

# 热应力下半导体的寿命评估

**Shawn Han**

**China Telecom Application Team**

## 摘 要

本文通过对热应力和可靠性概念的介绍，根据阿列纽斯模型和卡方分布，得出热应力下的半导体的寿命估算方法。然后以串行解串器 TLK6002 和时钟芯片 LMK04800 为例，估算出了高温条件下的平均无故障时间。这个估算方法适用于所有半导体芯片的寿命评估，可以作为工程师在器件选型及系统可靠性评估时的参照。

## 目 录

1. 介绍 .....	2
2. 热应力和可靠性 .....	2
3. 预测不同热应力下的 MTTF .....	5
4. 总结 .....	7
5. 参考资料 .....	7

## 1. 介绍

在选用一个新器件的时候，我们往往需要知道该器件的可靠性指标，比如平均失效时间（MTTF：Mean Time To Failure），以便估计新设计产品的平均使用寿命。对于芯片的可靠性取决于环境条件，最重要的就是电气应力和热应力。芯片规格书往往会给出绝对最大额定参数（Absolute Maximum Ratings）和推荐工作条件（Recommended Operating Conditions）。在实际应用中，电气应力的条件比较容易理解和测量，本文将重点放在热应力的讨论上。通过本文，读者将掌握芯片在热应力下失效率和寿命的估算方法。

## 2. 热应力和可靠性

### 2.1 失效率浴盆曲线 (Bathtub curve)

将芯片的失效率与工作时间的关系划出一条浴盆曲线（图 1），横坐标表示器件工作时间，纵坐标表示失效率。器件的整个使用寿命分为 3 个阶段：早期失效期（Early Life Period / Infant mortality），可用寿命期（Useful Life Period），耗损失效期（Wearout Period）。其中，可用寿命期的失效率通常是相对恒定的，而且应当比较低。可用寿命期是可靠性预测时最常用的一个时间段，该周期影响因素包括：气压，机械应力，热循环，电学应力等。这时候芯片内硅片（Die）的温度决定了何时触发耗损失效期。本文的失效率估算也是基于这个阶段的工作条件。

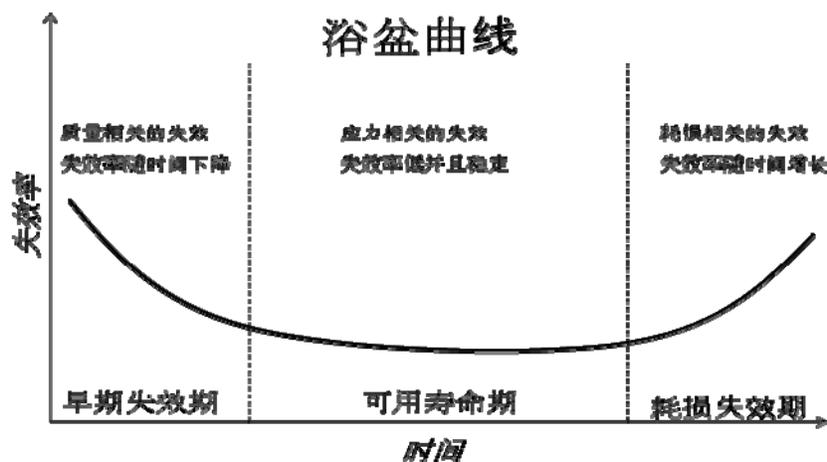


图 1 失效率浴盆曲线

## 2.2 失效率 ( Fail Rate ) , 平均故障间隔时间 ( MTBF ) 和 平均无故障时间 ( MTTF )

失效率是指在指定一段时间内器件失效的数量。

$$\lambda = \frac{m}{H} \quad D\_Dd \text{_____}$$

$$\lambda \text{ [ ] } \wedge \_D\_Dd \text{_____} \quad \tilde{U}\delta z z \text{_____}$$

另外一种更为常见的表示是用每 10 亿 (  $10^9$  ) 小时失效个数来表示, 单位为 FIT ( Failure In Time ) 。

MTBF ( Mean Time Between Failures ) 预测了一个系统 2 次相邻失效发生的平均时间间隔, 通常在可修复的系统中使用。MTTF ( Mean Time To Failure ) 表示平均发生 1 次失效需要的时间。MTTR ( Mean Time To Repair ) 表示平均维修时间。MTBF, MTTF 和 MTTR 都用小时表示。

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad D\_Dd \text{_____}$$

由于芯片损坏一般不可修复, 所以维修时间忽略不计, 我们可以认为对于芯片失效 MTBF 等效于 MTTF, 下文统一写作 MTTF。失效率和 MTTF 是互为倒数的关系。

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad \wedge \_ ( \_ ) \text{_____}$$

## 2.3 阿列纽斯模型 ( Arrhenius Model )

我们在实验室里测试芯片, 样本数量有限, 环境温度有限, 特别是时间有限, 我们不可能为了等一次芯片失效, 做上几十年的测试而去获得该芯片的平均寿命。加速寿命试验提供了一组高应力下寿命特征数据, 如何推导出正常应力下的寿命特征呢? 必须建立应力和寿命之间的关系, 或者叫做加速模型。对于温变和失效时间的预测, 最常用的加速模型就是阿列纽斯模型, 对应的方程叫做阿列纽斯方程 ( Arrhenius Equation )。这是一个经验公式, 在 1884 年由荷兰化学家 J. H. van 't Hoff 提出, 1889 年瑞典化学家 Svante Arrhenius 给出了物理解释。

$$k = A e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$k$  —  $D\_Dd$  前因子常数,  $E_a$  — 激活能量 ( Activation Energy ) ,

$k_B$  — 玻尔兹曼常数 ( Boltzmann constant ) ,  $T$  \_\_\_\_\_



$$MTTF_{Use} = MTF_{Test} \times AF \quad \_D\_Dd\_\_\_\_\_\_$$

假设实验数据是在结温  $T_{test}$  时获得的。当测试  $n$  个样本持续时间  $h_0$ ，只知道失效了  $m$  个，没有记录具体的失效时间，这时候  $H=n \times h_0$ ，自由度  $\gamma$  为  $2m+2$ 。

$$MTTF_{Use} = \frac{2H}{\chi^2_{\gamma/2, m}} \times AF = \frac{2H}{\chi^2_{2m+2, 1-\alpha}} \times AF \quad \_()\_D\_Dd\_\_\_\_\_\_$$

对于不同的置信等级，我们还可以演变出如下公式：

$$MTTF_{Use(\alpha_2)} = \frac{\chi^2_{\gamma/2, m}}{\chi^2_{\gamma/2, m_2}} \times MTF_{Use(\alpha_1)} \quad \text{-----} \quad (11)$$

有了这些公式，我们就可以用来预测特殊结温条件下的器件寿命了。

### 3. 预测不同热应力下的 MTTF

#### 3.1 串行解串器 TLK6002

TLK6002 是双通道多速率的串行解串器，串行速率可达到 6.25Gbps，通常可用于不同制式的无线基站中。我们可以从TI官方网站查询到该器件的可靠性数据，如下表。我们将用这些数据估算出结温 105 度，置信等级 90%时的MTTF。

表 1 TLK6002 的可靠性数据

Part #	Early Life Failure Rate	Early Life Failure Rate Supporting Data				MTBF / FIT Supporting Data								
	ELFR-DPPM	MTBF	FIT	Confidence Level (%)	Test Temp. (°C)	Sample Size	Number of Failures	Usage Temp. (°C)	Confidence Level (%)	Activation Energy (eV)	Test Temp. (°C)	Test Duration (hrs)	Sample Size	Number of Failures
TLK6002ZEU	-	5.318* 10 <sup>7</sup>	18	-	-	-	-	55	60.0	0.66	-	-	-	-

根据已知条件， $E_a = 0.66 \text{ eV}$   $MTTF_{Test(60\%)} = MTBF = 5.318 \times 10^7$  Hours

设定  $T_{test} = 273.15 + 55 = 328.15 \text{ K}$ ， $T_{Use} = 273.15 + 105 = 378.15 \text{ K}$

首先，利用公式(6)计算加速度因子

$$AF = e^{\left[ \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{Use}} - \frac{1}{T_{Test}} \right) \right]} = e^{\left[ \frac{0.66 \text{ eV}}{8.617382 \times 10^{-5} \text{ eV/K}} \left( \frac{1}{378.15 \text{ K}} - \frac{1}{328.15 \text{ K}} \right) \right]} = 4.57 \times 10^{-2}$$

如果是相同的置信等级 60%，那么使用公式(9)：

$$MTTF_{Use(60\%)} = MTF_{Test(60\%)} \times AF = [ ] \times 10^7 \times 4.57 \times 10^{-2} = 2.429 \times 10^6 \text{ Hours}$$

等效于 284 年，就是说对于任何一颗 TLK6002 在结温 105 度时，有 60% 的机会器件寿命能达到 284 年及以上。

如果置信等级为 90%，代入公式(11)：

$$\frac{MTTF_{use(90\%)}}{X_{T_{2m+2.1-60\%T}^2}} \times MTTF_{use(60\%)} = \frac{X_{T_{2m+2.04}^2}}{X_{T_{2m+2.01}^2}} * 2.429 * 10^6 = 9.67 * 10^5 \text{ Hours}$$

即 TLK6002 在结温 105 度时，有 90% 的机会寿命达到 110 年及以上，这个寿命足够大部分设备使用的了。

德州仪器提供了一个计算表格可以估算指定条件下的 MTBF 数据，这其实就是将上述分析方法格式化的一个工具，可以在德州仪器官方网站搜索“Reliability Estimator”获得这个工具的下载和使用方法。

### 3.2 时钟芯片 LMK04800

LMK04800 系列是双锁相环低噪声时钟去抖器件，对于无线和有线通信系统、测试和测量设备、医疗成像系统、软件无线电系统和数字广播设备，该系列器件的低相位噪声除了可以提高系统的稳定性之外，也可降低整个物料清单的成本。由于该系列器件应用广泛，在一些特殊场合，LMK04800 的结温会达到 125 摄氏度，那么这时候的器件寿命会怎样呢？

通过芯片厂商的官方网站(www.ti.com 或者 www.national.com)，我们可以查询到如下可靠性数据。

表 2 LMK04800 家族的可靠性数据

Part Number	Process	EFR Reject	EFR Sample Size	PPM	LTA Rejects	LTA Device Hours	FITS	MTTF (Hours)
LMK04803BISQ	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897
LMK04803BISQE	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897
LMK04805BISQ	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897
LMK04805BISQE	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897
LMK04806BISQ	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897
LMK04806BISQE	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897
LMK04808BISQ	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897
LMK04808BISQE	BICMOS8B+	0	3632	0	0	2762292	2	783807897

上表中，我们对早期失效率（EFR：Early Failure Rates）不做讨论，对于长期失效率的指标 FITS 和 MTTF 是计算得来的。原始数据来自长期审计计划（LTA：Long Term Audit）工作寿命（OPL）测试，测试的温度是 150 摄氏度；然后，利用阿列纽斯方程在 0.7eV 激活能量降额到 55 摄氏度，以 60% 的置信等级表达出来。晶圆制造工艺是一直被监控着的，以表 2 为代表的这些可靠性数据会在官方网站定期更新。

从表 2 中我们获得一些有用信息：LMK04800 家族器件在结温 150 摄氏度中测试的总时间  $H=2762292$  小时，没有失效器件（LTA Rejects = 0），等效于在结温 55 摄氏度中的平均无故障时间  $MTTF_{USE(100\%)}$  为 783807897 小时。

利用这些数据 and 公式(6)、(10)，我们可以折算出在结温 125 摄氏度时，LMK04800 的置信等级为 90% 时的  $MTTF_{USE(90\%)}$  约为 4004219 小时，约合 457 年。

这些计算结果可以用来评估系统产品的寿命。如果希望系统有更长的使用寿命，更低的失效率，那么我们就需要增加散热措施，将器件结温控制在一个合适的温度下。

## 4. 总结

通过阿列纽斯加速模型和芯片厂商提供的可靠性测试数据，本文提供了一种估算不同温度应力下的失效率或器件寿命的方法。实际情况芯片可靠性还会受到其他因素的影响，比如封装的可靠性，湿度应力，电学应力等等，但温度作为最具代表性的应力，在其他应力条件在正常范围内时，决定了器件的寿命，所以这些估算对于系统可靠性设计还是非常有意义的。

## 5. 参考资料

- Understanding Integrated Circuit Package Power Capabilities, National Semiconductor, Application Note 336, Charles Carinalli & Josip Huljev, 2002
- Arrhenius equation, [http://en.wikipedia.org/wiki/Arrhenius\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Arrhenius_equation)
- Calculation of Semiconductor Failure Rates, William J. Vigrass
- MTTF, FAILRATE, RELIABILITY AND LIFE TESTING, Bob Seymour

## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a>	通信与电信	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a>	计算机及周边	<a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a>	消费电子	<a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a>	工业应用	<a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a>	医疗电子	<a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a>	安防应用	<a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a>	汽车电子	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a>	视频和影像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>		
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>		
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/omap">www.ti.com.cn/omap</a>		
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a>	德州仪器在线技术支持社区	<a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122  
Copyright © 2013 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司