力区间内,随着应力增大,暗电流呈现减小趋势, T2SLs 焦平面探测器性能变化较小,展现出良好的稳定性和较强的适应性。

实验设置了多种应力环境,并通过精确的控制手段,实现了热应力、热应力与外应力的复合应力等一系列复杂热应力的调控。基于应力调控方法 I 和应力调控方法 II 开展的系列实验结果表明,在光敏层平面应力处于-10.7~131.9 MPa 的范围内时,探测器的光电性能变化幅度相对较小。这一现象与探测器所采用的 T2SLs 材料特性紧密相关。在 T2SLs 材料中,In 和 As 之间、Ga 和 Sb 之间通过共享电子对形成共价键,这种化学键结构赋予了材料高度的稳定性。原子通过共享电子对达到更稳定的电子构型,使得化学键具有较强的方向性和饱和性,进而显著增强了材料的结构稳定性。在受到热应力作用时, T2SLs 材料内部的原子结构能够保持相对稳定,这使得基于该材料的焦平面探测器性能也较为稳定。在不同应力下, T2SLs 探测器的性能变化可能主要源于其台面侧壁,这一点有待进一步

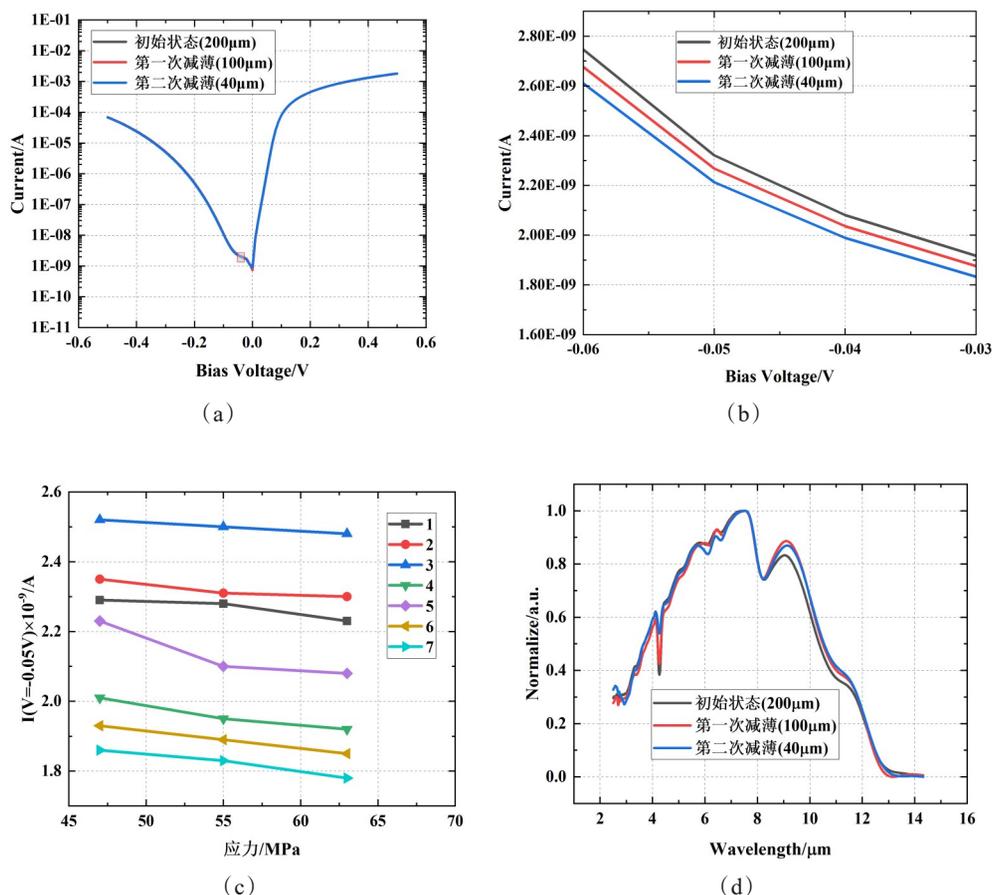


图6 调控方法I模块:(a)同一像元不同应力下的暗电流;(b)同一像元不同应力下暗电流的局部图;(c)-0.05 V 偏压下暗电流随热应力的变化;(d)同一像元不同应力下的光谱响应

Fig. 6 Variations in the optoelectronic characteristics of module I: (a) dark current under different stresses of the same pixel; (b) local map of dark current under different stresses of the same pixel; (c) changes of dark current with low temperature stress at -0.05 V bias voltage; (d) spectral response of the same pixel under different stresses

的研究和探讨。鉴于T2SLs探测器在不同应力状态下展现出的光电性能稳定性,该焦平面探测器能够充分满足不同应力场景下的可靠性要求。

2.3 焦平面可靠性验证

超晶格长波红外焦平面探测器由芯片与硅读出电路倒焊互联形成,采用 Al_2O_3 基板作为应力平衡结构,焦平面芯片在液氮温度下的应力范围为:2.5~55.5 MPa。在黑体温度为20~35 $^{\circ}\text{C}$, F 数为2的条件下测试探测器各项性能指标。随后对探测器进行了温度冲击试验,在完成了80~300 K温度冲击20次后,在相同偏压条件下对探测器性能进行测试。测试结果表明,焦平面在冲击前后的平均响应率以及平均峰值探测率性能基本维持不变,具体数据见表3;盲元分布几乎未发生变化,如图8所

示。该结构的探测器显示了良好的耐冲击稳定性。

3 结语

本研究探讨了应力对InAs/GaSb II类超晶格长波焦平面红外探测器光电性能的影响。通过理论分析和有限元法计算并建立了两个不同性质和不同区间应力的调控方法:调控方法I(热应力)和调控方法II(热应力+外应力)。基于这两个调控方法进行了光电性能测试,发现了在-10.7~131.9 MPa的平面应力区间范围内,探测器的暗电流和光谱曲线变化幅度较小。研究结果揭示了低温环境下,InAs/GaSb II类超晶格长波焦平面红外探测器具有高稳定性的特点。超晶格长波探测器可以适应不

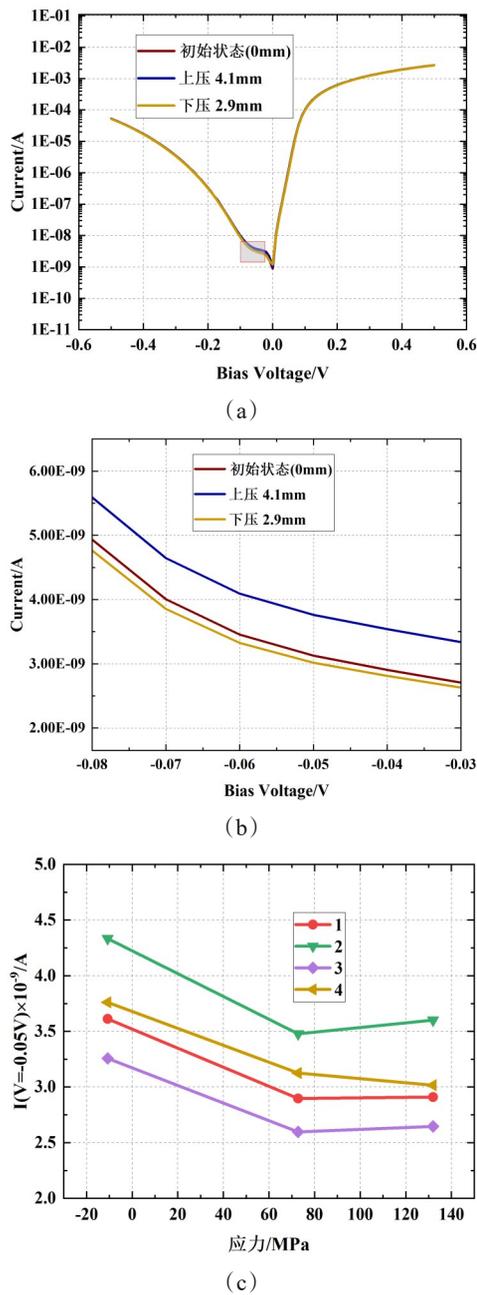


图7 调控方法II模块:(a)同一像元不同应力下的暗电流;(b)同一像元不同应力下暗电流的局部图;(c)-0.05 V 偏压下暗电流随应力的变化

Fig. 7 Variations in the optoelectronic characteristics of module II: (a) dark current of the same pixel under different stresses; (b) local map of dark current under different stresses of the same pixel; (c) variation of dark current with stress at -0.05 V bias voltage

同应力场景的工作环境。本文开展的温度冲击试验进一步验证了焦平面的稳定性,本研究可为后续探测器结构设计和可靠性评估提供依据。

表3 超晶格长波红外焦平面温度冲击前后性能比较

Table 3 Comparison of performance before and after temperature shock in the long-wavelength T2SL IRFPA

参数	温度冲击前	温度冲击后
平均响应率 (VW^{-1})	8.4×10^7	8.4×10^7
平均峰值探测率 ($cmHz^{1/2}W^{-1}$)	4.9×10^{10}	4.9×10^{10}
响应非均匀性 (%)	5.2	5.1
NETD (mK)	22.0	21.7
盲元率 (%)	0.85	0.83

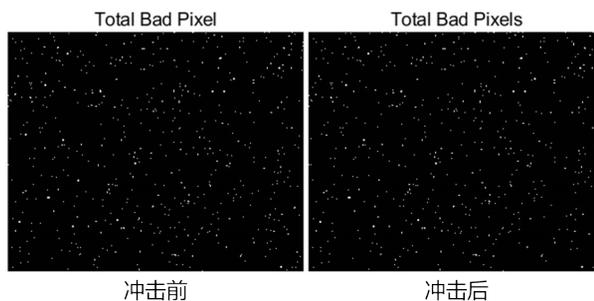


图8 温度冲击前后盲元分布

Fig. 8 Distribution of blind pixels before and after temperature shock

References

[1] Breniere X, Tribolet P. Uniting IR detectors for tactical and space applications: a continuous cycle for reliability [C]. Infrared Technology and Applications XXXV: Vol. 7298. SPIE, 2009: 656-667.

[2] Lin I K, Zhang Y, Zhang X. The deformation of microcantilever-based infrared detectors during thermal cycling [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(7): 075012.

[3] Meng Q, Zhang X, Lyu Y, et al. Calculation and verification of thermal stress in InSb focal plane arrays detector [J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(12): 402.

[4] Zhang L W, Shao M, Zhang X L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of large-format hybrid indium antimonide detector arrays [J]. Optical Engineering, 2013, 52(10): 103110.

[5] Zhang L, Tian W, Meng Q, et al. Analysis on structural stress of 64×64 InSb IRFPAs with temperature dependent elastic underfill [J]. Journal of Sensors, 2014, 2014: 1-7.

[6] Zhang X, Meng Q, Lyu Y, et al. Assessment of InSb infrared detector arrays assembly procedure employing ANSYS [J]. Optical and Quantum Electronics, 2019, 51(4): 92-1-92-8.

[7] Li X L, Zhang L, Fu Z K. Analysis on finite element method of thermal stress for infrared focal plane detector [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(4): 429-434. (李雪梨, 张磊, 付志凯. 红外焦平面探测器热应力的有限元仿真方法分析 [J]. 激光与红外, 2020, 50(4):

- 429-434.
- [8] Lin G H, Xu C B, Wu Q, et al. Integrating polarizer with infrared HgCdTe detector's stress analysis[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(9): 1104-1108.
(林国画, 徐长彬, 吴卿, 等. 碲镉汞集成偏振探测器应力分析[J]. *激光与红外*), 2020, 50(9): 1104-1108.
- [9] Zhang L, Li N, Song L, et al. Influences of electrode material and design on the reliability of IRFPAs detector under thermal shock [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(2): 69-1-69-9.
- [10] Duan X L, Xu B L. Comparative research about three kinds of die surface stress release techniques for infrared detector chips[J]. *Journal of CAEIT*, 2022, 17(6): 606-610, 618.
(段晓丽, 徐步陆. 红外探测器芯片表面应力释放技术比较研究[J]. *中国电子科学研究院学报*), 2022, 17(6): 606-610, 618.
- [11] Zhang H Y, Liu S. Research on stress reduction method of infrared focal plane detector chip[J]. *Infrared*, 2022, 43(3): 16-21.
(张洪瑀, 刘森. 红外焦平面探测器芯片应力降低方法研究[J]. *红外*), 2022, 43(3): 16-21.
- [12] Zhang W T, Chen X, Ye Z H. Stress in HgCdTe large infrared focal plane array detector analyzed with finite element analysis [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, 40(3): 308-313.
(张伟婷, 陈星, 叶振华. 碲镉汞大面阵红外探测器模块结构应力的有限元分析[J]. *红外与毫米波学报*), 2021, 40(3): 308-313.
- [13] Zhang W T, Ye W C, Chen X, et al. Study of the spectral response for HgCdTe long-wavelength detectors with applied stress [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(2): 86.
- [14] Zhang S, Hu X N. Effect of thermal stress on the performance of HgCdTe/Si diodes and FPAs [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, 27(11): 115009.
- [15] Maniv S, Shamay M, Sinai Y. Strain-induced current leakage in InSb photovoltaic detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(12): 4916-4918.
- [16] Wei Y, Razeghi M. Modeling of type-II InAs/GaSb superlattices using an empirical tight-binding method and interface engineering [J]. *Physical Review B*, 2004, 69(8): 85316.
- [17] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs - Ga_{1-x}In_xSb superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(23): 3160-3162.
- [18] Mohseni H, Litvinov V I, Razeghi M. Interface-induced suppression of the auger recombination in type-II InAs/GaSb superlattices [J]. *Physical Review B*, 1998, 58(23): 15378-15380.
- [19] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(6): 2545-2548.
- [20] Zhu X, Jie W, Lyu Y, et al. Band structure calculation in type-II InAs/GaSb superlattices detector with thermal strain using an empirical tight-binding method [J]. *Applied Physics A*, 2021, 127(1): 21.
- [21] Gao C, Zhao Z, Li X. Modeling of thermal stresses in elastic multilayer coating systems [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(5): R53-R80.
- [22] Ansari M Z, Cho C. Deflection, frequency, and stress characteristics of rectangular, triangular, and step profile microcantilevers for biosensors [J]. *Sensors*, 2009, 9(8): 6046-6057.
- [23] Zhang X, Meng C, Zhang W, et al. Design rule of indium bump in infrared focal plane array for longer cycling life [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2016, 76: 631-635.
- [24] Constancio Jr M, Adhikari R X, Aguiar O D, et al. Silicon emissivity as a function of temperature [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 157: 119863.
- [25] Jin C. Study on antimony-based compound semiconductor superlattice infrared photodetectors [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
(靳川. 碲化物超晶格红外探测器研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017.
- [26] Barka L, Balat-Pichelin M, Sans J L, et al. Oxidation and emissivity of Invar 36 alloy in air plasma at high temperatures [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 772: 1003-1016.
- [27] Ren Y, Hua P, Gong R Z. Materials with low infrared emissivity based on epoxy resin [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(02): 45-48.
(任玥, 华萍, 龚荣洲. 基于环氧树脂的低红外发射率材料研究 [J]. *兵器材料科学与工程*), 2011, 34(02): 45-48.