

使用 T3Ster 对宇航级电子元器件

内部热特性的测量

张立 汪新刚 崔福利

(中国空间技术研究院西安分院 结构技术研究室, 西安 710000)

摘要: 介绍了 MicReD 公司研发制造的热测试仪 T3Ster。T3Ster 测试仪可以测试各类 IC、LED、散热器、热管等电子元器件的热特性以及 PCB、导热材料等的热阻、热容及导热系数、接触热阻等热特性。使用 T3Ster 测试仪对某航天器用电子元器件内部热特性进行了测量, 并与器件资料中的热特性数据进行比对, 二者相对误差为 0.07%, 验证了 T3Ster 测试仪具有测试宇航级电子元器件热特性的能力。为宇航级电子元器件的热设计与热分析提供重要的实验依据。

关键词: 热测试仪; T3Ster; 航天器; 电子元器件; 热特性

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Internal thermal performance measurement

of electronic elements in space by T3Ster

Zhang Li Wang Xingang Cui Fuli

(Structural Tech. Research Dept., Xi'an Branch of China Academy of Space Tech., Xi'an 710000, China)

Abstract: Thermal transient tester – T3ster is a product of MicRed.inc. T3Ster can be used to characterize IC, LED or thermal management devices such as heat sinks and heat pipes. Furthermore, T3Ster can also be used for characterizing the thermal performance of PCB and thermal conduction materials. In this paper, T3Ster is used to measure the internal thermal performance of an electronic element used in space, which has a good coherence with the thermal performance data in the component datasheet. The consistency proves that T3Ster can test the thermal performance of space-level electronic elements. The thermal design and thermal analysis of Space-level electronic elements can be of perfect experiment insurance by T3Ster.

Key words: Thermal tester; T3Ster; Spacecraft; Electronic component; Thermal performance

在航天领域, 电子设备所处环境温度高、温差大、工作条件苛刻。电子元器件在这样的热环境下性能会极大地下降, 且不能可靠地工作, 甚至降低工作寿命^[1]。近年来航天器电子设备中集成电路技术朝着高功耗、高密度的方向发展的同时, 体积也在不断缩小, 单位面积功耗迅速上升, 造成了热流密度的升高, 其结果也直接降低了产品的稳定性和可靠性。加之业界缺乏统一的工业标准, 且出于技术保密和经济成本考虑元器件生产厂商提供的器件内部数据和热参数非常有限。因而对航天器中的电子元器件热特性的有

效检测为在热设计工作中提高产品的安全性、可靠性和稳定性具有十分重要的意义^[2]。另一方面, 为了减少对进口元器件的依赖, 航天器用电子设备国产化程度越来越高, 而国产器件资料中的热参数往往很少, 对国产器件内部热参数的准确测量也成为航天器电子产品热设计工作中一项非常重要的内容。

电子元器件内部热特性主要指其内部热阻和内部热容。热阻是指稳定状态下热流从一个较高温度结点流动到一个较低温度结点的量度, 其值通过两结点间温度差除以耗散功率来计算^[3]

(定义源于 JE-DEC 标准 EIA/JESD51-1)。热阻大表示热量不容易传递,相对应的组件所产生的温度就比较高,因此由热阻可以判断及预测组件的发热状况^[4]。当物质吸收热量温度升高时,温度每升高 1℃其所吸收的热量称为该物质的热容。热容是电子元器件的一种非常重要的热特性,对瞬态问题的研究主要与热容有关。

本文使用 MicReD 研发制造的热测试仪 T3Ster 对元器件内部热特性进行测量。传统的电子设备热测试方法测量的均为器件表面的温度,如果要测量元器件内部芯片的温度,则必须破坏其物理结构。T3Ster 采用非破坏方法,测得热阻和热容的关系曲线,得到器件的内部热特性。

1 T3Ster 设备介绍

T3Ster 是 MicReD 研发制造的热测试仪,运用先进的 JEDEC 稳态实时测试方法(JESD51-1),专业测试各类 IC(包括二极管、三极管、MOSFET、SOC、MEMS 等)、LED、散热器、热管等电子器件的热特性,PCB 及导热材料等的热阻、热容及导热系数、接触热阻等热特性。

T3Ster 通过改变电子器件的输入功率,使得器件产生温度变化,在变化过程中,T3Ster 测试出芯片的瞬态温度响应曲线,在几分钟之内即可分析得到关于该电子器件的全面的热特性。T3ster 测试技术不是基于“脉冲方法”的热测试仪,“脉冲方法”由于是基于延时测量的技术所以其测出的温度瞬态测试曲线精度不高,而 T3ster 采用的是“运行中”的实时测量的方法,结合其精密的硬件可以快速精确捕捉到高信噪比的温度瞬态曲线。

T3ster 测量结构中的 PN 结的温度随时间的变化规律,可以通过在固定电流下测量 PN 结上的压降来实现。这种方法需要了解 PN 结的热敏度,因为在特定电流下,PN 结的热敏度随正向电压的变化而变化^[5]。

计算机通过常规接口插件与设备相连并对其进行控制,这样,试验过程中采集的结果就能实时通过计算机屏幕进行显示。对应的软件对测量进行控制以及对实验结果进行后处理。从测得的温度曲线可以计算出结构的时间常数密度,得到结构函数,用以识别热流通道^[6,7]。

T3ster 配置软件采用的 NID(Network

identification by deconvolution,反卷积网络计算)方法,要获得准确的计算结果,其所采集的实验数据必须是非常准确且连续的瞬态数据。比如,在 LED 封装测试当中,如果瞬态变化的最初 1ms 时间的瞬态温度变化没有被采集到,那么最终测试出的热阻将被低估 10%-15%,T3ster 测试仪采集瞬态数据的精度高达 1 μs,可以完美地捕捉到每一个温度的瞬态变化。保证了分析软件分析结果的准确性。

在测量封装的结温时,高的信噪比可以允许非常精细的测量。T3ster 可以通过其高精度的微分输入放大器获取准确的温度结果。温度分辨率高达 0.01℃。

1.1 T3Ster 热测试仪的工作原理

T3Ster 提供了非破坏性的热测试方法,其原理如图 1 所示:

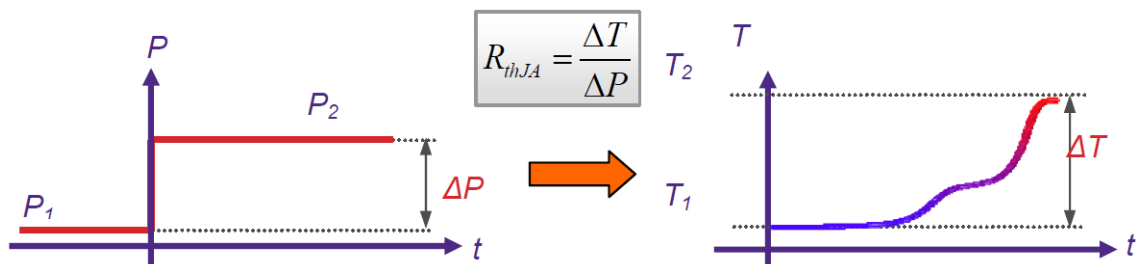
- 1) 改变电子器件的功率输入;
- 2) 通过测试设备 TSP(Temperature Sensor Parameter)测试出电子器件的瞬态温度变化曲线;
- 3) 对温度变化曲线进行数值处理,抽取出结构函数;
- 4) 从结构函数中自动分析出热阻和热容等热属性参数。

结构函数描述的是封装热流路径上热阻与热容参数。通过对芯片热相关参数的测试,得到芯片的温度变化瞬态曲线,可以从温度的变化曲线中通过数值变化得出其结构函数。

1.2 T3Ster 热测试仪的组成

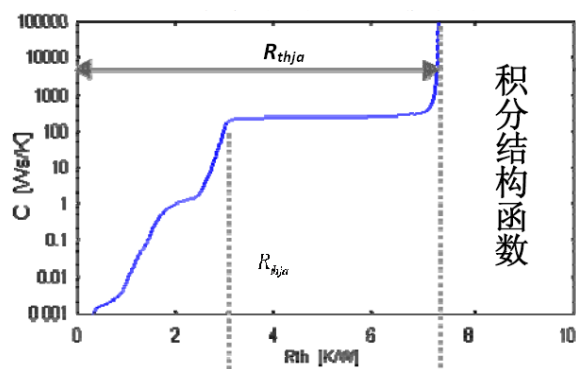
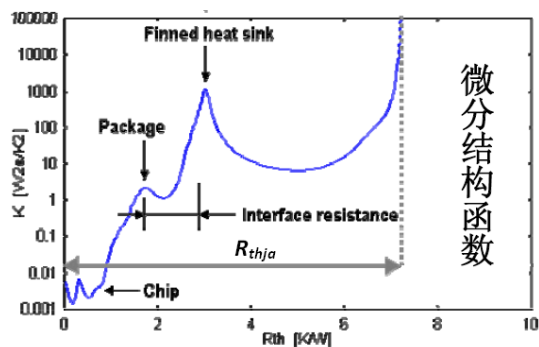
T3ster 的基本配置包括测试主机(包括数控单元、功率驱动单元和 1-8 个测试通道)以及安装于 Windows 平台的测量控制和结果分析软件。如图 2、图 3 和图 4 所示。

T3Ster 适用于测试不同的电子器件和材料,如图 5: 分离或集成的双极型晶体管、常见的三极管、LED 封装和半导体闸流管、以及大功率 IGBT、MOSFET 等器件;任何复杂的 IC 器件(利用其内置的基板二极管);具有单独加热器和温度传感器的热测试芯片;各种材料包括复合材料如 PCB 等的导热系数;各类材料之间表面接触热阻测量等。利用配备的 USB 接口卡,测试仪器可以和任何一台电脑互联,测试的数据可以实时分析也可以在测试后进行分析。如图 3 所示的 T3ster 软件可以通过对话框控制 T3ster 仪器参



第一步：改变设备功率的输入

第二步：通过测试 TSP 热相关参数获取瞬态的温度变化



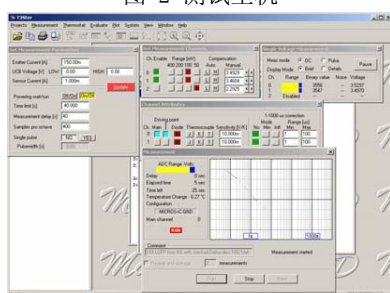
第三步：通过对第二步的温度变化曲线进行处理，得出包含热阻和热容信息的结构函数

第四步：从第三步得到的结构函数上获取热阻和热容等热参数

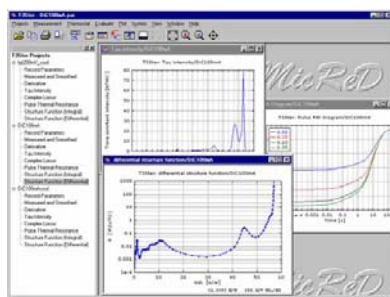
图 1 T3Ster 测试方法



图 2 测试主机



(a)



(b)

图 3 测量控制软件

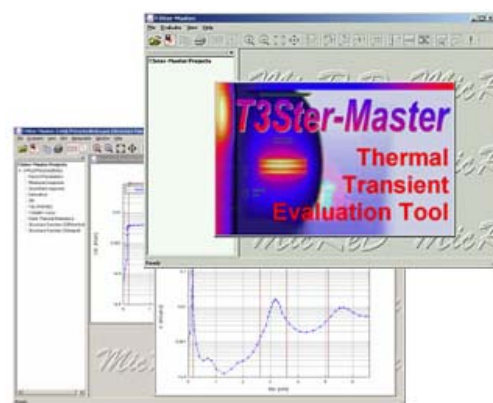


图 4 结果分析软件



图 5 T3Ster 可以测试所有的半导体器件数，如电压、电流、加热等等。在测试时，T3Ster 软件可以进行实时瞬态数据采集，并将采集的数据实时以图像的形式进行显示。如图 4 所示的 T3Ster 后处理软件 T3Ster-Master 提供了数据分析功能。利用软件内置的材料库，通过测试出的瞬态数据，软件可以分析出时间常数谱；脉冲热阻图；测试得热阻抗的复杂轨迹；积分结构函数和微分结构函数等。利用 T3Ster Master 的数

据导入功能,可以将任何仿真得到的瞬态温度结果导入,并与实测的数据结果进行对比,快速修正芯片封装的仿真模型,使之更接近实际。

另外,可以根据不同的试验需求选择相应的T3Ster 附属配件:

如图 6 所示尺寸为一立方英尺的静止空气测试温箱可以提供满足 JEDEC 组织 JESD51-2 的测试环境。



图 6 静止空气测试温箱

如图 7 所示与 T3ster 配套的恒温箱采用热电致冷芯片,既可用于作为“冷板”,也可用于对设备参数进行校准^[8]。例如对晶体管发射结正向压降 V_{BE} 随结温 T_J 线性变化的温度系数 K 的修正^[9]。

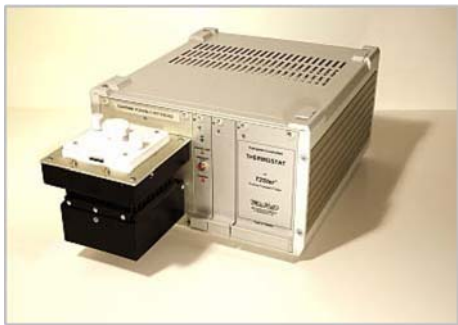


图 7 恒温箱

2 使用 T3Ster 对某元器件的内热阻进行测量

本试验采用的元器件如图 8 所示。使用 T3Ster 利用元器件内部的二极管结构测量元器件的内部热特性。测量时,可以先对器件加电,从断电瞬间开始测量器件内部温度变化情况;也可以从器件加电瞬间开始测量器件内部的温度变化情况。本试验中采用前者。因为断电后测得的数据完全由器件自身的热特性决定,若采用后

者,在加电情况下测量,电压的轻微波动就会造成实验测试的不准确,从而影响实验结果。

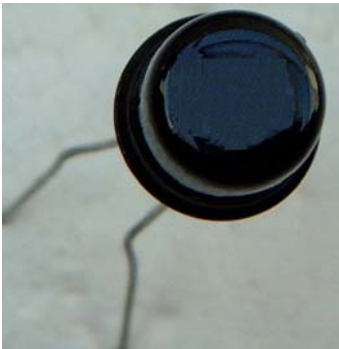
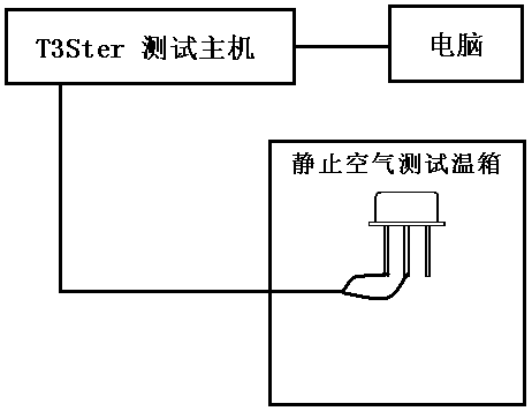
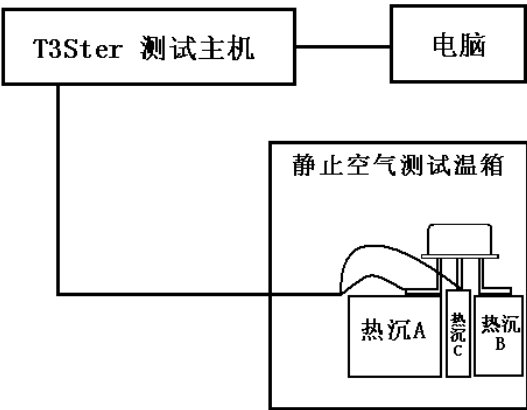


图 8 试验用元器件

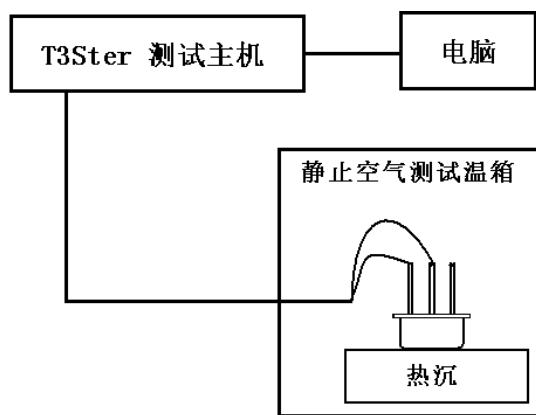
实验在静止空气测试温箱中进行,分别测量了器件在图 9 所示的四种热边界条件下芯片温度随时间的变化情况,并得到了相应的结构函数曲线。T3Ster 具有很好的测量重复性,为了提高测试精度,每种工况下均取 10 次重复测量的平均值进行分析。四种热边界条件分别是:器件处在自然对流条件下、器件管腿连接热沉、器件壳体顶部通过导热硅橡胶与热沉粘接、器件壳体底部通过导热硅橡胶与热沉粘接。实验测得的该器件封装的结构函数曲线如图 10 所示,图中所



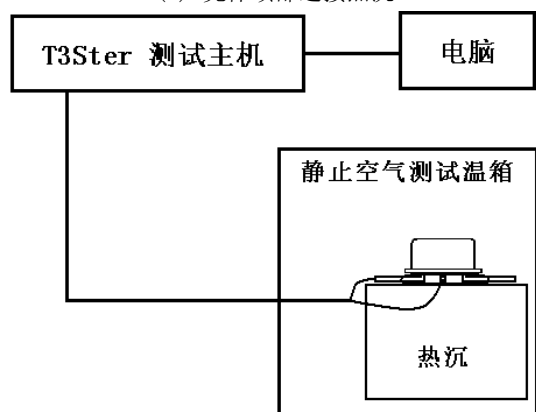
(a) 自然对流



(b) 管腿连接热沉



(c) 壳体顶部连接热沉



(d) 壳体底部连接热沉

图 9 器件四种不同的热边界示意图

示是一个半对数坐标系上的曲线，横轴 R_{th} 代表热流路径上的热阻，纵轴 C_{th} 代表热流路径上的热容。该封装的芯片安装在管壳底部，通过保护罩封盖，因此将器件底部与热沉连接的散热效果最好；将器件倒立，使其顶部与热沉连接的效果较差，此时芯片产生的热量只能通过通过热沉散热或通过从管壳底部传导至管壳顶部的自然对流散热，由于器件倒立，自然对流效果较差。从图 10 中可见，曲线 1 中结与环境间的热阻 R_{JA} 最小，反映了图 9 (d) 所示情况；曲线 2、3 的 R_{JA} 相差无几，反映了图 9 (a)、(b) 的情况，说明对于该类型的封装，管腿连接热沉与否对散热效果影响甚微；曲线 4 的 R_{JA} 最大，反映了图 9 (c) 的情况。四种不同热边界条件下的结构函数曲线在 A 点以前重合很好，从 A 点开始分岔，说明 A 点之前重合部分属于器件内部热特性，A 点之后由于器件外部边界条件的不同引起了曲线走向的差异。如图 10 中所示，测量得 A 点处的热阻值为 $37.9732K/W$ ，热容值为 $0.073735W/s/K$ 。

使用 T3Ster 测得的器件内热阻值为 $37.9732K/W$ ，对比器件资料中厂家给出的内热阻

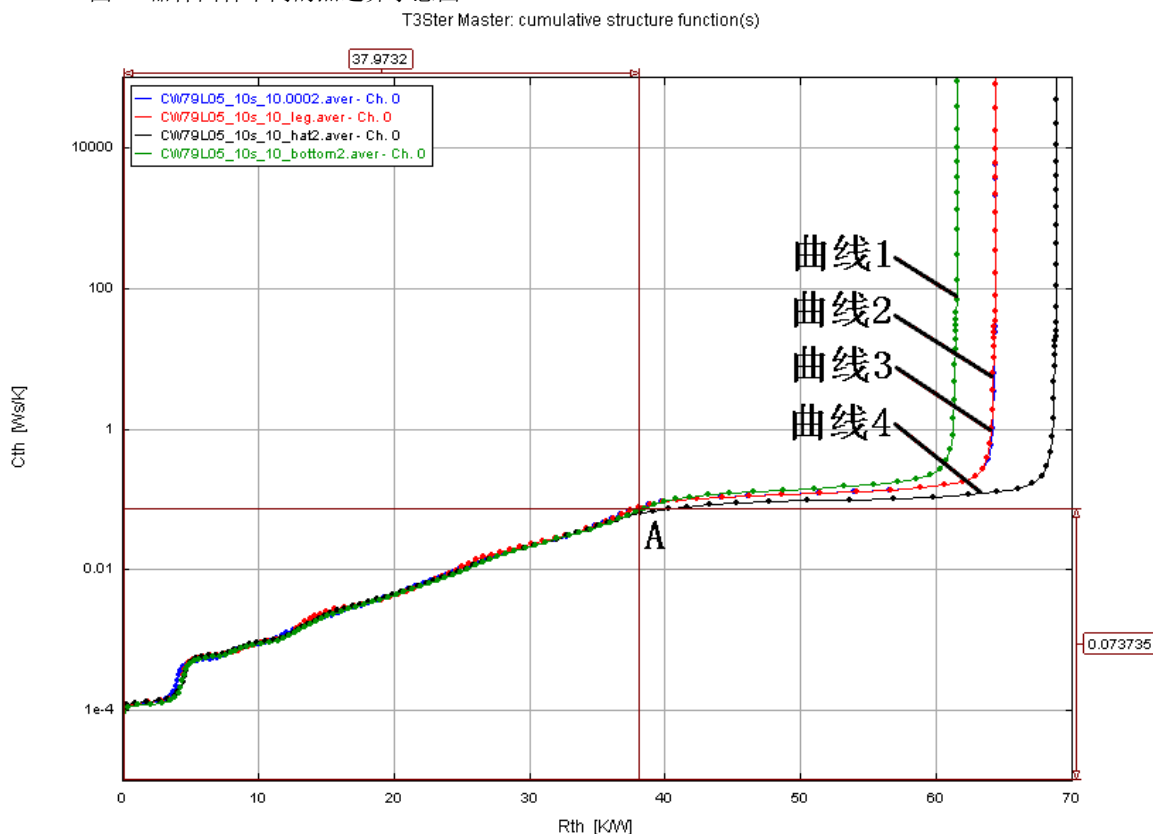


图 10 四种热边界条件下器件封装的结构函数曲线

38K/W, 相对误差为 0.07%, 说明了实验结果的准确性。证明测量数据真实可靠。

3 结论

T3Ster 采用非破坏稳态实时测试方法, 结合其精密的硬件可以快速精确捕捉到高信噪比的温度瞬态曲线, 通过分析得到关于该电子器件的全面的热特性。使用 T3Ster 对某元器件内部热特性进行了测量并与器件资料进行比对, 二者相对误差仅有 0.07%。实验证明了 T3Ster 热测试仪具有以下优点:

- 1) 设备性能稳定, 重复性好;
- 2) (2) 设备精确度高, 温度分辨率为 0.01℃;
- 3) 设备适用范围广, 可以测试各类器件的热特性。

T3Ster 热测试仪的上述特性证明其具有满足测试宇航级电子元器件热特性的能力, 为宇航级电子元器件的热设计与热分析提供重要的实验依据。可用于完善航天器及其分机热分析过程, 提高热分析的准确性, 为热试验结果修正提供仿真分析支持等。

参 考 文 献

-
- [1] 于慈远, 于湘珍, 杨为民. 电子设备热分析/热设计/热测试技术初步研究. 微电子学, 2000, 30(5):334-337
 - [2] 贾曦. 航电设备热设计中界面接触热阻的热测试及仿真: 硕士学位论文, 成都, 电子科技大学, 2008
 - [3] Evans W.H. The Measurement of Electric Fields in Clouds [J]. Pure Appl Geophys, 1965, 62(III): 191-197
 - [4] 张栋, 付桂翠. 电子封装的简化热模型研究. 电子器件, 2006, 29(3): 672-679
 - [5] Henning Dieker, Christian Miesner, Dirk Püttjer, Bernhard Bachl, Comparison of different LED Packages, Manufacturing LEDs for Lighting and Displays, Proc. Of SPIE. 6797 (2007) 679701-1-679701-12.
 - [6] V. Sze'kely, V.B. Tran, Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method, Solid-State Electron. 31 (1988) 1363-1368
 - [7] V. Sze'kely, THERMODEL: a tool for compact dynamic thermal model generation, Microelectron. J. 29 (1998) 257-267
 - [8] V. Sze'kely, S. Ress, A. Poppe, et al. New approaches in the transient thermal measurements, Microelectronics Journal. 31(2000)727-733
 - [9] T3Ster User's Manual, version 1.1, Mentor Graphics Corporation, MicRed Division 2009