文章编号: 1672-8785(2023)08-0013-07

锑化铟晶片高温加速贮存 性能变化研究

吴 玮 董 晨 赵 超 董 涛 折伟林 黄 婷 彭志强 李 乾 (华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要: 锑化铟晶片在存放以及使用过程中的性能稳定性是影响制备的探测器性能的重要因素之一。为了探究锑化铟晶片在长时间放置情况下的性能变化情况,对锑化铟晶片进行高温加速贮存试验,并在试验过程中对晶片几何参数、表面粗糙度、电学参数、位错缺陷等几个重要性能参数进行跟踪检测。结果表明,在高温加速试验条件下,除晶片外形发生轻微变化以外,其他性能基本不发生变化,晶片能够长期保存。

关键词: 锑化铟; 红外探测器; 高温加速贮存试验; 几何参数; 位错缺陷

中图分类号:TN213 文献标志码:A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.08.002

High-Temperature Accelerated Storage Performance of Indium Antimonide Wafers

WU Wei, DONG Chen, ZHAO Chao, DONG Tao, SHE Wei-lin,

HUANG Ting, PENG Zhi-qiang, LI Qian

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The stability of the performance of indium antimonide wafers during storage and use is one of the important factors affecting the performance of the prepared detectors. In order to investigate the performance changes of indium antimonide wafers under long-time storage, high-temperature accelerated storage test was carried out on indium antimonide wafers, and several important performance parameters such as geometrical parameters, surface roughness, electrical parameters and dislocation defects were tracked and detected in the process of the test. The results show that under the conditions of high-temperature accelerated test, except for the slight change of wafer shape, other properties basically do not change, and the wafers can be stored for a long time.

Key words: InSb; infrared detector; high-temperature accelerated storage test; geometric parameters; dislocation defects

收稿日期: 2023-03-14

作者简介:吴玮(1976-),女,北京人,工程师,主要从事红外及激光材料与器件质量可靠性方面的研究。 E-mail:wuweiliu@163.com

0 引言

锑化铟(InSb)中波红外探测器具有非常突 出的技术优势,常被用于导弹制导、光电侦 察、天文航天等领域。该类型探测器由单多元 发展至 128×128、256×256 等较小规模探测 器直至近些年的 4k×4k 超大规模探测器^[1]。 锑化铟探测器是在锑化铟晶片上制备而成。采 用直拉法生长出单晶体,然后经过切割、割圆 倒角、研磨、抛光、清洗等工艺,最后完成锑 化铟晶片材料的制备^[2]。在晶体生长、晶片加 工工艺中可能会引入热应力、缺陷、损伤等。 器件用锑化铟晶片必须具有高的材料质量,比 如位错密度低、电学参数均匀、几何表面质量 高等。焦平面探测器的盲元与材料的位错缺陷 息息相关。总厚度变化(Total Thickness Variation, TTV)、翘曲度等几何参数会直接影响探 测器制备中极其重要的几个工艺(光刻、倒装 焊、台面腐蚀等)的质量,从而影响到探测器 的性能。表面粗糙度过高会导致器件漏电流增 加^[3-4]。

一般来说,锑化铟晶片在加工完成后可能 会存放一段时间才用于制备探测器,所以其长 期存放的性能稳定性是影响后续制备器件性能 的关键。此外,锑化铟红外探测器在长期使用 后可能会新增盲元,大大降低了探测器的性 能。基于长期统计结果,大多数的锑化铟焦平 面器件盲元是由以下四种情况导致的:(1)探 测器芯片与读出电路之间断连;(2)探测器芯 片与读出电路之间不良的互连,增加了连接阻 抗;(3)材料缺陷或其他原因损坏了 PN 结, 导致像元阻抗下降、无响应信号;(4)钝化缺 陷降低了探测器阻抗,但是没有损坏 PN 结^[5]。材料在长期存放或使用过程中可能会释 放应力、新增位错以及改变电学参数等,从而 使得探测器性能下降。 国际上常用自然贮存试验法和加速寿命试 验评估法对电子产品的贮存寿命进行试验。利 用自然贮存环境试验法得到的数据较为准确、 真实,但不足之处在于试验过程耗时较长,导 致试验需要消耗大量的人力物力,实际操作起 来难度大。加速寿命试验评估法一般通过施加 较高的试验应力来加速产品失效速率、缩短试 验时间,然后通过统计分析试验所得数据来进 行寿命评估。该方法已成为电子产品寿命研究 常用的工程应用方法^[6]。

近些年,针对红外探测器可靠性的研究很 多。Wang W 等人分别对红外探测器的热应力 加速试验,焦平面探测器加速老化试验的时 间、温度与盲元率的关系,电极材料和设计对 探测器可靠性影响等方面进行了研究^[5,7+12]。 法国 Lynred 公司(原 Sofradir 公司)等分别对探 测器组件杜瓦及封装等结构可靠性进行了研 究^[13-17]。但是对制备探测器所用材料可靠性的 研究极少,特别是对长时间放置或者高温加速 试验过程中材料性能变化的研究极少。本文通 过对锑化铟晶片进行高温加速试验来测量不同 时间点的几何参数、表面粗糙度、位错密度和 电学参数,从而获得锑化铟晶片在高温加速贮 存下性能的变化。

1 试验

1.1 试验过程

对材料的低温烘烤其实相当于常温环境下 的加速试验过程。根据阿伦尼斯模型,高温加 速试验等效时间为^[18]

$$A_{T} = \exp\left[-\left(\frac{E_{A}}{k}\right)\left(\frac{1}{T_{Pruf} + 273.15} - \frac{1}{T_{Feld} + 273.15}\right)\right]$$
(1)

式中, A_T 为某个温度点下的加速因子; E_A 为失效反应活化能(这里分别给出文献中提到 的锑化铟材料活化能 0.57 eV 以及锑化铟红 外探测器常用的 0.76 eV 活化能);k为玻尔 兹曼常数, $k=8.617 \times 10^{-5}$ eV/K; T_{Pruf} 为

笛	44	卷.	笛	8	期
11	T T	1119	11	U	771

表1加速试验等效时间计算结果										
	样品种类	试验温度/℃	活化能/eV	加速因子	时间/天	常温等价时间/天				
	锑化铟材料	80	0.57	39.68	21	833				
锑化铟探测器		80	0.76	135.34	21	2842				
表2各样品试验参数表										
	样品编号	1#		$2 \# \sim 4 \#$		$5 \# \sim 8 \#$				
	处理条件	晶片储存柜中,保持 22± 3℃温度和 35%~65%湿度 环境放置 21天		用 80℃烘箱烘烤 21	天 用 80	用 80℃烘箱烘烤 21 天				
	测试时间 测试内容	则试时间 第 0、7、14、21 天 则试内容 表面平整度		第0、7、14、21 月 表面平整度、电学参	€ 第 参数 抽取1	第 0、7、14、21 天 抽取 1 片进行位错密度检测				

加速试验的环境温度; T_{Field} 为常温 22°C。通 过该模型可以设计高温加速试验来模拟材料长 时间自然时效下的残余应力去除情况。一般来 说, 探测器的低温烘烤加速试验选定温度为 70~85℃。本文选用 80℃作为低温烘烤可靠性 试验温度。

表1列出了锑化铟材料以及探测器在 80℃下的加速试验等效时间计算结果。从表中 可以看出,锑化铟晶片在80℃下烘烤21天相 当于在 22℃常温下存放两年多, 探测器在 80℃下存放 21 天相当于在 22℃常温下存放 7 年多。为模拟两年以上的晶片常温存放时间, 本文试验设定低温烘烤时间为21天。

选取8片锑化铟 <111>晶向晶片并将其单 面抛光加工至 525±25 μm, 然后进行清洗。按照 表 2 列出的各样品试验参数进行试验及测试。

1.2 性能测试与表征

采用光学轮廓仪进行晶片表面平整度以及 表面粗糙度的测试。光学轮廓仪的测试波长为 623.8 nm, 表面平整度测量范围为全片, 表面 粗糙度测试范围为167 um×167 um。表面粗糙 度测量点位置如图 1 所示,均取 R_a 值作为表 面粗糙度测试值。

采用霍尔测试系统对晶片的载流子浓度、 迁移率进行测量。测量温度为 77 K, 磁场强 度为1000 Gs, 样品电流为1 mA。采用 CP4 腐



图 1 晶片检测点位置示意图

蚀液对样品进行腐蚀,然后使用奥林巴斯公司 的表面缺陷显微镜进行晶片表面位错腐蚀坑扫 描(放大倍数为50×)。

2 结果与讨论

2.1 几何参数变化

图 2 为晶片在第 0、7、14、21 天的面型 变化图。可以看出,在常温常湿条件下放置的 1#晶片的表面平整度未发生明显变化,但是 另外3片在80℃下烘烤的晶片均出现中间略微 凸起的现象,且随着时间的延长趋于严重。图 3所示为晶片在第0、7、14、21天的表面平整 度变化曲线。其中,1#样品的表面平整度基 本无变化,3#、4#样品有轻微变化,而2# 样品变化幅度较大。



图 2 高温加速试验不同时间点的晶片表面平整度测试图



一般认为,在高温过程中半导体晶片产生 塑性形变的原因是位错沿着(111)面滑移。晶 片表面存在损伤,在深入亚表面甚至更深一些 的裂纹或者沉淀位置上会存在位错。在高温环 境中这些位置会产生新的位错,同时在一定温 度梯度下它们会沿一定方向运动,直接导致晶 体内部的滑移^[19]。然而锑化铟晶片原生位错 较少,如果发生形变只可能来源于晶片新增位 错,包括体内新增位错和表面新增位错。本文 使用的样品背面为非抛光表面,表面损伤较 多,表层加工引入的位错多。如果体内无新增 位错,极有可能是由背面的位错滑移导致晶片 形变。2#样品的外形变化幅度较大可能是因 为其初始表面平整度较差导致晶体生长或加工 时存在较大的应力。

2.2 表面粗糙度变化

高温加速试验过程中晶片表面粗糙度(抛 光面)随高温加速试验时间的变化曲线如图 4 所示。结果显示,表面粗糙度基本未发生变 化。文献中提到,只要不超过350℃,锑化铟 表面的化学配比基本不变;不超过450℃时, 被破坏的深度只发生在很浅的表层内,大约小 于 1.6~2.4 nm^[20-21]; 250℃时, 真空/氢气条 件下锑化铟晶片表面氧化层仅仅发生轻微的变 化[22]。锑化铟晶片抛光完成后,室温环境下 其表面在几十秒内迅速形成一层氧化层,在后 续的时间内氧化层生成速度大幅降低[23],因



图 4 高温加速试验过程中的晶片表面粗糙度(抛 光面)变化曲线



图 5 高温加速试验过程中的晶片电学参数变化曲线 此本文试验样品表面在制备完成后的短时间内 即形成较为稳定的氧化层。本文试验温度仅为 80℃,远低于 350℃,所以表面化学成分变化 很小。这也解释了在长时间退火情况下锑化铟 晶片表面粗糙度未发生明显变化的现象。

2.3 电学参数变化

图 5 所示为不同时间点两个样品的载流子 浓度变化曲线。可以看出,随着低温烘烤时间 的增加,未处理的材料片载流子浓度基本不 变,而扩散完的材料片载流子浓度明显降低。 此外,两个样品的导电类型一直保持为 N 型。 马基申定则提到,一般晶体材料的电阻率主要 受缺陷散射等因素影响。一般情况下,高温处 理能够减少材料的空位等点缺陷以及位错等线 缺陷,从而提高晶格质量、降低缺陷等对电子 的散射,所以高温处理后材料的电阻率降低 了^[24-26]。有些经过高温处理的材料的晶粒尺寸 增大且更均匀、晶粒外形更规整、晶粒表面更 光滑、氧含量更少,导致迁移率增大^[27]。高 温退火对于去除硅单晶中的氧沉淀有较为明显 的作用,氮-氧复合体逐渐分解,氧杂质和氮 杂质大量向外扩散,导致硅中的氧、氮杂质浓 度降低。相关试验证实,氮杂质在高温 1300℃退火时有很高的扩散速率,从而改变载 流子浓度及迁移率^[28-29]。然而锑化铟单晶材料 本身基本不存在晶界、夹杂、氧沉淀等缺陷, 而且位错、空位等缺陷极少,所以在如此低的 温度下这些缺陷可能并未大量消失或者新增, 从而使得锑化铟电学参数并未随高温加速试验 变化。

2.4 位错缺陷变化

随着烘烤的进行,锑化铟的 In 面位错分 布的变化如图 6 所示。可以看出,在该烘烤条 件下,21 天内锑化铟 In 面无新增位错,且原 生位错未发生移动。

半导体材料位错形成的主要模型是基于热 弹性理论的临界切应力(Critical Resolved Shear Stress, CRSS)模型^[30]:

$$\sigma_E = \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^3 \right] \right\}$$

+ $(\sigma_3 - \sigma_1)^2$]^{1/2} - *CRSS* > 0 (2) 式中, σ_E 为热应力, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为由对角 化应力张量得到的三个主应力。锑化铟的分剪 切应力为 5 N/mm²^[31]。在高温加速试验过程 中,环境温度仅为 80°C,无法产生超过临界 剪切应力的热应力,导致晶体内部并不能产生 新的位错缺陷。在一定的温度条件下,能够激 活锑化铟晶体中 α 位错的移动。其移动速度与 温度相关,两者的关系满足^[32]:

$$V(T,\tau) = V_{\tau} \exp(-\frac{Q(T)}{kT})$$
(3)

式中,Q(τ)为导致位错产生移动的活化能。基 于位错缺陷的移动机理,Q(τ)能够直接表明双 扭折位错线的形成能。V_r表示这种位错沿位 错线移动的速度及距离。由式(3)可得,在本 文低温烘烤条件下,锑化铟单晶内部 In 型位



图 6 低温烘烤后的锑化铟位错变化图

错的移动速度约为 10⁻⁹~10⁻⁸ mm/s^[33]; 经 过 21 天的低温烘烤, 位错移动距离基本可以 忽略不计。

在高温加速试验中,锑化铟晶片体内的位 错缺陷没有新增和移动,证明晶片外形变化并 非由晶体内部缺陷引起,而可能是由晶片粗糙 背面的位错缺陷的移动导致的。另外还证明了 晶片的电学参数并未因位错缺陷的新增而 变化。

3 结束语

本文通过对锑化铟晶片进行高温加速试 验,获得了 80℃烘烤 21 天过程中的锑化铟晶 片性能变化数据。在烘烤过程中,晶片会产生 轻微的变形,表面粗糙度基本无变化。在该试 验条件下,晶片体内位错没有新增和移动,载 流子浓度等电学参数无变化。结果表明,在 80℃和 21 天高温加速试验条件下,锑化铟抛 光晶片的主要性能指标未发生明显变化。常温 存储时,晶片性能在至少 2 年的时间内不发生 变化。在本文高温加速试验中,有一个样品的 表面平整度变化较大,后续需要对样品原始平 整度与高温烘烤变形之间的关系进行进一步的 研究。

参考文献

[1] 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.

- [2] 赵超, 孔忠弟, 董涛, 等. 5 英寸锑化铟晶片加 工及表征 [J]. 人工晶体学报, 2022, 51(12): 2014-2022.
- [3] 赵超,徐鹏艳,孔忠弟,等.4 in InSb 晶片加工 技术研究[J]. 红外, 2019, **40**(4): 18-24.
- [4] 赵超,彭志强,柏伟,等. 100 mm 直径低位错 密度 InSb 单晶生长研究 [J]. 红外, 2018, 39 (3): 9-12.
- [5] Wang W, Fan Y Y, Fu Y N, et al. Research on bad pixel variation of IRFPA by high temperature storage and temperature shock [C]. SPIE, 2011, 8193: 819328.
- [6] 张博轩. 微波放大器贮存寿命评估方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [7] 李建林,张绍裕,孙娟,等.热应力加速试验评 定碲镉汞焦平面阵列像元储存寿命[J].红外 与激光工程,2019,48(10):39-47.
- [8] Asatourian R K. Infrared focal plane array storage life assessment by accelerated aging [J]. Quality and Reliability Engineering, 1998, 14(6): 425– 432.
- [9] Mestechkin A, Lee D L, Cunningham B T, et al. Bake stability of long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes [J]. Journal of Electronic Materials, 1995, 24(9):1183-1187.
- [10] Zhang L, Li N, Song L, et al. Influences of electrode material and design on the reliability of IRF-PAs detector under thermal shock [J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(2): 69.
- [11] Zhang L W, Meng Q D, Zhang X L, et al. Mod-

INFRARED (MONTHLY)/VOL.44, NO.8, AUG 2023

eling and stress analysis of large format InSb focal plane arrays detector under thermal shock [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, **60**: 29–34.

- [12] 牟宏山,董硕,梁进智. 锑化铟红外焦平面探测 器盲元失效问题的研究 [J]. 红外, 2010, 31 (7): 9-13.
- [13] Breniere X, Andresen B F, Fulop G F, et al. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance [C]. SPIE, 2008, 6940; 69400H.
- [14] Breniere X, Tribolet P. IR detectors life cycle cost and reliability optimization for tactical applications
 [C]. SPIE, 2006, 6395: 63950D.
- [15] Chao M, Jing P, Wei M. Study on reliability enhancement testing for InSb focal plane array detector [C]. SPIE, 2011, 8193: 819322.
- [16] Meng Q, Zhang J, Zhang X, et al. Thermal stress analysis of InSb IRPFAs assembled in Dewar [J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(5): 259.
- [17] 林日东,刘伟,王冠,等. 红外焦平面探测器杜 瓦组件真空寿命分析 [J]. 激光与红外,2011, 41(7):779-783.
- [18] 盛斌.可靠性试验中三大加速模型的研究与应用[J]. 电子技术与软件工程,2014,3(14): 147-149.
- [19] 刘洋,刘玉玲.不同生产工艺对硅片表面翘曲 及机械性能的影响[J].电子工业专用设备, 2014,23(8):14-16.
- [20] 张延庆, 刘家璐. 快速热退火对锑化铟表层化 学配比的影响 [J]. 微细加工技术, 1991, 9(2): 62-65.
- [21] 张廷庆, 刘家璐. 铍注入锑化铟快速热退火的 研究[J]. 半导体学报, 1994, **15**(1): 35-39.
- [22] Tessler R, Saguy C, Klin O, et al. Desorption of InSb(001) native oxide and surface smoothing in-

duced by low temperature annealing under molecular hydrogen flow [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **101**(2): 024513.

- [23] Tang X, Welzenis R, Setten F, et al. Oxidation of the InSb surface at room temperature [J]. Semiconductor Science and Technology, 1986, 1 (6): 355-365.
- [24] 汪国军,白煜,胡少杰,等.退火工艺对磁控溅射生长的 Pt 薄膜微观结构及电性能的影响
 [J].材料导报,2019,33(Z2):56-60.
- [25] 何亦辉,介万奇,周岩,等. 退火处理对 CdZnTe 晶体光电性能的影响 [J]. 人工晶体学报, 2014,43(2):269-274.
- [26] 俞鹏飞,介万奇. 低阻值 In 掺杂 CdZnTe 晶体的 退火改性 [J]. 人工晶体学报,2010,39(1): 21-24.
- [27] 刘玉荣,任力飞,杨任花,等.退火温度对 ZnO 薄膜晶体管电特性的影响 [J]. 华南理工大学 学报,2011,39(9):103-107.
- [28] 杨德仁, 阙端麟. 高温退火硅单晶中氧和氮杂 质性质[J]. 半导体学报, 1996, 17(1): 71-75.
- [29] 方敏. 氢退火对直拉硅中氧沉淀及空洞型缺陷 的作用 [D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [30] 张国栋, 翟慎秋, 崔红卫, 等. 半导体单晶生长 过程中的位错研究 [J]. 人工晶体学报, 2007, 36(2): 301-307.
- [31] 孙聂枫. InP 晶体合成、生长和特性 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [32] 俞振中,金刚,陈新强,等. 锑化铟单晶中 α位
 错的运动速度 [J]. 半导体学报, 1981, 2(2):
 90-98.
- [33] Steinhardt H, Schafer S. Dislocation velocities in indium antimonide [J]. Acta Metallurgica, 1971, 19(2): 65–70.