

文章编号:1001-9014(2006)02-0153-04

# 用于低温半导体器件筛选的新型温度循环设备

吴礼刚, 刘大福, 朱三根, 吴家荣, 洪思敏, 龚海梅  
(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, 200083)

**摘要:**在某些情况下斯特林制冷机采用间歇式工作方式,以延长卫星在大空中的服务年限,因此由斯特林机致冷的低温半导体器件如 HgCdTe 中长波红外探测器会经受成千上万次从  $-173^{\circ}\text{C}$  以下到常温的温度循环,这个过程可能会造成器件的失效.为了研究器件的失效机理和可靠性,帮助筛选器件,本文介绍了一种自制新型的温度循环实验设备,型号 TCE-a. 经过数千次温度循环,设备满足器件筛选实验要求.

**关键词:**低温半导体;温度循环;环境应力筛选  
**中图分类号:**TN306 **文献标识码:**A

## NOVEL THERMAL CYCLE SCREENING EQUIPMENT FOR CRYOGENIC SEMICONDUCTOR COMPONENTS

WU Li-Gang, LIU Da-Fu, ZHU San-Gen, WU Jia-Rong, HONG Si-Min, GONG Hai-Mei  
(State Key Laboratories of Transduce Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:**In order to prolong the lifetime of satellites, the Stirling cooler is operated on the intermittent mode in some cases. Thus such cryogenic semiconductor components as HgCdTe mid or long wavelength infrared (IR) detectors are subjected to thousands of repeated thermal cycles from below  $-173^{\circ}\text{C}$  to room temperature. That may induce the failure of components. In this study, a novel equipment to study the reliability and the main failure mechanisms was introduced, which is used to screen semiconductor components. After thousands of cycles, the equipment meets the requirement of screening.

**Key words:**cryogenic semiconductor; thermal cycle; environment stress screen (ESS)

### 引言

自环境应力筛选技术问世以来,众多研究和生产部门就温度应力如何有效地激发潜在缺陷问题,开展了许多有益地尝试.统计数据表明,环境应力筛选所揭示的产品缺陷中,80%左右是温度循环激发的<sup>[1]</sup>.由于材料热膨胀系数(CTE)不匹配,在温度循环实验过程中,会造成诸如焊点热疲劳,焊点产生微裂纹并且扩展等危害,从而造成器件失效<sup>[2,3]</sup>.

HgCdTe 中长波红外探测器在卫星、夜视、火控和制导灯领域得到广泛应用<sup>[4]</sup>,卫星工作时由于斯特林制冷机采用间歇式工作方式,会经受成千上万次从  $-173^{\circ}\text{C}$  以下到常温的温度循环.为了确保这类低温半导体器件的可靠性,在地面必须进行一系列严格的实验,来帮助筛选这些器件.目前大多数温度循环设备制冷难以达到  $-170^{\circ}\text{C}$  以下,而且难以保证

真空环境.而且一个斯特林制冷机本身仅能装配一个探测器来完成温度循环实验,如果用它来测试筛选多个器件,将耗费巨大.因此研制一台可以同时测试多个器件的温度循环设备是非常必要的.

该设备基于热传导原理研制而成,在研制之初,通过有限元算法,对降温情况进行了模拟.装在内部的多个器件在模拟太空的真空环境中经受数千次温度循环能够满足 HgCdTe 中长波红外探测器的筛选要求.

### 1 技术要求及系统组成

#### A. 器件筛选技术要求:

1. 升温时间  $\leq 10\text{min}$  ( $-173^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ); 降温时间  $\leq 10\text{min}$  ( $20^{\circ}\text{C} \sim -173^{\circ}\text{C}$ )
2. 高温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) 驻留时间 1 ~ 2min; 低温 ( $-173^{\circ}\text{C}$  以下) 驻留时间 1 ~ 2min

收稿日期:2005-03-23, 修回日期:2005-09-21

基金项目:国防预研基金(514020304ZK0703)资助项目

作者简介:吴礼刚(1976-),男,湖北广水人,中国科学院上海技术物理研究所博士,主要研究方向为红外探测器及相关设备的研究.

Received date: 2005-03-23, revised date: 2005-09-21

3. 一次测试 4~8 个器件
4. 数千次温度循环
5. 真空环境

#### B. 系统组成

设备分成主系统和子系统两大部分. 主系统用于完成温度循环功能, 主要包括真空容器、液氮子缸、温度测试电路与显示、传动机构与控制、电加热台与控制及显示、循环次数计数及显示, 以及设备保护装置. 子系统用来给子缸提供液氮以保持冷环境的低温状态, 主要包括液氮母缸, 空压机及控制, 电磁阀及控制, 绝热输液管路. 温度循环试验系统如图 1 所示.

设备是基于 LabVIEW 和 PC 机控制的, 采用 PCI 总线技术. 使用 National Instrument 公司的 DAQ (数据采集) 卡, 采用 LabVIEW 编程, 来完成对各路温度点数据的采集, 由 PC 机屏幕显示温度变化数据动态曲线, 采集的数据存于 PC 机硬盘, 并由 PC 机对步进电机进行闭环运动控制, 当传热台温度降到  $-173^{\circ}\text{C}$  时, 步进电机带动传热台向下运动; 当温度升到  $20^{\circ}\text{C}$  时, 步进电机带动传热台向上运动. 使得传热台在冷环境即液氮子缸和热环境中往复运动, 从而使得装在传热台上的半导体器件经受高低温循环. 运动过程中传热台温度得以在高低温保持一段时间, 及实现高、低温驻留时间要求. 加热台即热环境是由内置的电加热片来提供热量的, 采用独立于 PC 控制的 PID 温控方法设定加热台温度为  $40^{\circ}\text{C}$ . 每高低温循环一次, 计数器就加 1, 计数器独立于 PC 机控制.

子系统由图 1 右边的液氮子缸、自动输液控制、液面位置传感电路 3 个模块组成, 其中自动输液控制模块包括空压机和电磁阀两个关键执行部件. 具体说, 液氮子缸中液面位置信息通过 DAQ 卡输入到 PC 机, 并由 PC 机通过 LabVIEW 编程, 完成自动加液氮控制功能. 自动加液氮的过程是当子缸液氮快消耗完时, 空压机启动, 电磁阀关闭, 空气压缩液氮从母缸流入子缸. 当子缸液氮快加满时, 空压机停止, 电磁阀打开释放残余气压, 停止加液氮.

图 1 中子系统之外部分的为主系统. 为了安全起见, 本文设计了一个保护电路, 一旦出现异常, 设备自动切断电机、空压机和电磁阀电源, 但计数器电源没有被切断, 所以仍旧可以在设备控制面板上显示并保存当前循环次数, 重新操作的时候能够发现设备是在第几次循环出现异常并终止运行. 图 2 为该设备的外观图, 型号 TCE-a.

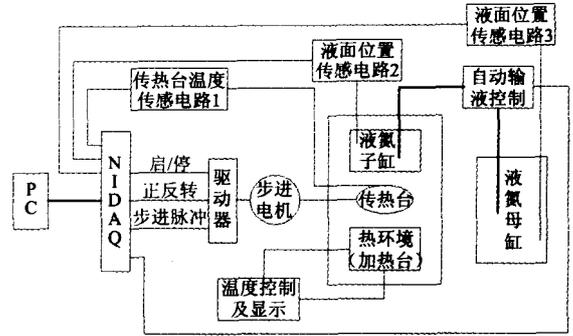


图 1 温度循环系统总结构原理图

Fig. 1 Architecture of the thermal cycle screening system



图 2 温度循环筛选设备, 型号 TCE-a

Fig. 2 Thermal cycle screening equipment, TCE-a

## 2 传热及结构分析

在系统设计过程中, 首先对降温时间进行了理论计算和分析, 通过有限元方法 (FEM), 粗略估算降温时间, 给系统设计提供理论依据; 并计算出结构位移和应力分布, 以保证子缸和真空容器的安全性和可靠性.

当常温下的传热台贴紧液氮温度下的子缸底部 (假设传热台跟子缸之间接触始终无间隙), 4s 之后, 传热台会降到  $-176^{\circ}\text{C}$  以下, 如图 3 所示. 由于受冷收缩, 子缸底部沿轴向向上位移约  $1.3\text{mm}$ , 如图 4 所示. 图 3 和图 4 采用三维体模型结构.

图 5 和图 6 为子缸的右半截面图, 采用二维模型结构, 图 5 显示由于真空压力造成的应力场分布, 从中可以看出最大应力为  $156\text{Mpa}$ , 跟这种材料的许用应力相当. 图 6 显示由于真空压力造成的子缸轴向位移分布, 子缸中心点位移最大 (比子缸底部圆周边缘区域向下凸出约  $0.06\text{mm}$ ).



图3 子缸和传热台温度场分布(4s后)  
Fig.3 Temperature distribution of sub container and diathermanous plate 4s later

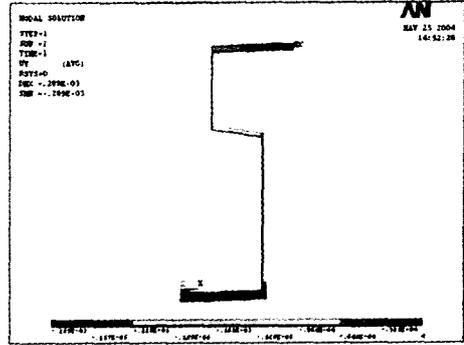


图6 真空压力造成的轴向位移分布  
Fig.6 Displacement along Y-axis caused by vacuum pressure of sub container

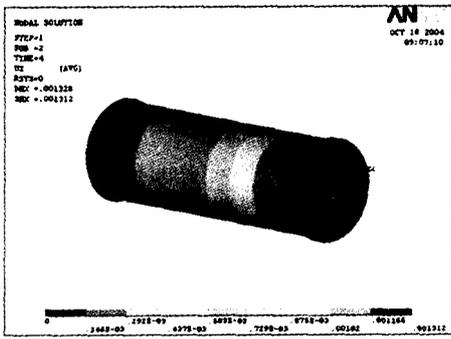


图4 子缸和传热台轴向位移(4s后)  
Fig.4 Displacement distribution of sub container and diathermanous plate 4s later

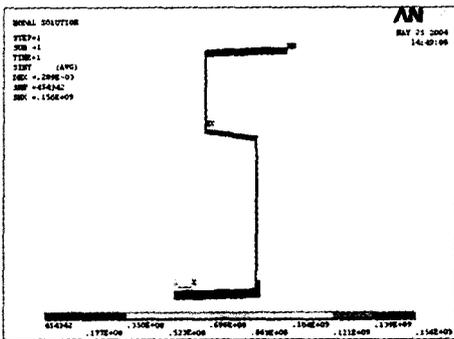


图5 真空压力造成的应力场分布  
Fig.5 Stress distribution induced by vacuum pressure of sub container

### 3 实验结果与分析

通过适当改进子缸底部结构,增加传热接触面积后得到如下实验结果:在最初 100 次温度循环内,器件从 20℃ 降到 -173℃ 需要大约 10min(580s),从 -173℃ 升温到 20℃ 需要大约 7.5min(440s)左右,在高低温(20℃ 和 -173℃)分别驻留 1min,升降温

速率无明显变化.如图 7 所示.当传热台和子缸底板或者加热台贴紧时,降温速率最大,分别大约为 -1.0℃/s 和 1.3℃/s,如图 8 所示.

随着循环次数的增加,升降温时间逐渐缩短,4000 次循环后,降温时间缩短到 8s,升温时间缩短到 6.5s,这是由于传热面多次接触后磨合增强,有效传热面积增大造成的.

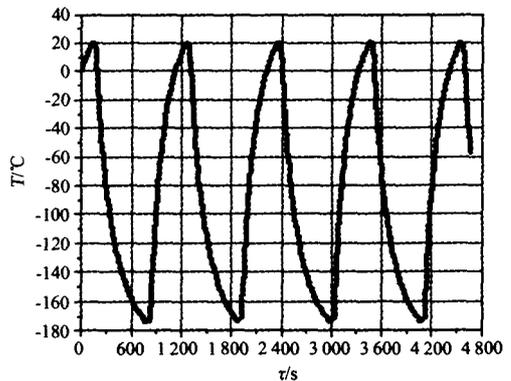


图7 器件温度变化  
Fig.7 Temperature varying of components

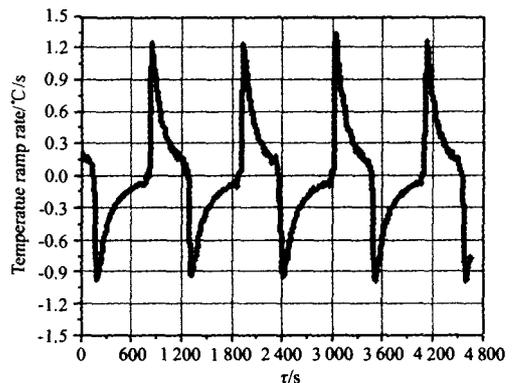


图8 器件温度变化速率  
Fig.8 Temperature ramp rate of ramp rate

另外,设备中真空容器的真空度为数 Pa,装在传热台上的器件热容量非常之小,实验测得,传热台温度传感器显示为高、低温度点时,器件上温度传感器显示与传热台温差在 2℃ 左右;同时,测得当传热台上温度到达高、低温度点后 1/2min 内,器件上的温度传感器也显示为高低、温度点,也就是在高、低温度点,器件温度会滞后传热台半分钟以内,所以可以忽略器件上的温度梯度的影响.同时,器件在圆形的传热台上也是按圆对称装配在外径 93mm,内经 54mm 的圆带形区域内,而且实验测得在高低温度点时传热台上该区域内最大温差为 0.5℃,器件上该区域内最大温差也在 0.5℃ 以内.所以近似认为器件装配区域内传热台或者器件上温度是均匀的.在结构设计上传热台降温时贴在子缸底面(冷面)的中央,升温时贴在环形加热台上,这种对称传热结构能够保证传热台和器件温度尽量均匀.

#### 4 结语

1. 由于有限元分析是假设传热台在冷却过程中始终无间隙贴紧液氮子缸,尽管模拟计算结果显示 4s 以后传热台就降到了 -176℃ 以下,但实验结果仍然是 8~10min,是因为实际情况下难以保证无间隙贴紧.但有限元分析为设备研制提供了理论参

考,是设备研制的基础.

2. 传热台上一次可以装 4~6 个器件,且器件处在真空环境中,能够真实模拟太空环境下的实际工作条件.同时,温度变化周期性和被测器件温度均匀性较好,设备性能基本稳定,可以用此设备来研究器件失效机理和改进器件工艺.

3. 采取适当的措施,进一步增加传热接触面积,升降温速率可以得到进一步改善.

#### REFERENCES

- [1] LIANG Xue-Yi. Tailor method of thermal cycle screening profile [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing* (梁雪仪. 温度循环筛选剖面的裁减方法. *电子产品可靠性与环境试验*), 2002, 5: 35—38.
- [2] YAN Qi, Rex Lam, et al. Temperature profile effects in accelerated thermal cycling of SnPb and Pb-free solder joints [J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46(2—4): 574—588.
- [3] Ikuo Shohji, Hideo Mori, et al. Solder joint reliability evaluation of chip package using a modified Coffin-Manson equation [J]. *Microelectronics Reliability*, 2005, 44(2): 269—274.
- [4] SHI Wei-Min, LI Dong-Mei, QIAN Yong-Biao, et al. Physically and chemically passivated interface of HgCdTe studied by AES [J]. *J. Infrared Millime. Waves* (史伟民, 李冬梅, 钱永彪, 等. 碲镉汞物理与化学界面的 AES 研究. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(Suppl): 23—27.