

文章编号: 1672-8785(2021)07-0009-08

InSb 红外焦平面探测器的区域性 过热盲元问题研究

程 雨¹ 龚志红² 肖 钰¹ 黄 婷¹
温 涛¹ 亢 喆¹ 宁 提¹

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 空装驻北京地区第七军事代表室, 北京 100086)

摘 要: 研究了 InSb 红外焦平面探测器的区域性过热盲元问题。通过故障分析以及有针对性的排查对比试验, 排除了封装、胶水填充和划片等因素, 并将故障定位在钝化工艺前。通过对钝化前的 InSb 材料片表面进行 X 射线光电子能谱测试, 发现它含有 Al 和 As 等杂质元素, 存在钝化前材料表面杂质含量较多的隐患。杂质元素在 PN 结的耗尽区形成杂质能级, 加载电压后容易导致 PN 结漏电流较高, 使 $I-V$ 特性退化, 从而形成过热盲元。通过缩短器具洗液的更换周期并且分隔使用多个生产线的器具, 可以减少材料表面的杂质附着, 使区域性过热盲元问题得到有效解决。

关键词: 区域性过热盲元; InSb; 红外探测器

中图分类号: TN362 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.07.002

Study of Regional Overheating Dead Pixels in InSb IRFPA Detectors

CHENG Yu¹, GONG Zhi-hong², XIAO Yu¹, HUANG Ting¹,
WEN Tao¹, KANG Zhe¹, NING Ti¹

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. The 7th Military Representative Office, Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100086, China)

Abstract: Regional overheating dead pixels problems of InSb infrared focal plane detectors was studied. Through fault analysis and targeted investigation and comparison tests, factors such as packaging, glue filling and dicing are eliminated, and the fault is located before the passivation process. Through the X-ray photoelectron spectroscopy test on the surface of InSb materials before passivation, it is found that it contains impurity elements such as Al and As, and the surface of the material contains more impurities before passivation. Impurity elements form impurity levels in the depletion region of the PN junction. Impurity elements form impurity levels in the depletion region of the PN junction. After voltage is applied, it is easy to cause high leakage current of the PN junction, degrade the $I-V$ characteristics, and form overheating dead pixels. By reducing the washing liquid replacement period of the cleaning appliance and separating the appliances of multiple production

收稿日期: 2020-12-27

作者简介: 程雨(1989-), 女, 黑龙江大庆人, 工程师, 硕士, 主要从事红外材料与器件研究。

E-mail: chengyu0431@aliyun.com

lines, the content of impurities on the surface of the material is reduced, and the problem of regional overheating dead pixels is effectively solved.

Key words: regional overheating dead pixel; InSb; infrared detector

0 引言

作为一种Ⅲ-V族化合物半导体材料, InSb具有较高的量子效率、电子迁移率以及较窄的禁带宽度,因此在红外探测领域发挥着重要作用^[1]。随着科技发展, InSb红外探测器在军事和民用领域均得到了重要且广泛的应用,人们对 InSb 红外探测器性能的要求也越来越高。

InSb 红外探测器主要由 InSb 光伏二极管芯片、杜瓦和制冷器等部件组成。其中, InSb 光伏二极管芯片的性能标志着整个探测器的研制水平^[2]。该芯片可通过 PN 结的光生伏特效应将入射到光敏面上的 1~5.5 μm 红外光信号转换为电信号并将其输出^[3]。它大多采用成熟的台面型光伏二极管形式,经成结、台面制备、钝化和电极制备等步骤获得焦平面阵列;通过钢凸点与读出电路倒装互连,再经胶水填充、减薄和增透等步骤完成整个 InSb 光伏芯片的制备。

本文对引起 InSb 红外探测器失效的区域性过热盲元问题进行研究。具体来说,先对红外焦平面探测器的区域性过热盲元现象进行描述分析和故障树绘制,然后利用针对性对比实验逐一排查故障隐患。如果有明显的对比结果,再深入进行细节排查,进一步找到故障原因。通过开展优化实验并对其结果进行验证,最终解决区域性过热盲元问题。

1 区域性过热盲元问题分析

在 InSb 红外探测器的性能评价过程中,存在最佳工作电压下测试结果正常而加载电压拉偏后出现区域性过热盲元的问题,如图 1 所示。此类不合格品在生产过程中占比较高,且各种规格的 InSb 光伏芯片在加载电压拉偏后均出现区域性过热盲元的问题,因此这是一个共性问题。

过热盲元是指噪声电压比探测器的平均噪声电压高出一定倍数的探测像元。对于 InSb 红外探测器来说,它通常是指高出 2 倍的探测像元。根据噪声的产生原因,过热盲元主要由制冷温度不够低和工艺缺陷较多两个因素造成。工艺缺陷主要在 InSb 单晶材料和 InSb 光伏芯片的制备过程中产生。由于 InSb 单晶材料有严格的筛选方法和标准,且晶体缺陷密度较低,不会形成密集的缺陷区域。因此可排除 InSb 单晶材料制备这个因素,而主要关注在 InSb 光伏芯片的制备过程中所产生的工艺缺陷。根据区域性过热盲元的特点,将故障隐患绘制成故障树。如图 2 所示,将它们分为封装因素、填充胶固化因素、划片因素、钝化因素和湿化学因素,并逐一对其进行排查。

2 区域性过热盲元故障排查

2.1 封装因素

InSb 光伏芯片的工作温度较低,约为 77 K。内部性能筛选时对 InSb 光伏芯片进行装配并将其封装到通用杜瓦内;然后配合使用沸点为 77 K 的液氮,形成低温环境;接着模拟实际工作温度并进行测试评价。如果装配未使 InSb 光伏芯片的温度降到 77 K,则会导致 InSb 光伏二极管的暗电流较高,在盲元图上表现为均匀分布的死盲元和过热盲元。当 InSb 光伏芯片的温度达到 77 K 时,暗电流降低,死盲元和过热盲元大幅减少。

从杜瓦中将存在区域性过热盲元的 InSb 光伏芯片拆除,然后对其进行重新装配并安装测温二极管。待温度达到 77 K 时,再进行测试评价。可以发现,加载电压拉偏后,过热盲元的位置和数量变化极小(见图 3),与隐患现象不符。因此可将装配导致芯片未到温度这个因素排除掉。

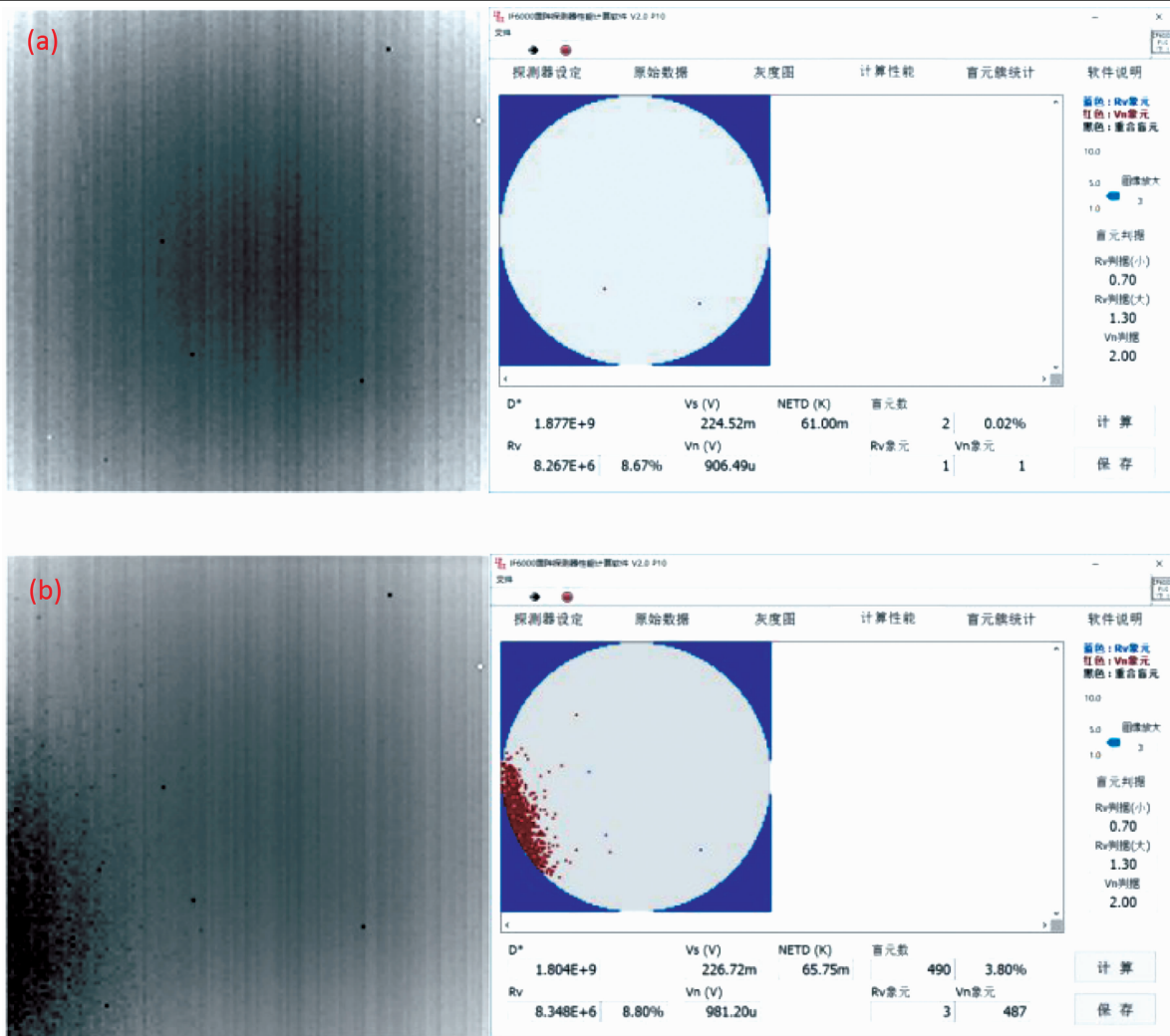


图 1 区域性过热盲元现象：(a)最佳工作电压下的电平图和盲元图；(b)加载电压拉偏后的电平图和盲元图

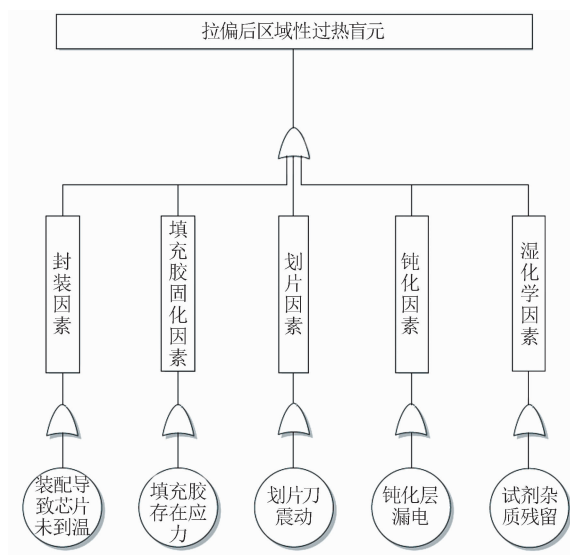


图 2 区域性过热盲元的故障树

2.2 填充胶固化因素

为了提高可靠性，互连后在钢凸点的周围填充液体胶水，然后对其进行高温烘烤，使填充胶固化。由于胶水的热膨胀系数一般比钢高，填充胶固化后会对两侧的焦平面阵列和读出电路产生挤压并释放应力。如果部分区域的挤压应力过大，则会导致胶水直接接触的钝化层承受较大的应力，使钝化层产生针孔和微裂纹等缺陷。此时表面漏电流增大，并出现区域性过热盲元的问题。

针对填充胶固化因素，进行钢凸点之间不做填充的对比试验(效果见图 4)，即互连后仅通过减薄和增透工艺来完成芯片制备。可以发现，即使钢凸点之间不做填充，仍有较高比例

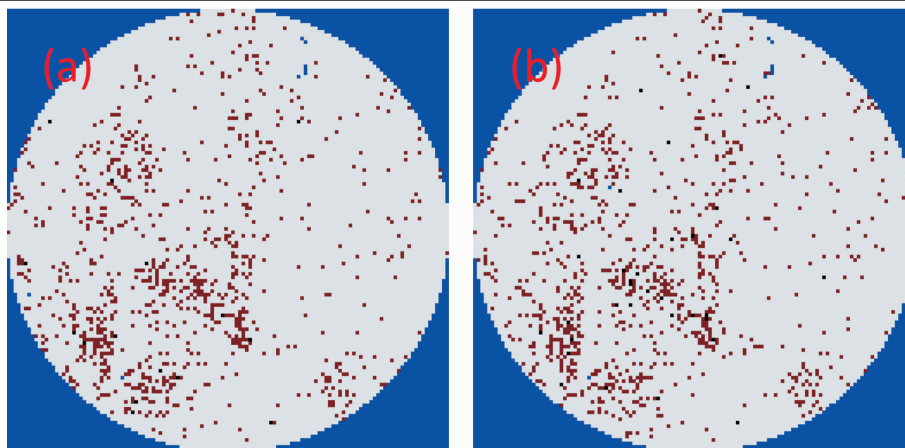


图3 同支 InSb 光伏芯片在加载电压拉偏后的盲元图：(a)首次装配；(b)二次装配

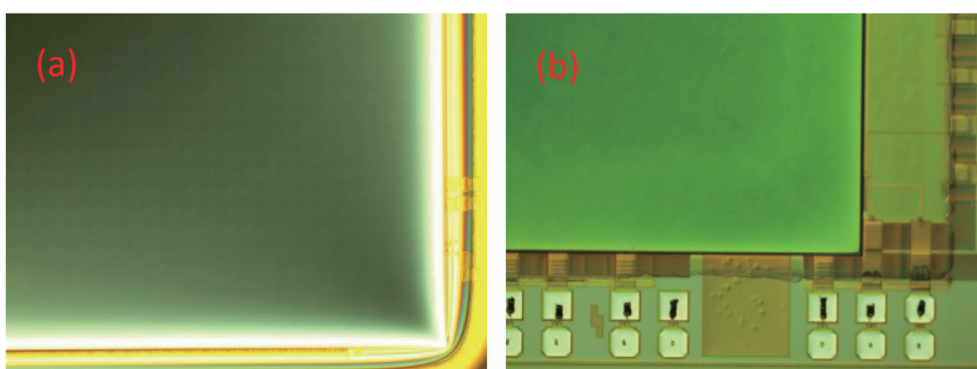


图4 减薄后的效果图：(a)填充胶水；(b)不填充胶水

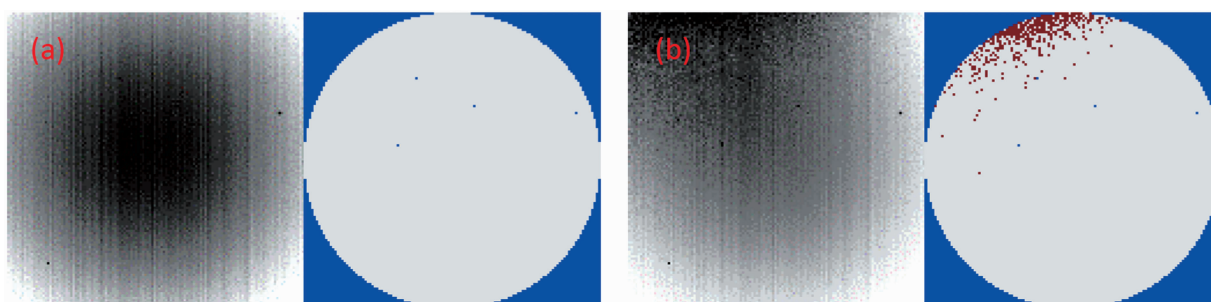


图5 不填充胶水实验的测试结果：(a)最佳工作电压下的电平图和盲元图；
(b)加载电压拉偏后的电平图和盲元图

的存在区域性过热盲元的光伏芯片(部分结果图5)。因此,填充胶固化后释放应力不是导致区域性过热盲元的原因。

2.3 划片因素

在焦平面阵列的制备完成后,通常通过划片对整个 InSb 材料片进行单个管芯的分割。如果材料片粘接不稳定或者刀具安装不牢固,那么划片时刀具会发生震动,产生崩边和碎渣,导致该区域的钝化层承受较大的压力。这容易

使钝化层出现针孔或微裂纹等缺陷,造成钝化层表面漏电流增大,PN结的反向击穿电压变小,且划片线附近存在区域性过热盲元。

针对划片导致区域性过热盲元的隐患,开展了对比优化实验。通过技术优化,划片后边缘较好(见图6),而且由划片造成的崩边和碎渣等问题得到了较大程度的缓解。但是从测试结果来看,加载电压拉偏后存在区域性过热盲元的光伏芯片的比例没有明显变

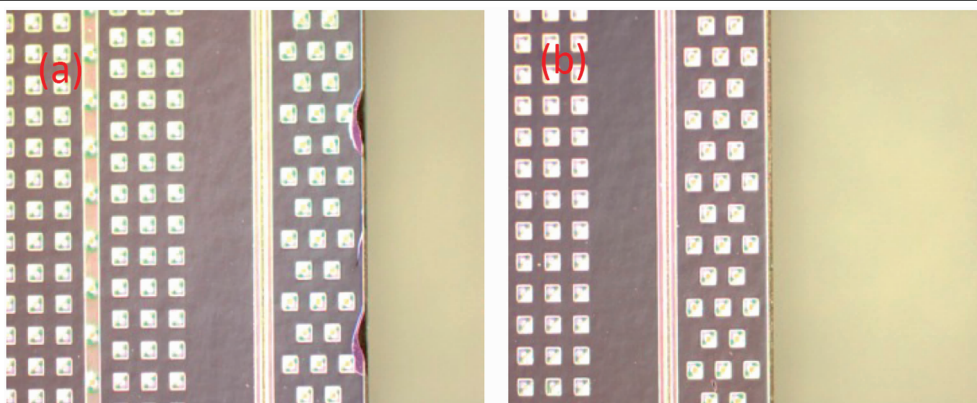
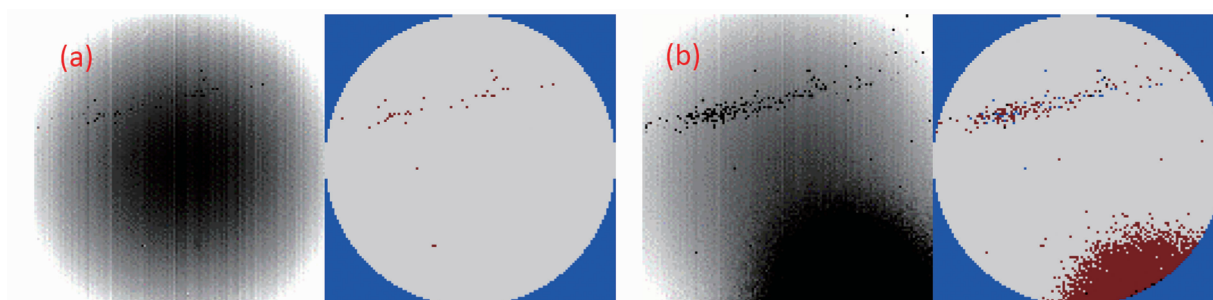


图 6 划片后的边缘效果图: (a)原情况; (b)优化后

图 7 优化划片后的区域性过热盲元现象: (a)最佳工作电压下的电平图和盲元图;
(b)加载电压拉偏后的电平图和盲元图

化,且区域性过热盲元的位置并非固定在划片线附近(见图 7),与故障现象不符。因此可将划片时的刀震动因素排除掉。

2.4 钝化因素

如果钝化层中存在少量的可动离子,那么随着时间积累,通过俘获电荷会使 PN 结附近的表面能带发生弯曲,导致 PN 结的反向击穿电压变小,从而形成过热盲元。

由于钝化采用批量化制备方式,若钝化工艺存在隐患,则会表现为批次性特征,且过热盲元均匀分布。本故障现象为部分区域存在过热盲元,且同一批次或同一 InSb 材料片上仅部分管芯经测试加载电压拉偏后有区域性过热盲元。钝化因素与区域性过热盲元现象不符,因此可排除钝化层漏电因素。

2.5 湿化学因素

钝化工艺前需进行多项清洗腐蚀等湿化学步骤,比如成结前 InSb 表面处理、成结后 InSb 表面处理和 InSb 台面腐蚀等。如果杂质元素残留在 InSb 单晶表面上,则会在 PN 结区

形成杂质能级,使 PN 结的漏电流增大,导致 PN 结的反向击穿电压变小(表现为过热盲元)。由于杂质元素易产生区域性残留,因此易形成区域性过热盲元。

针对湿化学因素进行了杂质残留对比实验。随机选取在区域性过热盲元故障出现前已完成钝化的一块 InSb 材料片。通过划片将其分为两半:一半保留钝化状态;另一半经腐蚀清洗后去除钝化层,重新进行钝化工艺。两者同时继续进行 InSb 光伏芯片流片制备。最终测试结果如下:在加载电压拉偏后,保留原钝化状态的 InSb 光伏芯片均没有出现区域性过热盲元问题(部分结果见图 8);而重新钝化的 InSb 材料片则会出现较高比例的存在区域性过热盲元的 InSb 芯片(部分结果见图 9)。

由于对比试验结果明显,为了进一步了解杂质成分,对钝化前的 InSb 材料片表面进行 X 射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)检测(结果见图 10)。可以发现,钝化前的 InSb 材料片存在含量不容忽视的 Al

和 As 杂质元素，并且还有其他相对微量的杂质元素。Al 和 As 元素并不是 InSb 焦平面阵列制备过程中所需的无机试剂或工艺原料成分，因此杂质来源应该为器具等工作环境因素。As 元素是 InAs/GaSb II 类超晶格材料片的主要成分，通常两个生产线的器具共用并且一起在清洗腐蚀液(简称洗液)内清洗。如果洗液的更换周期相对较长，则会导致器具的清洗效果不佳，器具表面残留微量杂质元素，从而使 As 元素和器皿的主要杂质 Al 元素残留在 InSb 材料片的表面上。

通过缩短洗液的更换周期，并且将 InSb 芯片与 InAs/GaSb II 类超晶格芯片制备所用的器具和清洗器具的洗液分隔使用，可以减少交叉污染，并可减少材料表面的杂质附着。变动器具和洗液后，对用于芯片制备的钝化前 InSb 材料片表面进行 XPS 测试(结果见图 11)。可以看出，主要杂质明显减少。在完成 InSb 光伏芯片制备后，经测试发现，加载电压拉偏后区域性过热盲元急剧减少(部分结果见图 12)。此时零散盲元有所增加，但没有出现区域性过热盲元。这属于 InSb 光伏二极管在加载电压

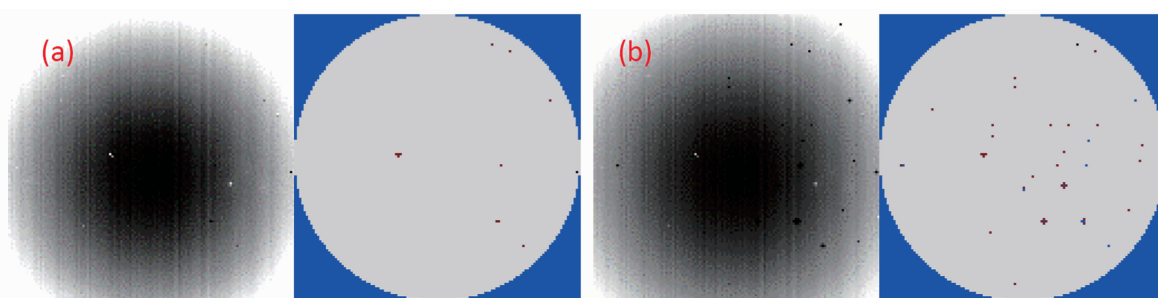


图 8 保留原钝化状态的 InSb 材料片的测试结果：(a)最佳工作电压下的电平图和盲元图；(b)加载电压拉偏后的电平图和盲元图

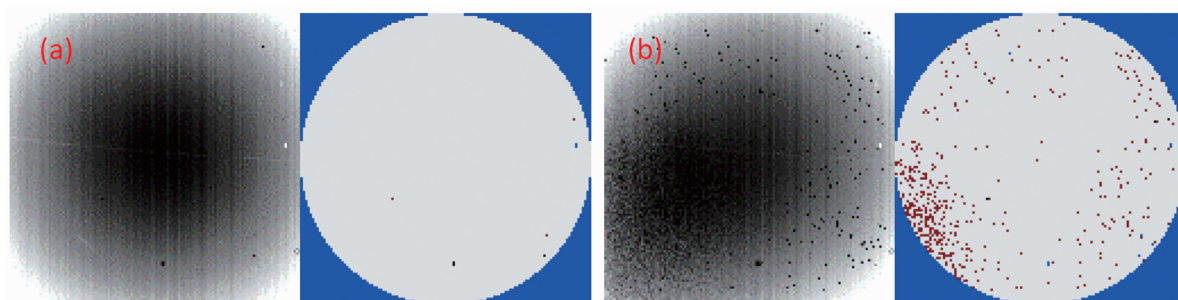


图 9 重做钝化的 InSb 材料片的测试结果：(a)最佳工作电压下的电平图和盲元图；(b)加载电压拉偏后的电平图和盲元图

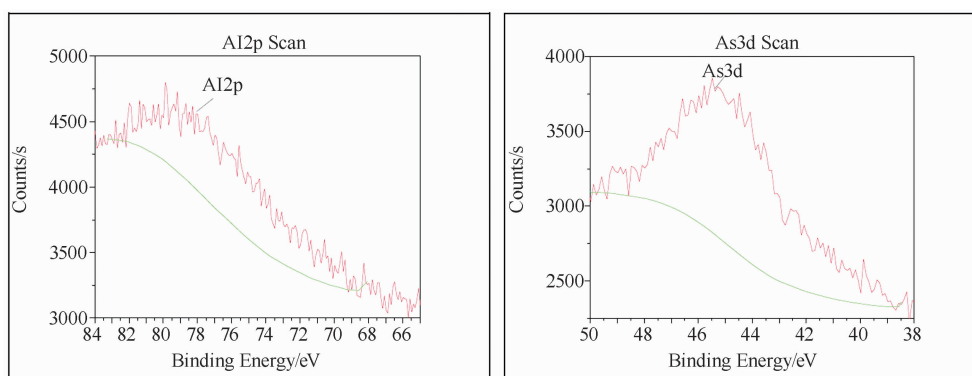


图 10 钝化前 InSb 材料片表面的 XPS 测试结果

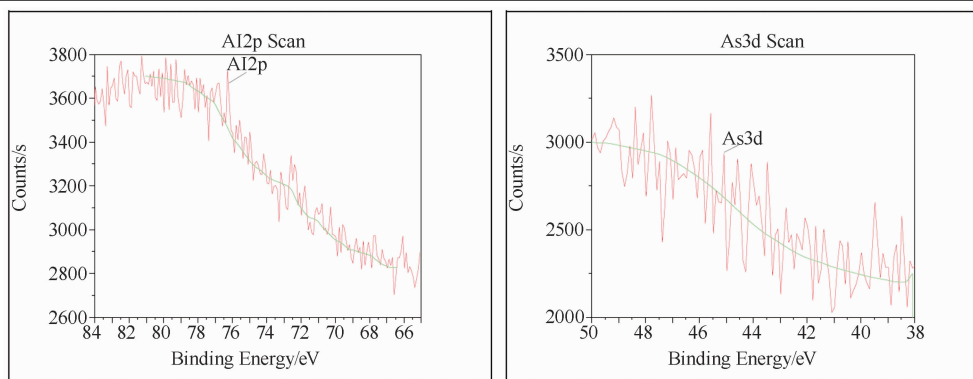


图 11 器具和洗液变动后的钝化前 InSb 材料片表面的 XPS 测试结果

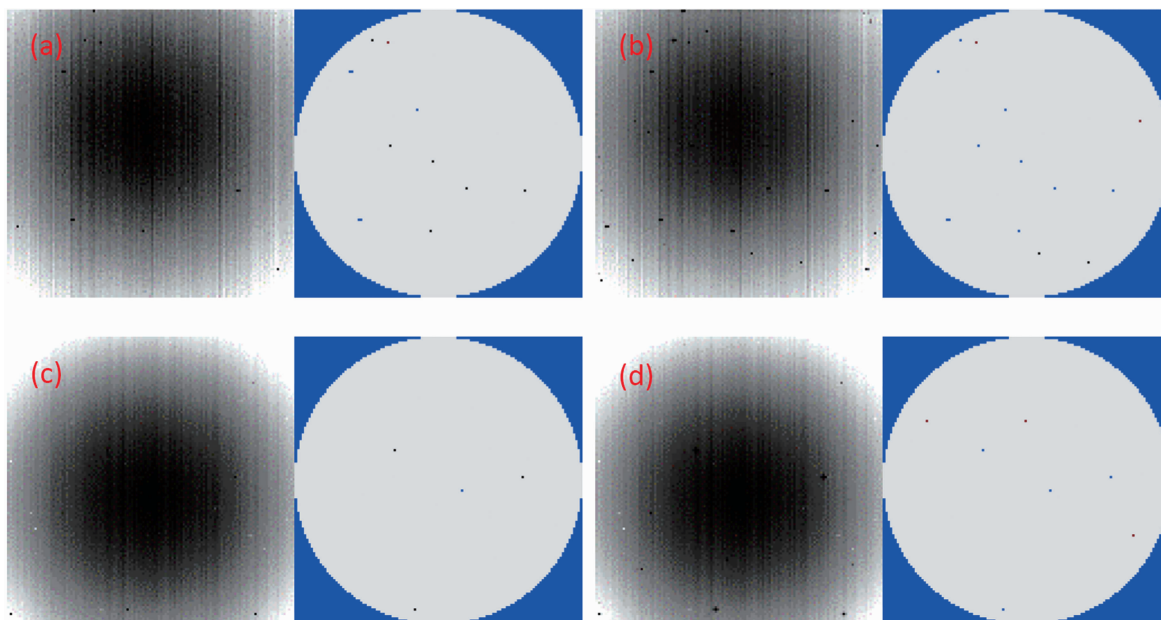


图 12 器具和洗液变动后的 InSb 芯片测试结果：(a) A 芯片在最佳工作电压下的电平图和盲元图；(b) A 芯片在加载电压拉偏后的电平图和盲元图；(c) B 芯片在最佳工作电压下的电平图和盲元图；(d) B 芯片在加载电压拉偏后的电平图和盲元图

拉偏后的正常盲元情况。

每一个 InSb 探测器像元就是一个光电二极管，其电学特性为二极管特性，如图 13 所示。其中，曲线 A 是一条正常的 $I-V$ 特性曲线。像元加载反向电压，反向电压处于平台区；接收光子后，产生光生载流子，形成光电流；通过信号处理，形成输出电平。此时在平台区内，像元的输出信号和噪声基本不随反向电压调整而变动。曲线 B 是一条 $I-V$ 特性退化的曲线。此时反向击穿电压从 V_B 降低到 V'_B ；当反向电压(如 V_1)接近击穿电压时，像元噪声增大；当反向电压(如 V_2)超过击穿电压时，输出过热盲元。

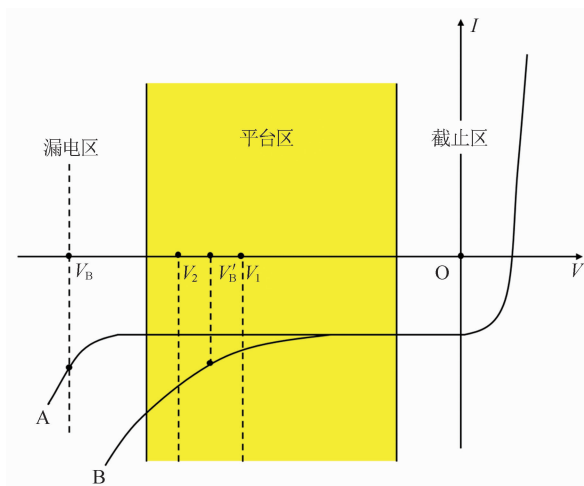


图 13 探测器像元的 $I-V$ 特性示意图

Al 和 As 等杂质附在 InSb 材料的表面上, 钝化后在 PN 结的耗尽区形成杂质能级。加载反向电压后, 载流子通过这些能级跃迁, 使 PN 结的暗电流增大, $I-V$ 特性退化(见图 13 中的曲线 B)。这些杂质能级的能量不一致, 导致漏电程度不同, 从而出现加载电压拉偏后部分区域存在过热盲元现象。因此, 针对该问题, 需要控制器具的洁净度, 并做好材料片表面的腐蚀清洗工作; 同时定期测量材料表面的杂质成分, 将杂质附着材料表面的现象降至最少。这些工作对红外探测器芯片的性能有至关重要的影响。

3 结束语

由于加载电压拉偏后出现的区域性过热盲元问题会导致 InSb 红外探测器失效, 本文对其进行了现象描述和故障树绘制。通过逐一排查和分析故障隐患, 发现该问题由杂质元素附

着在 InSb 材料表面造成。通过缩短器具洗液的更换周期, 并且分隔使用多个生产线的器具, 可以减少材料表面的杂质附着, 使区域性过热盲元问题得到有效解决。由于 InSb 光伏芯片的制备方法没有改变, 所以满足可靠性要求。本文研究对强化工艺规范和提高 InSb 红外探测器的性能具有重要意义。下一步将重点研究高温工作 InSb 光伏芯片以及大面阵 InSb 光伏芯片的制备技术。

参考文献

- [1] 程雨, 肖钰, 曹凌霞. 单点金刚石切削 InSb 单晶的研究 [J]. *红外*, 2019, **40**(2): 7-13.
- [2] 赵建忠. InSb 焦平面探测器的发展现状与趋势 [J]. *红外技术*, 2016, **38**(11): 905-913.
- [3] 牟宏山, 董硕, 梁进智. 铋化锑红外焦平面探测器盲元失效问题的研究 [J]. *红外*, 2010, **31**(7): 9-13.