

温度对微电子 和系统可靠性的影响

Influence of Temperature on Microelectronics
and System Reliability

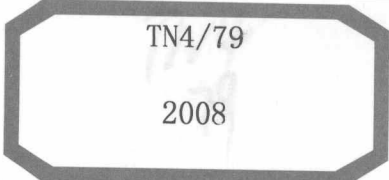
(美) Pradeep Lall Michael G. Pecht Edward B. Hakim 著

贾颖 张德骏 刘汝军 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



TN4/79

2008

本书由总装备部装备科技译著出版基金资助出版

温度 (97) (目 录 页 次 图)

温度对微电子 和系统可靠性的影响

Influence of Temperature on Microelectronics
and System Reliability

(美) Pradeep Lall Michael G. Pecht Edward B. Hakim 著

贾颖 张德骏 刘汝军 译

国防工业出版社
(北京市西城区紫竹院南路22号 邮编100044)

国防工业出版社

发行部电话: (010) 68415332 发行部传真: (010) 68415332
发行部地址: 北京

著作权合同登记 图字:军—2004—003 号

图书在版编目(CIP)数据

温度对微电子和系统可靠性的影响/(美)拉尔(Lal,P.),
(美)派特(Pecht,M.G.), (美)哈吉姆(Hakim,E.B.)著;
贾颖等译. —北京:国防工业出版社,2008.7

ISBN 978-7-118-05484-2

I. 温... II. ①拉... ②派... ③哈... ④贾... III. 温度—影
响—微电子技术—系统可靠性 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 184179 号

Simplified Chinese translation copyright © 2004 by National Defence Industry Press(Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability by Pradeep Lal, Michael G. Pecht, Edward B. Hakim. Copyright © 1997, by CRC Press LLC)

本书简体中文版由 CRC 出版社授予国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵犯必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 323 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

译者序

在各行业自动化信息化的需求驱动下,特别是 IT 产业、航空、航天和国防工业发展的需求牵引,如今电子工业已成为全世界最大的工业。半导体器件和微电子技术作为电子工业的核心技术,其发展速度遥遥领先于其它技术。相对国外先进的微电子技术,国内半导体器件产品的固有质量与可靠性有待提高。这不仅反映在器件设计和制造工艺方面的差距,在器件的使用方面,电子产品设计师对器件的不当使用也反映出使用者对器件可靠性的认识存在误区。例如,电子产品设计师通常总是认为只要降低工作温度就能提高产品的可靠性,而忽略对器件的正确选择与使用,忽略对失效机理的分析与判定,因而,重复过去的错误。

译者作为电子产品可靠性研究工作者,期望能得到一部对半导体器件(特别是半导体集成电路)设计者和使用者有启发和指导意义的器件可靠性专著。很幸运我校高泽溪教授和屠庆慈教授向我推荐了 Motorola 公司先进制造技术中心的 Pradeep Lall,马里兰大学 CALCE 电子封装中心 Michael G. Pecht 和美军研究实验室 Edward B. Hakim 合著的《Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability》,译为《温度对微电子和系统可靠性的影响》。

这是一部半导体器件可靠性物理专著,重点讨论了微电子器件失效机理与温度的关系、微电子封装失效机理与温度的关系、双极型晶体管和 MOS 型场效应晶体管电参数与温度的关系、集成电路老化失效物理,提出了微电子器件温度冗余设计和应用准则、电子器件封装的温度冗余设计和使用指南,归纳总结了稳态温度、温度循环、温度梯度及时间相关的温度变化对器件可靠性的影响。译者认为这些内容对电子产品设计师、质量师和可靠性工作者具有启发和指导作用,半导体器件设计和制造工程师、电子产品设计师和器件失效分析工作者从中也将得到裨益,对提高国产半导体器件的质量和可靠性将产生积极作用。本书也可以作为微电子器件和电子产品可靠性专业本科生和研究生的参考教材。

全书共九章,第 1 章至第 3 章由贾颖翻译,第 4 章至第 7 章由张德骏翻译,第 8 章和第 9 章由刘汝军翻译。中国振华集团永光电子工厂总工程师杜瑞文高工审校了译文初稿,西安电子科技大学微电子学院贾新章教授审校了译文终稿。本书在翻译过程中得到了西安电子科技大学张德胜教授的指点,并推荐贾新章教授审校译文全文。在翻译过程中译者向清华大学贾松良教授请教封装术语及其翻译都得到帮助。中国

电子技术标准化研究所胡燕所长对本书的翻译工作给予热情帮助,翻译了第1章部分内容。电子科技大学谢孟贤教授在本书翻译初期对前3章译文进行了校对。在此译者向曾给予帮助的教授和专家表示衷心的感谢!最后,我们衷心感谢国防工业出版社的编辑,他们认真细致的工作态度和良好的合作精神对本书出版起到了重要作用。

由于译者水平有限,译文中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

译者

2007年6月于北京航空航天大学

人前無興有眼附發其前不友張氏直更感同不并禁性干申端叔县香齋館向面計本
 封解財平氏社如，眼解并器并号半，脚基并器直發 20M 昨堅耐双备具如香齋。士

原 序

。斯賦館學代

一般认为，降低温度就可以提高电子系统的可靠性。“温度降低 10°C ，可靠性就会提高 1 倍”这一标语已成为一些设计工程师的设计原则。人们一直坚信温度会对元器件产生不利影响，所以就产生了当今的筛选和热控制方法。

人们过度重视稳态温度的影响也不是没有道理的。因为从快速失效分析中发现，器件失效好像是由于高稳态温度引起的。例如，设计或使用不当导致的失效，其一般特征是熔化或者热击穿。因此，一般都认为这种失效是由于温度太高而导致的。这种失效到底是高温的结果还是由于设计上的问题而导致的温度升高？而结温过高可能是失效的一个原因，高温也可能是由静电放电产生的瞬时高能或电过应力引起的。即使失效的原因是结温过高，但是仍然不能确定降低工作温度是否就能提高可靠性。

稳态温度是否能代表所有温度因素对微电子器件可靠性的影响？例如，在温度循环剖面的温度由于封装器件的热扩散能力不同，温度特性就表现为大的空间温度梯度。温度梯度经常会引起芯片封装界面热机械疲劳，从而导致慢退化。

必然的结论是，由稳态温度相关模型可知稳态温度对系统可靠性的提高有一些不利影响，在提高可靠性时必须高度重视其它温度因素如温度循环、时间相关温度的变化和温度梯度的影响。

本书讲什么

本书的目的是提高对热设计准则的理解水平，目标是给设计组提供充分的知识，通过回答下列问题，帮助他们评价器件结构平衡和工作温度的影响：

- (1) 有必要降低温度吗？
- (2) 如果有必要降低温度，那么作为材料、制造工艺、器件结构及制造加工的函数，这个较低温度值应该是多少？
- (3) 最高工作温度是如何随微电子器件设计变化的？
- (4) 什么样的器件设计和制造修正对提高器件在期望寿命期最高允许工作温度是必要的？
- (5) 在温度应力条件下制造缺陷数量如何使失效时间发生变化？
- (6) 制冷系统增加的费用和质量是可能避免的吗？

本书的读者

本书面向的读者是对微电子封装在不同温度应力形式下的失效机理有兴趣的人士。读者应具备双极型和 MOS 场效应器件基础、半导体器件物理、破坏力学和弹性力学的知识。

本书将有助于读者评估高温条件下不同等级的工艺缺陷对器件工作寿命的影响,以便改进现有的筛选方法,最大限度地发现缺陷,提高器件的整体质量。而且还有助于读者衡量避免增加额外费用和制冷系统重量的方案的可行性,得到器件在高温下的可靠性设计。

本书的内容

本书讨论的微电子封装假定为双极型和 MOSFET(硅)半导体器件,涉及一级互连,可以是引线键合、倒装芯片和载带自动焊,芯片粘接、衬底、衬底粘接、外壳、上盖、上盖密封和引脚封装。对各种封装元素在不同形式温度应力下的失效机理进行了鉴别,这些温度应力包括稳态温度、温度循环、温度梯度和温度随时间的变化。调查覆盖了 $-55^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 范围下的失效机理,超出该范围,考虑到应力的关系,微电子封装的失效机理将会发生很大变化。研究了温度对双极型和 MOSFET 器件电参数的影响并为量化温度对封装元素的影响建立了模型。本书不仅介绍了器件工艺中存在的失效机理,还分析了双极型和 MOSFET 器件及装配,例如电路卡、印刷线路板、二次装配和装配。对给定的微电子封装结构,采用温度相关模型得到降额准则来确定允许的最高温度和最低温度。

第 1 章以微电子产品的可靠性为背景,说明了编写本书的动机,并概述了一些建模策略上的问题。

第 2 章和第 3 章向读者介绍了微电子器件的失效机理,基于其在芯片级和封装级与稳态温度、温度循环、温度梯度和温度变化率的关系。通常认为,微电子封装就是对封装元素的组装,这些元素包括芯片、芯片金属化、片上工作器件、芯片粘接、衬底、衬底粘接、一级互连(引线键合、倒装芯片和载带自动焊)、引脚、上盖、引脚封装和上盖密封。为描述失效机理的特点建立了失效物理模型,各种失效机理与温度的关系是可变的。我们还讨论了温度阈值,如果温度低于阈值,失效机理将不能被激活。

第 4 章和第 5 章向读者介绍了温度对 MOS 和双极型器件性能参数的影响。双极型器件的参数包括电流增益、 $I-V$ 特性、极电极—发射极饱和压降和电压转换特性。MOS 器件的参数包括阈值电压、迁移率、漏极电流、延迟时间、泄露电流、芯片可用性、直流电压转换特性和噪声容限。

第 6 章讨论了高可靠性的应用,向读者介绍了高温应力筛选的应用,包括老化。器件生产厂家采用老化条件进行产品的检验。本章还介绍了失效物理方法,这种方

前言

关于 Arrhenius 方程式

它不过是一个行走的影子，一个可怜的小丑，
它在舞台上如此地炫耀和挥霍着它的生命，
稍后便销声匿迹；
它像一个谣传，被愚人相传，充满错误和危险，
没有任何意义。

每当我看到与电子元器件或系统的热控制有关的论文中作者以“温度降低 10°C ，可靠性提高 1 倍”这种认识支持其研究结果时，上面那段话（稍加改编过的）不禁闪现在我的脑海里。如今，没有任何理由沿用那些锗时代实验结果得出的结论。公开文献已充分证明上述加深与现场失效数据不符。在大多数工作温度范围内，稳态温度与物理失效机理几乎无关。失效机理决定着可靠性的表现。当然，确实存在一些例外，但即便是这些个例，也不能通过上面陈述的执行得到解决。

Arrhenius 基本原理仍然是大多数规范协议的基础；这使人们很少注意到这样一个事实：即所谓的与可靠性问题相关的机理根本还没有弄清楚。结果，大量的资金浪费在迎合无用的规范上，而用在有意义的规范研究上的经费却微乎其微。因此，本书将深受读者欢迎，特别是受那些工作在微电子器件领域的读者欢迎，因为本书总结了可靠性物理发展状况，指出了当前规范中的错误，提供了另一种物理上的解释。

科莱门斯·雷森思

热控制科学家

飞利浦研究中心

符号说明

α	热膨胀系数		
α_h	空穴生长系数		应力
α_r	多层金属化电阻的温度系数	$\sigma_{ult, att}$	粘接材料的张力强度
$\beta_{an, ox}$	阳极表面易氧化的百分数	σ_y	金属化层的生长能力
γ	场加速度参数	τ_c	俘获时间常数
$\gamma_{ef, acc}$	电场加速度参数	τ_{da}	芯片粘接界面的剪切应力
$\gamma_{p, att}$	塑性张力的幅度	τ_{hf}	粘接材料的剪切应力
$\Gamma_{sf, ar}$	单位面积的表面能	$\tau_{0, ox}$	预指数时间常数的室温值
$\Delta\gamma_{p, att}$	芯片粘接塑性张力的幅度	τ_{tc}	时间常数
$\Delta g_{gb, ox}$	氧化层击穿过程的的吉布斯自由能	$\tau_{v, met}$	金属化层中空穴的平均寿命
Δh_{ox}	激活多晶硅的比热变化量	ϕ	浓度梯度引起的反向扩散
ΔT_0	焦耳热温升	ψ_{wf}	电子的波函数
ε_{cf}	可塑性疲劳系数	$w_{0, met}$	金属化层的标准宽度
ε_T	热张力	w_b	晶界厚度
η_h	空穴俘获效率	w_{met}	金属化层的宽度
λ_R	器件失效率	a	裂缝尺寸
μ_{gh}	金属离子(沿金属化层的)的迁移率	A	面积
μ_{met}	金属化层的剪切系数	$A_{g, Black}$	Black 电迁移系数
$\mu_{v, met}$	金属化层中的空穴迁移率	A_{gt}	栅面积
ν	泊松比	a_i	初始裂缝的尺寸
π_i	器件工艺、综合性、封装的功能系数	$A_{le, cf}$	热电子系数
π_T	温度加速因子	A_{ox}	氧化层电介质击穿
ρ	金属化层的电阻率	A_{paris}	Paris 系数
ρ_{chem}/Z_{chem}	电解质的电阻率	$A_{sddv, ok}$	应力驱动扩散空隙的
$\sigma_{0, met}$	温度变化产生的金属化层应力	$B_{gm, fet}$	晶界迁移几何因子
σ_{da}	垂直于裂缝的静态应力	$B_{gt, fet}$	母体扩散几何因子
$\sigma_{psv, met}$	钝化层在金属化层产生的	$B_{lc, ex}$	热电子指数
		b_{vt}	Burger 矢量
		C	电容
		C_{by}	体电容
		C_{cf}	可塑性疲劳指数

C_{hf}	热传输系数
$C_{\text{i,bulk}}$	离子玷污(体内)
$C_{\text{ml,fac}}$	材料相关因子
$C_{\text{v,met}}^0$	热平衡空穴浓度
C_{ox}	氧化层电容
$C_{\text{p,vi}}$	Venables 和 Lye 比例常数
$C_{\text{p,chp}}$	半导体材料的比热容
$C_{\text{pr,hm}}$	Hickmott 比例常数
$C_{\text{rr,ox}}$	氧化层击穿的反应速率常数
$C_{\text{st,fac}}$	结构相关因子
$C_{\text{th,em}}$	热发射系数
$C_{\text{v,met}}$	金属化层中空穴的浓度
$C'_{\text{vc,f}}$	失效发生时空穴浓度的临界值
D_0	金属化层的扩散系数
$d_{\text{ave,met}}$	平均晶粒尺寸
d_{chp}	芯片密度
d_{dndt}	枝晶密度
d_{sm}	半导体材料的质量密度
$d_{\text{v,met}}$	金属化层中空穴的密度
$D_{\text{v,met}}$	晶界空穴的扩散系数
e	电子电荷
E	弹性模量(杨氏模量)
E_{a}	激活能
E_{h}	预指数的激活能
E_{c}	导带能级
E_{f}	费米能级
$E_{\text{f,ch}}$	电绝缘层/氧化层电场
$E_{\text{int,ax}}$	电绝缘层的内部能量
E_{ox}	氧化层电场
E_{s}	氧化层的介电常数
$E_{\text{th,apt}}$	时间相关电绝缘层的外部激活能量
F	法拉第常数
F_{diff}	扩散力
G	剪切模量
h	普朗克常数
$h_{0,\text{met}}$	金属化层的的标准厚度

X

h_{cond}	导体层厚度
$h_{\text{f,chp}}$	芯片单位体积的热容量
h_{met}	金属化层的对流热传输系数
H_{ox}	电绝缘层的热容量
I_{B}	基极电流
I_{C}	集电极电流
I_{E}	发射极电流
I_{in}	氧化层的 Fowler - Nordheim 电流
I_{p}	放电波形的峰值电流
j_0	无孔金属化条的电流密度
$J_{\text{a,met}}$	金属化层的原子流密度
J_{cc}	金属化层中裂缝附近的电流密度
J_{ctip}	裂缝顶端的电流密度
J_{inj}	注入电流密度
J_{met}	金属化层的电流密度
J_{p}	有孔金属化条的电流密度
$J_{\text{v,co}}$	体内空穴的原子流密度
$J_{\text{v,met}}$	金属化层的空穴流密度
K_1	理化特性
K_2	覆盖层完整性因子
K_3	任务剖面腐蚀因子
K_4	环境应力修正因子
$K_{1,2,3,4,\text{wb}}$	Wunsch - Bell 比例常数
K_{B}	玻耳兹曼常数
$K_{\text{f,v-die}}$	垂直芯片裂缝的应力密度因子
$K_{\text{f,h-die}}$	水平芯片裂缝的应力密度因子
K_{met}	金属化层的热导率
l_{crkt}	金属化层中的裂缝长度
$l_{\text{d,c}}$	电极材料间距
$L_{\text{f,s}}$	半导体材料的熔化潜热
M_{at}	原子质量
m_i	每种失效机理对应的激活能的权重因子
M_{met}	金属导体的原子质量

M_{mf}	熔断丝状体的质量	q_c	电子电荷的绝对值
m_{ok}	金属化层宽度的 Okabayashi 指数	$Q_{cr,ox}$	氧化层的临界电荷密度
MTF	平均失效时间	Q_d	器件的耗散功率
N_a	导体金属化层的原子密度	$Q_{m,ox}$	氧化层单位面积的移动电荷量
n_{cc}	导带的态密度	Q_{ot}	对氧化层厚度内的质量、温度和电压积分后的俘获电荷密度
n_{chem}	金属化层的化合价	$R_{av,t}$	总平均电阻
n_{corr}	腐蚀指数	R_{by}	体电阻
N_d	施主浓度	R_{cr}	固定电阻
N_{da}	施主/受主原子密度	r_{dndt}	枝晶的曲率半径
$N_{dp,ox}$	感应偶极子的数量	R_{dv}	器件电阻
$n_{c,Black}$	Black 指数	RH	相对湿度
N_f	失效周期数	R_i	初始温度下多层金属化层的电阻
$n_{gb,met}$	金属化层中的晶界结点密度	R_{im}	多层金属化中的耐熔电阻
$N_{i,met}$	金属化层中的离子密度	r_{met}	金属化层的纵横比
$N_{inj,c}$	注入电子密度	$r_{r,refct}$	耐熔电阻的温度系数
n_{ok}	Okabayashi 指数	r_r	反应速率
$N_{OL,efl}$	氧化层中有效陷阱的密度	r_{st}	表面张力
n_{paris}	Paris 指数	R_T	温度为 T 时多层金属化层的电阻
n_{sddv}	应力驱动扩散空洞指数	$R_{t,h}$	温度函数的电阻
N_{st}	单位体积的态密度	S_{ox}	电绝缘体系的熵
N_{trp}	界面陷阱的空间密度	S_r	器件可靠性应力阈值矩阵
$N_{v0,met}$	金属化层中空穴的密度	T	稳态温度
$P_{av,rpn}$	偏置结的平均功率	t_{ann}	退火时间
P_{da}	剥落应力	t_B	偏置时间
P_{df}	丝状体的耗散电功率	t_{bd}	氧化层的击穿时间
P_{gt}	栅区的功率	TF	失效时间
P_{ok}	金属化层厚度的 Okabayashi 指数	TF _{sddv}	应力驱动扩散空洞的失效时间
P_{ox}	电绝缘层的极化强度	t_{inj}	注入时间长度
p_p	金属化层的含孔率	$T_{m,chn}$	芯片的熔化温度
$P_{pr,occ}$	占据概率	T_m	熔化温度
P_{sat}	弯月面上或平面上的饱和气压	$T_{psv,dp}$	钝化沉积温度
$P_{sb,2}$	电阻变化引起的耗散功率	T_{ref}	参考温度
$P_{sb,1}$	硅电阻率变化引起的耗散功率	t_{rlx}	释放时间
Q	质量迁移率		

V_{app}	供给电压
$V_{bd,ox}$	氧化电绝缘层的击穿电压
V_{by}	人体的放电电压
V_{CE}	集电极—发射极电压
v_{dft}	漂移速度
V_{dv}	器件电压
V_{fb}	平带电压
V_{met}	工作电压
V_{mol}	摩尔体积

$V_{ov,pt}$	过电位
v_{th}	热速度
$V_{vd,vl}$	空隙体积
$V'_{ox,vl}$	电绝缘层的体积
w_{cond}	导体宽度
x	沿金属化层的距离
Z^*	离子电荷
Z_{elec}	电解质的离子电压
Z_{met}	金属离子的化合价

目 录

第1章 温度——可靠性的影响因素	1
1.1 背景	1
1.2 基于激活能的模型	2
1.3 可靠性预计方法	6
1.4 从事设计、热控制以及可靠性的工程师们应如何合作	9
1.5 小结	9
第2章 微电子器件失效机理与温度的关系	10
2.1 芯片金属化层失效机理与温度的关系	11
2.1.1 金属化层和键合点的腐蚀	11
2.1.2 电迁移	17
2.1.3 小丘的形成	29
2.1.4 金属化迁移	30
2.1.5 引线孔穿刺	31
2.1.6 导线金属化层的约束空洞现象	32
2.2 氢、氦气氛环境对金属化层与温度关系的影响	43
2.3 器件氧化层失效机理与温度的关系	45
2.3.1 慢俘获(氧化层中的电荷俘获和释放)	46
2.3.2 栅氧化层击穿	48
2.3.3 电过应力	58
2.4 器件失效机理与温度的关系	61
2.4.1 离子玷污	61
2.4.2 二次击穿	65
2.4.3 表面电荷扩展	68
2.5 器件氧化层界面失效机理与温度的关系	68
2.5.1 热电子	68
2.5.2 幸运电子模型	70
第3章 微电子封装失效机理与温度的关系	72
3.1 芯片和芯片—基板粘接失效机理与温度的关系	72
3.1.1 芯片破裂	72
3.1.2 芯片热击穿	78
3.1.3 芯片和基板的粘接疲劳	79
3.2 一级互连失效机理与温度的关系	81

3.2.1	引线键合互连	81
3.2.2	载带自动焊	91
3.2.3	倒装焊芯片焊点	93
3.3	封装外壳失效机理与温度的关系	94
3.3.1	塑料封装的裂缝	94
3.3.2	聚合物的返原或解聚	98
3.3.3	晶须和枝状晶体生长	99
3.3.4	标准尺寸外壳疲劳失效	99
3.4	气密封装失效机理与温度的关系	100
3.5	封装体引线和引脚密封失效机理与温度的关系	103
3.5.1	误操作和缺陷引起的引脚密封失效	103
3.5.2	再成型缺陷导致的引脚局部腐蚀	104
3.5.3	引脚密封界面处引脚的应力腐蚀	105
3.5.4	引脚焊点疲劳	105
第4章	双极型器件电参数与温度的关系	111
4.1	双极型晶体管参数与温度的关系	111
4.1.1	本征载流子浓度	111
4.1.2	热电压和迁移率	113
4.2	电流增益	115
4.3	双极型晶体管反相器的电压转换特性	117
4.4	集电极—发射极饱和压降	118
第5章	MOS 场效应晶体管电参数与温度的关系	120
5.1	MOS 场效应晶体管电参数与温度的关系	120
5.1.1	阈值电压	120
5.1.2	迁移率	121
5.1.3	漏极电流	123
5.1.4	延迟时间	123
5.1.5	泄漏电流	125
5.1.6	芯片的可用性	126
5.1.7	直流转换特性	127
第6章	集成电路老化失效物理方法	129
6.1	老化的基本原理	129
6.2	现有老化方法存在的问题	129
6.3	老化的失效物理方法	133
6.3.1	对稳态温度影响的认识	133
6.3.2	建立老化剖面	133
第7章	微电子器件温度冗余设计和应用准则	135
7.1	现有器件降额方法存在的问题	135
7.1.1	其它热参数的影响	136

7.1.2	热应力和非热应力的相互作用	137
7.1.3	低温器件降额	137
7.1.4	器件类型的变化	137
7.2	抗热/耐热设计的另一种方法	137
7.3	芯片金属化失效机理的应力限制	141
7.3.1	芯片金属化腐蚀	141
7.3.2	电迁移	142
7.3.3	小丘的形成	147
7.3.4	金属化迁移	147
7.3.5	金属化层的约束气蚀	148
7.4	器件氧化层失效机理的应力极限	151
7.4.1	慢俘获	151
7.4.2	栅氧化层的击穿	152
7.5	芯片金属化失效机理的应力极限	156
7.5.1	离子玷污	156
7.5.2	表面电荷扩展	157
7.6	器件氧化层界面失效机理的应力极限	157
第8章	电子器件封装的温度冗余设计和使用指南	158
8.1	芯片和芯片/衬底粘接失效机理的应力极限	158
8.1.1	芯片破裂	158
8.1.2	芯片热击穿	160
8.1.3	芯片与衬底的粘接疲劳	160
8.2	一级互连层失效机理的应力极限	161
8.2.1	引线键合互连层	161
8.2.2	载带自动焊	166
8.2.3	芯片倒装焊	167
8.3	封装外壳失效机理的应力极限	168
8.3.1	塑料封装外壳破裂	168
8.3.2	聚合物焊料的逆变化或解聚	168
8.3.3	晶须和枝晶的生长	168
8.3.4	模压外壳的疲劳失效	168
8.4	盖式密封失效机理的应力极限	169
第9章	结论	171
9.1	稳态温度的影响	171
9.2	温度循环次数的影响	171
9.3	温度梯度的影响	171
9.4	时间相关的温度变化的影响	172
附录		174
参考文献		180

第1章 温度——可靠性的影响因素

“We have a headache with Arrhenius”^①

许多可靠性工程师和系统设计师认为温度是影响电子设备可靠性的一个主要因素，因此经常采用降低温度的方法来提高可靠性，而对于采用降低温度给制冷系统的可靠性、费用、质量和体积所带来的影响，以及降温对电子设备可靠性实际增长的作用程度，缺少综合权衡。

本章讨论温度加速微电子器件失效的几种模型，在此基础上，指出现有的温度与可靠性关系的研究结论存在的一些问题。目的是进一步提升关于温度对可靠性影响的认识，阐释一种新的温度模型和设计方法所要达到的目标。

1.1 背景

器件的可靠性是指在规定条件下，器件完成规定功能的能力，通常用使用寿命表示。与可靠性相关的失效会导致器件失去其工作能力，器件失效决定于一定的失效机理，一种失效机理通常是外部和内部应力作用的结果。失效机理决定器件的可靠性，大多数情况下，导致器件失效主要取决于某几种失效机理。

当超出器件的额定工作条件和环境条件时，器件也可能丧失其规定的功能。当工作条件和环境条件回到规定的范围时，即使器件通常会恢复正常工作，但是，由于阈值电压漂移、漏电流增大、传输延迟时间超长，或者噪声容限变差，器件经常会出现性能失常。性能问题通常表明需要改进系统设计，或反映出器件工艺对超出额定高温应用的不适应性。例如，图 1.1 反映了最小输出高电平电压随温度变化的关系。显然，不同的器件有不同的

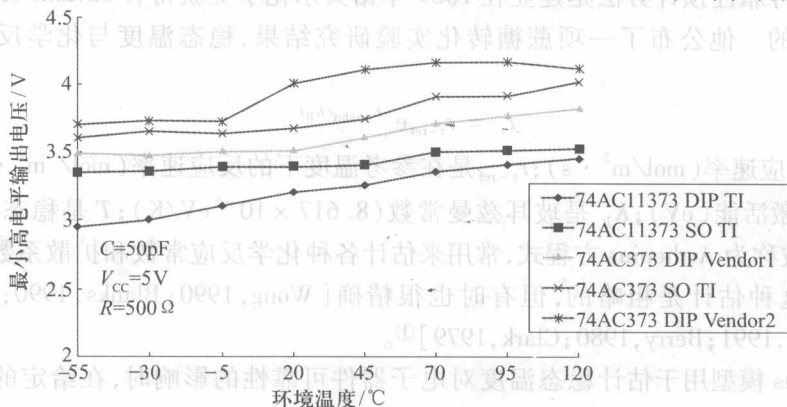


图 1.1 高电平输出最小电压与环境温度的关系 [Texas Instruments Databook]

① Takehisa Okada, 索尼公司高级总经理, 在美日技术评价中心访问期间, 答索尼对可靠性预计方法的观点 [Kelly et al. 1993]。