

IEEE可靠性物理年会 论文集选编

(II)

可靠性与环境试验编辑部

目 录

加速试验技术

一种预测电迁移失效敏感性的可靠性工具——欧姆非线性脉冲技术的评价·····	(1)
步进应力在评价与时间有关的击穿问题上的应用·····	(7)
高加速温、湿度应力试验技术 (HAST)·····	(13)

失效机理及封装可靠性

陶瓷电容器在低压直流应力下的漏电失效机理·····	(17)
氮化硅密封对MOS器件稳定性的影响·····	(25)

可靠性检测技术

一种利用集成电路芯片来测量电路封装体内相对湿度的简单方法·····	(33)
定量测量塑料封装引起的集成电路内应力的新方法·····	(43)
一种利用液晶检测半导体器件热点的方法·····	(51)
用容限电压测量来检测和判定数字微电路的缺陷·····	(54)
MOS器件静电放电灵敏度的检测方法·····	(65)

其 他

芯片粘接界面的物理性质·····	(69)
------------------	------

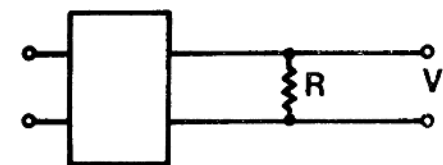
一种预测电迁移失效敏感性的可靠性工具 —— 欧姆非线性脉冲技术的评价

J. R. Lloyd, G. S. Prokop 和 M. E. Molchen

已经发现, 电迁移失效的时间与欧姆非线性脉冲之间的相关程度是明显地取决于应力条件的。只有在应力最大、焦耳热最高的情况下才会有良好的相关关系。同时还发现, 只测量电阻, 这也和非线性脉冲一样与失效时间有关。可以断定, 除了那些有严重焦耳热的场合之外, 非线性脉冲技术作为一种可靠性工具, 其应用是受到限制的。

引言

最近, 一种新的预测薄膜导体可靠性的方法已由贝尔实验室研究出来。有关这种技术的细节在其它文献中已有过论述。这一方法实际上是在样品的两端施加非对称的交流脉冲电压来测量其直流电压(见图1)。在样品两端测量到的电压是由于样品对于焦耳热的非对称响应所造成的。假如没有焦耳热,



AC 电路

R为样品电阻

图1 测试电路简图

样品两端的平均电压降将为零, 因而就测量不到电压。然而, 一旦焦耳热形成, 在脉冲电流较高期间, 将会出现更为严重的热效应(如图2中所示的正脉冲)。这样, 较大的焦耳热将导致出现更高的电阻, 因此, 样品会经受到较大的电压降, 反之亦然。虽然

贝尔实验室的研究人员能够导致电压降(V_m)的非线性脉冲的效果与高脉冲电流密度期间的早期失效联系起来。但这一技术在分辨机械缺陷方面的能力尚未进行论证。

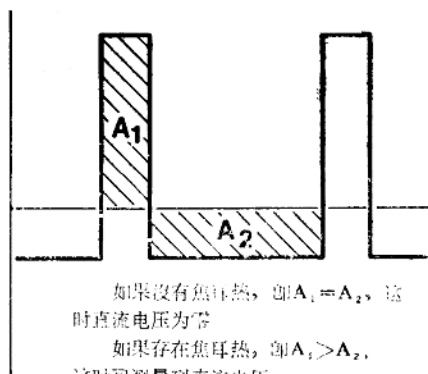


图2 施加到测试样品中的脉冲示意图

本文的目的, 是评价能否用这一技术来预测各种导体的电迁移失效。这些导体所承受的直流电流是连续的而不是脉冲的。其电流密度比贝尔实验室的要低一些。

实验说明与结果

实验分为四种类型。对每项实验的设计, 部分参考了过去的实验结果, 所以, 分类是按先后次序进行的。但是, 上述四项实验所用样品的制备方法是相同的。

所有样品都是在已氧化的硅片上用铝或铝/铜合金蒸发制备出来的。有些样品, 则在蒸铝/铜之前按常规的工艺规程, 先淀积一层1200 Å厚的铬层。图3示出了一个采用

徐婉芳译 杨伟光校

标准光刻技术制出的四端电阻率探测图形。薄膜导体的厚度均为8500 Å。为了使晶粒结构更为稳定,所有样品应进行400℃、2小时的退火处理。然后,将芯片切割、固定并用超声键合铝引线。以下讨论各项试验的情况。

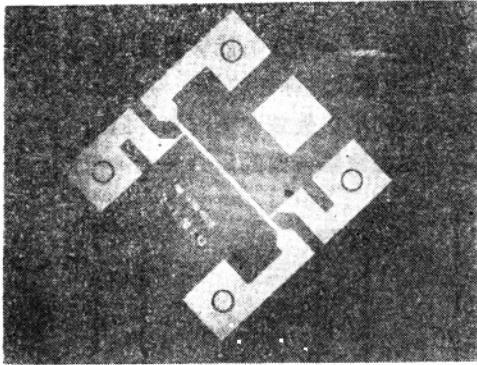


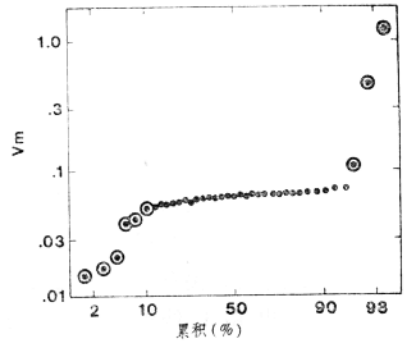
图3 引线键合前的典型四端电阻率探测样品

实验 I

在本项实验中,我们要了解的是,非线性脉冲技术是否可以应用于已施加电应力的薄膜导体上,所施加的电流密度比参考文献〔1〕中所使用的要低一些。样品的条宽为12.5μm,其结构是铝/铜合金/铬。试验是在0.5、1、 2×10^6 A/cm²的应力条件下,温度为275℃的烘箱中进行的。在进行应力试验之前,先记录在室温下的导体电阻(R_0),然后,再记录在应力条件下的导体电阻(R_i),以及非线性脉冲电压(V_m)。

图4所示是 V_m 值的对数正态图。由图可以看到,其数值近似于对数正态(或正态)分布,但很明显,其均值周围存在着非正态分布的偏离点。图4所示的圆环点可能是在尚未达到应力水平时就已经失效的点。其失效原因或是由于键合不良或是因为过早烧穿所造成的。值得注意的是,这些过早失效的点明显地超出了正态分布范围。关于 V_m 值过高的问题,英格利斯等人已作了类似的观

测。还请注意, V_m 值过低同样也会引起过早的失效。这一问题在下面章节中加以讨论。



圆环点表示由于键合不良或明显的缺陷所造成的非电迁移早期失效

图4 实验 I 的 V_m 对数正态图

根据失效情况,采用了非参量等级相关测试的方法,对 V_m 、 R_0 和 R_i 与失效顺序的相关性进行了测试。其结果列于表1。

表1 应力条件和等级相关系数

样品组	J ($\times 10^6$ A/cm ²)	r_{V_m}	r_{R_0}	r_{R_i}	r_{95}
I-0.5	0.5	0.29	0.14	0.13	0.75
I-1	1.0	0.75	0.88	0.69	0.60
I-2	2.0	0.31	0.45	0.63	0.46

表1中最后一栏,列出了相应样品量所要求的置信极限(r_{95})为95%的相关系数。分析表1可发现,只有经受 1×10^6 A/cm²的那组样品, V_m 才有明显的相关关系,而其余两组则毫无关系。同时还可以看到, R_0 和 R_i 与失效也有关系,其相关性比 V_m 的要好一些。

实验 II

在本项实验中,为了找出批与批之间是否存在差异,我们对两批单独进行蒸发的

样品同时进行了应力试验。测定每一导电带的电阻温度系数 (TCR)，并以此估计出导电带的实际温度。所用样品是标准的铬/铝-铜，条宽为 $5\mu\text{m}$ 。表 2 归纳了其测量结果。键合不良的样品（例如实验 I 中所出现

的过早失效的样品）要从样品批中剔除出去。

象实验 I 那样，采用等级相关测试来确定 V_m 、 R_0 、 R_i 与失效顺序之间的相关关系。其结果列于表 3。

表 2 实验 II 的应力条件和样品参数

样品组	$J(\times 10^6 \text{ A/cm}^2)$	V_m (mV)	R_0 (Ω)	R_i (Ω)
II-3a	3.0	.465 $\pm$.017	1.32 $\pm$.02	2.80 $\pm$.04
II-3b	3.0	.494 $\pm$.010	1.33 $\pm$.02	2.92 $\pm$.04
II-4a	4.0	.472 $\pm$.012	1.28 $\pm$.02	3.00 $\pm$.07
II-4b	4.0	.494 $\pm$.012	1.36 $\pm$.02	3.14 $\pm$.05
II-5a	5.0	.457 $\pm$.007	...	2.92 $\pm$.07
II-5b	5.0	.482 $\pm$.010	...	3.19 $\pm$.26
II-6a	6.0	.741 $\pm$.019	1.24 $\pm$.02	2.71 $\pm$.15
II-6b	6.0	.792 $\pm$.022	1.28 $\pm$.01	2.88 $\pm$.18

表 3 实验 II 的等级相关系数

样品组	烘箱温度($^{\circ}\text{C}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	V_m (mV)	r_{R_0}	r_{R_i}	r_T	r_{g_5}
II-3a	266	81	.03	.07	.11	.20	.60
II-3b	266	87	.44	.43	.42	.22	.58
II-4a	236	127	.20	.13	.29	.50	.58
II-4b	230	147	.29	.21	.76	.32	.65
II-5a	143	(231)	.36	0	.61	...	.58
II-5b	143	(226)	.18	.34	.59	...	.58
II-6a	55	263	.39	.39	.34	.36	.58
II-6b	55	268	.07	.08	.33	.41	.58

当 II-5 组在 $5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 条件下试验期间，由于设备发生故障，因而得不到电阻温度系数 (TCR) 和这些样品的 ΔT 值。如果利用 R_0 和其他样品的电阻温度系数 (TCR) 以及测得的 R_i 平均值，则有可能获得这一样品组在 $\sim 231^{\circ}\text{C}$ (II_a) 和 $\sim 226^{\circ}\text{C}$ (II_b) 各自的 ΔT 的近似估计值。当然，这些数值多少会有值得推敲的地方，必须加以

审查。因而在表 3 中用括号括住。

此外，如在实验 I 中那样，我们可以看到，任何一个所测量到的参数与失效之间的相关性是微乎其微的，而 R_i 与失效倒是有点关系。

比较表 2 中的数据可发现，取自硅片 (a 和 b) 的芯片其有关特性是很有趣的。在两种电流密度较低的情况下，样品组 a 和 b 之间

的寿命时间是没有明显差别的。然而，对于在 $5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 和 $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 条件下试验，取自硅片 b 的样品，其 V_m 、 R_0 、 R_i 值较高。故发生的失效一般较之取自硅片 a 的样品要明显一些，早一些。

实验Ⅲ

本项实验的目的，是探索在电流密度比实验 I 和实验Ⅱ还要高的条件下的相关关系。本项实验所用的样品是在已氧化的硅片上蒸发纯铝制备而成的，其条宽为 $5 \mu\text{m}$ ，且没有铬衬底。

图 5 正态概率纸示出了所获得的 V_m 数值。

值得注意的是，本项实验没有出现过早的失效，因而不存在象图 4 所示的、与早期失效有关的偏离点。

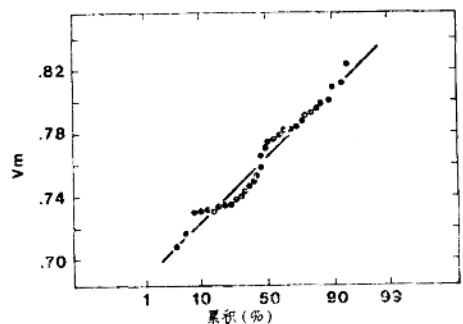


图 5 实验Ⅲ的 V_m 的正态图，很明显是正态分布

表 4 列出了计算的等级相关系数。由表 4 我们还可以看到，与失效时间有关的任何参数，甚至在应力达到 $11 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ，温度为 232°C 时也看不到有明显的相关关系。尽管置信度水平尚未达到 95%，但其最佳的相关关系似乎与 R_i 有关。

表 4 实验Ⅲ的相关系数（纯铝）

样品组	$J (\times 10^6 \text{ A/cm}^2)$	$T (^\circ\text{C})$	$T (^\circ\text{C})$	r_{V_m}	r_{R_0}	r_{R_i}	r_{g_5}
Ⅲ-5	5	200	57	.36	.33	.50	.58
Ⅲ-7	7	150	104	.36	.53	.53	.60
Ⅲ-9	9	70	107	.38	.25	.23	.60
Ⅲ-11	11	70	232	.22	.20	.51	.65

实验Ⅳ

为了分析衬底对 V_m 的影响，以及 V_m 与失效的相关关系，先在硅片上涂覆一层 $2 \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺，并在蒸发金属前进行固化处理。在该硅片上和在没有涂覆聚酰亚胺的监控用的硅片上制备出宽度为 $5 \mu\text{m}$ 的铬/铝-铜

带，其中每种金属的淀积都是单独进行的。

表 5 列出了 V_m 、 R_0 、 R_i 值和两组样品的电阻温度系数（TCR）。表 5 记录的 V_m 和 R_i 值之间的差别表明：淀积在聚酰亚胺上的样品，其焦耳热明显地比直接淀积到硅片上的样品的焦耳热要高。虽然已经允许涂有热电性能较差的聚酰亚胺涂层的样品可以

表 5 实验Ⅳ的样品参数

	V_m	R_0	R_i	TCR
Ⅳ-2	$1.56 \pm .04$	$1.46 \pm .02$	$2.25 \pm .03$	$3.23 \pm .01$
Ⅳ-2P	$2.21 \pm .16$	$1.50 \pm .03$	$2.51 \pm .13$	$3.21 \pm .02$

耐受较高的焦耳热 ($\Delta T = 40^\circ\text{C}$)，但为了把监控样品 ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$) 的焦耳热降至最低，应力试验是在 150°C 、 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 的条件下进行的。在取自相同硅片的样品中，很少或不存在 V_m 与失效的相关关系。这一点与上述三项实验的结果是一致的。然而，在失效时间方面，两组样品之间则存在着明显的差别。直接淀积在氧化硅片上的监控样品，其失效明显地快于淀积在聚酰亚胺上的样品。这一结果是取决于 V_m 、 R_i 的值和测量到的温升差别的，它与我们所期望的相反。对于监控样品所出现的过早失效的原因，目前尚未清楚。但是，我们已经了解到其中重要的一点：尽管 V_m 值的读数较高，但淀积于聚酰亚胺上的样品的失效还是迟一些的。

附加观测

在整个实验过程中，对其他各种测试参数之间的相关关系也进行了研究。特别有意义的是 R_0 、 R_i 与 V_m 的相关关系。表 6 示出

表 6 V_m 测量参数的等级相关系数

样品组	r_{R_0}	r_{R_i}	$r_{\theta_{95}}$	$r_{\theta_{99}}$
I-0.5	.59	.53	.47	.59
I-1	.88	.79	.47	.59
I-2	.88	.62	.46	.57
II-3a	.74	.71	.60	.74
II-3b	.84	.83	.58	.71
II-4a	.84	.43	.68	.83
II-4b	.87	.76	.60	.74
II-6a	.34	.37	.60	.74
II-6b	1.00	.18	.75	.89
III-5	.88	.85	.58	.81
III-7	.91	.94	.58	.81
III-9	.67	.88	.58	.81
III-11	.98	.34	.68	.83

了 R_0 和 R_i 与 V_m 的等级相关系数。表中表明，除了两种情况之外， V_m 与 R_0 的相关关系是明显的。一般来说，虽然 V_m 与 R_i 的相关关系通常是明显的，但往往没有与 R_0 的相关关系那样好。除了两种情况外， R_0 与 V_m 的相关关系要比 R_i 与 V_m 的相关关系好一些。最后一栏的 $r_{\theta_{95}}$ * 项数值是置信度水平达到 99% 时所必需的等级相关系数。应注意，除了两种情况外， R_0 与 V_m 的相关关系是显著的，且大于 99%。

讨 论

英格利斯等人认为， V_m 可表示为：

$$V_m = I^3 f(F) \frac{R_0}{LW} \frac{\text{tox}}{K_0} \frac{dR}{dT} \quad (1)$$

式中， I 是测量期间的测试电流； L 和 W 分别为导体的长度和宽度； $f(F)$ 是负载循环、所施加的脉冲 F (最大为 $F = 0.21$) 的函数； tox 是氧化层的厚度； K_0 为热电导率。

本研究的结果进一步证实了英格利斯提出的模型。由公式 (1) 我们将可预计到： V_m 可能与 R_0 有关。而实际上它们确实是观察到的最佳相关关系。

此外，在实验 II 中我们观察到，硅片 b 的样品，所呈现的 V_m 和 R_0 值比硅片 a 的样品的 V_m 和 R_0 值都大一些。如果将 V_m 除以 R_0 ，我们就可以发现，硅片 a 的这一比值为 0.361 ± 0.012 ；硅片 b 的比值为 0.367 ± 0.006 。这表明了两种硅片的导电带之间的 V_m 值变化完全有可能是由于 R_0 的变化所造成的。

在实验 IV 的数据中，可以找到上述模型的第三证据。从实验 IV 中还可发现，淀积在涂覆了聚酰亚胺薄膜的硅片上的导电带，其 V_m 值明显地高于直接淀积在氧化硅片上的导电带的 V_m 值。尽管玻璃的导热率 ($K_0 = 24$

* 原文为 $r_{\theta_{95}}$ ，疑为 $r_{\theta_{99}}$ 之误——校者

$\times 10^{-4}$ 卡-cm/cm²-秒-°C)比聚酰亚胺所具有的导热率($K_0 = 2.5 \times 10^{-4}$ 卡-cm/cm²-秒-°C)要高得多,但我们所希望的是,能在淀积到聚酰亚胺上的样品中观测到较高的 V_m 值。

在每一组样品中,失效时间与 V_m 值之间的相关程度都很差,其结果也是矛盾的。原先料想,由于 V_m 值的提高主要取决于焦耳热效应,低电流密度时其相关关系会很差,而在高电流密度(此时焦耳热更为明显)条件下其相关关系就变得很明显了。正如所出现的结果一样,在样品组里只有(1-1)一组有明显的相关关系。虽然同一种硅片的单组样品没有相关关系。但已经观察到,每种硅片之间的 V_m 平均值却存在着明显的差别。这种差别同样也表明了与平均失效时间的相关关系(实验Ⅱ)。然而,这种相关关系只有在焦耳热($\Delta T > 200^\circ\text{C}$)的极端条件下才会变得明显。因此,本文所评价的这种技术的实用性受到了限制,似乎只能在那些可能出现极度焦耳热的场合下应用。英格利斯等人过去也曾获得过类似的结论。然而,必须慎重考虑的是,只有在类型相同的样品中进行比较时,这种技术才适用。实验Ⅳ的结果表明:这种技术对于不同衬底材料的选择未必有效。

记住这一点是很重要的,无论什么时候,失效时间与 V_m 值都存在着一种明显的相关关系;失效时间与 R_0 也存在着一种明显的相关关系。因此,对于大多数与电迁移有关的应用来说,仅测量样品的电阻或适当的导电带的电阻似乎与用非线性脉冲技术来预测早期电迁移失效一样有效。但是,这两种技术的使用价值似乎都受到了限制。

另一方面,非线性脉冲技术对剔除因非电迁移引起的早期突然失效是非常成功的。事实上,在许多情况下, V_m 是唯一被测量的和能够剔除出这些失效的参数。这一点可

以从图4中看出。每一个偏离正态分布的点都与过早的失效有关。而正态分布的60个点没有一个是与早期突然失效有关的。在英格利斯获得的结果中也可以发现,甚高的 V_m 值与早期失效之间的关系与本文所介绍的类同。

关于 V_m 值非常低时(示于图4)与早期失效的相关关系,英格利斯尚未观察到。然而,这些低的 V_m 值很可能是由于样品的几何形状所造成的(见图3)。

为了弄清楚为什么这样低的 V_m 值会与早期失效有关,我们必需考虑位于四端测试样品(其几何形状可能提高阻值)中为测试线和电源焊接区所共有的键合不良或者严重缺陷等。需要记住的是,由于试验过程中给样品施加以脉冲电压,因此缺陷两端的电压降可能增大,从而降低了流经导电带的有效电流。此时,有缺陷的样品呈现的焦耳热比没有缺陷的样品所出现的焦耳热要少的多。因而其 V_m 值也较低。如果这些样品有两点连通,则所观测到的 V_m 值是高的,这与英格利斯所观测到的结果是一致的。

结 论

欧姆非线性脉冲技术,只有在焦耳热极高的条件下,对预测早期电迁移失效才是有效的。同时,它只能作为一种工具,用来测量同类型样品组之间的相关特性。然而,据发现,采用只测量样品电阻的技术,会如同采用非线性脉冲技术一样有效。同时也发现,非线性脉冲技术用于预测具有正态分布特征的样品中的失效等级是无效的。但对于由键合不良引起的、与早期非电迁移有关的失效却能检测出来。因而,英格利斯等人所提出的数学模型看来是正确的。

参考文献(略)

步进应力在评价与时间有关的击穿问题上的应用

Eugene S. Anolick Li-Yu Chen

摘要 本文讨论一种步进应力加速试验方法, 给出所采用的数学模型, 理论和实验的结果, 及在失效率评价上的应用。

前言

在参考文献 1~2 中, 已经论述了与时间有关的介质失效的工作模式的研究情况, 最近, 由于对数学模型及其指数前常数项以及可能的参数特性的进一步了解, 扩大了快速试验技术的应用范围。本文涉及的是, 用步进应力作为评价静态和动态器件介质完整性的一种手段。

步进应力试验已是一种快速评价可靠性的技术手段^[5], 为了采用这一技术, 必须对介质击穿导致的破坏性失效作出某些基本的假设:

1. 原先的应力作用是累积的和叠加的, 不管器件是怎样引起损坏的, 每一种缺陷都有自己固有的寿命时间, 这一时间取决于应力和时间的综合作用, 而且, 在采用恰当的模型后, 可以推测原先所有的应力条件。

2. 失效的进程与导致破坏的手段无关, 从所用的模型来看, 单一缺陷的各种参数与破坏手段无关, 原先所进行的老炼、筛选和应力试验都会影响某一给定缺陷的寿命, 由于介质试验都是破坏性试验, 因此, 试验样品的记录须小心地加以控制, 但这并不是简单的事, 当涉及厂商的样品时尤其如此。试验的程序也许和产品上发现的应力途径不一致, 为此必须作出这样的假设: 试验程序(例如试验部位)确实能够反映产品最终的情况。试验后, 受试验部位往往被破坏了。因此要求大多数的试验结果具有统计性, 而

试验结果的比较则往往是在同一母体的不同抽样检验之间进行的。

此外还应假设, 失效分布是对数正态分布, 所有涉及到的缺陷其参数都是不变量。当然, 下列两种可能性是存在的: (1) 参数是温度和缺陷的变量^[3-4]; (2) 对数正态分布仅仅适用于单批产品、硅片或者是分布曲线的某一段, 但这些情况必将影响到评价结果的准确性。

模 型

用来评价步进应力的时间-失效模型的基本公式:

$$t_f(F) = A \exp \left[\beta (V_{Bo}(F) - V_A) + \frac{\Delta H}{KT} \right] \quad (1)$$

式中, β 是电压参数;

$V_{Bo}(F)$ 是与母体百分数 F 有关的极限击穿电压;

A 是指数前常数项, 具有时间的单位;

ΔH 是激活能, 表示失效的扩散或反应机理。

一般认为, β 可因温度不同而异^[3]。因此, 参考文献 1~2 中所报导的电压(或电场)参数的差别, 完全是由于温度差别所造成的。

恒定温度电压步进应力最容易控制, 本文所报导的试验均采用这一方式。比较电压级 (i) 和 (j) 时所用的加速模型是:

$$A F_{ij} = \exp[\beta(V_j - V_i)] \quad (2)$$

杨伟光译 韩常英校

也可以采用从一种步进应力级到另一种步进应力等级的时间变换式:

$$t_{fi}(F) = AF_{ij}t_{fi}(F) \quad (3)$$

图1是完整的步进级数示意图。

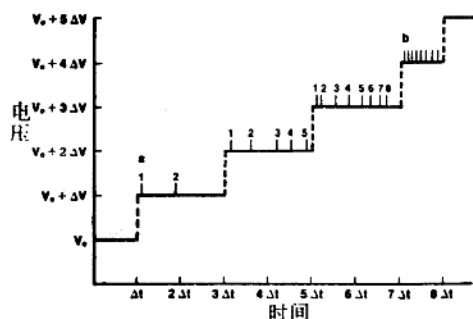


图1 用计算机控制的步进应力示意图

图中 ΔV 固定, 时间是可变的

从图中可见, 各应力级的 ΔV 是恒定的, 时间或各应力级的 Δt 是可以变化的, ΔV 和 Δt 可以任意组合, 在第 N 级某一时刻 t_N 时, 失效可能发生在 a 点或 b 点上。可以利用公式(3)和(4)来修改原先的计算。 N 级、电压 V_N 时总的有效时间由下式给出:

$$t_f(F) = t_N(F) + \sum_{n=1}^{N-1} \Delta t_n \exp[-\beta(V_N - V_n)] \quad (4)$$

式中, Δt_n 是与第 n 级有关的时间间隔;

V_n 是该级的电压;

V_N 是发生失效的那一级的电压;

F 乃是母体的百分数。

当每一应力级的 Δt 和 ΔV 取恒定值时, 则公式(4)可简化为:

$$t_f(F) = t_N(F) + \Delta t \sum_{n=1}^{N-1} \exp[-\beta n \Delta V] \quad (5)$$

程 序

1. 试验从零电压开始, 程序的第一部份是在室温条件下, 在试验位置上对产品施

加额定工作电压, 时间小于1秒, 这一步骤结束后, 剔除有缺陷的样品。

2. 除去所施加的电压, 并把样品温度提高到试验温度, 然后, 把时间间隔拨到1, 立即施加第一级电压(见图1), 该级电压仍然是产品的额定工作电压。

3. 在规定的试验时间 t_1 内, 施加的电压维持不变, 并把失效记录下来。

4. 然后, 阶跃升高到下一级电压(图1中 V_2), 重新计时, 根据显示的尖峰脉冲信号, 记录失效和时间。

5. 如此重复试验, 一直做到母体中所需的试验样品失效数时为止或母体全部失效为止。

试验间隔可以是不等的(如图1所示)。也可以是固定不变(如公式5)的。但最好还是采用固定时间和固定电压间隔的方式。

一般来说, 百分比与初始的试验母体有关, 因此, 每一级电压是一个电压筛选级, 使在较早的时间周期内, 能够有效地淘汰母体中的部份样品, 这样每一应力级便可以从较高百分比的母体开始试验。图2给出对数正态分布假设时的预期结果。由图可见, 电压 V_n 时的结果是电压 V_{n-1} 时所得结果的延续。

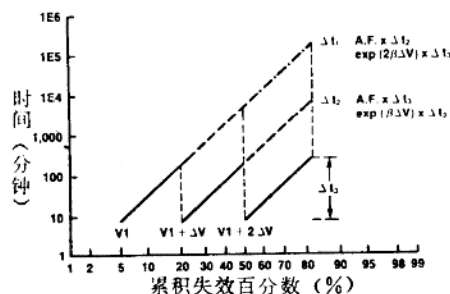


图2 电压步进应力及有效估计的预期分布图

一开始, β 值是未知数。由参考文献1-2的估计可知, 150°C 时的 β 值等于61.0除以介质厚度(以毫微米计); 而 20°C 时 β 估计值

是161除以介质厚度（以毫微米计）。因此，当介质厚度为65毫微米时，20℃和150℃的 β 估计值分别是2.48和0.94。

电压级是可以选择的，因此，在任何电压条件下对原先应力时间的修正，仅仅为总试验时间的1%。例如在150℃时，若试验时间间隔为240分钟、 β 值为0.94，则每一电压级为6V时所得到的修正值是1.1分钟。在低于150℃时，预料其修正值是很小的。如果试验结果和初始的推测相差太大，为了得到最好的参数估计量，则需对数据作某些迭演。

实验结果

本文报导的是代号为A、B、C三家厂商的产品的试验情况。首先，在每一温度条件下，对厂商A的产品用25个试验样品进行试验。试验的电压级为5V，试验时间间隔不等。将5种结构（P1/sub, P2/sub, P2/P1, P1/Dif, P2/Dif）的每个样品用线连起来形成一组平行线。记录最初的失效，而这一失效可能现于五种试验结构中的任一种。试验温度设5组，范围为30到150℃，图3所示是30℃时的失效分布。在各级电压上所出现的单一失效要比图示的和电压应力步进期间出现的少，在做时间分析时，未包括与单一失效和步进失效有关的时间，但在计算百分比时则包含了这些失效，值得注意的是，所有的失效均可用一系列相类似的对称正态分布曲线来表征，从这些类同曲线的序列可以估算不同电压时的 t_{50} ，然后绘制 t_{50} 和电压的函数曲线以供估计 β 值之用，图4所示就是 t_{50} 值的曲线图，用公式（1）和曲线的斜率即可计算出 β 值来。

使用所有的结构，同时产生一个问题， β 值随温度的变化被掩盖了，而且， ΔH 在部分范围内似乎出现负值，其原因是在相同电压但不同电场条件下试验的五种不同结构引

起的。结果是改变了在不同温度下不同结构的优劣，导致分布曲线的真实形状发生畸变。

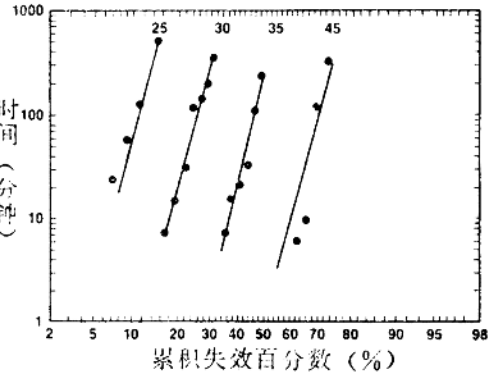


图3 第一次失效数据。在多种结构上同时加应力，厂商A的试验样品25个，试验时间40小时，温度30℃。

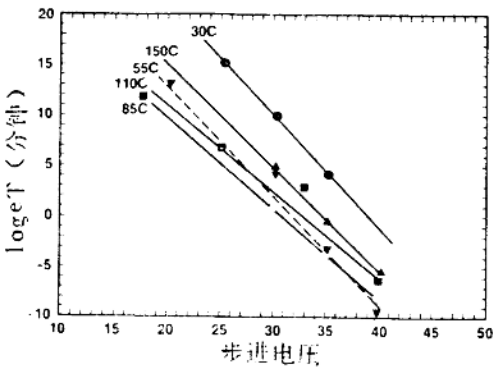


图4 t_{50} 随温度、电压的变化 厂商A的第一次失效数据

然而，推荐的程序与每种结构无关。在下面进行的试验中，分别对每种结构进行监控，因而所获得的结果是比较准确的。由于若干结构在试验位置上互相交迭，故试验结果有不一致的地方。但在审查分析方法时已考虑到区分这些不一致之处，图5和图6所示是单个结构在上述相同试验位置上所做试验的结果。

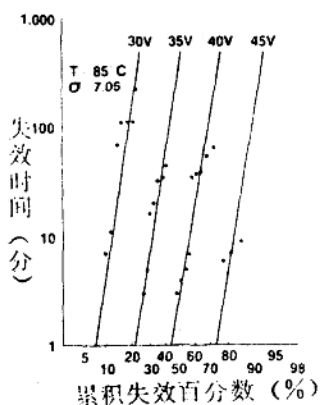


图5 85℃单个结构重复试验 (P2/sub)
厂商A的样品32个,试验时间40小时

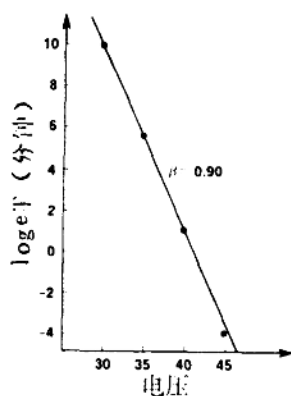


图6 (试验温度85℃,厂商A的样品)
 t_s 随步进电压的变化

法,一是直接采用公式(3)和(5),二是改变 β 值一直到150℃时的步进应力试验与

表1 步进应力试验数据 (85℃时)

失效数	沟道数	电压应力	时间 (分钟)	时间间隔	CDF (%)
1	15	15	1	2	1.98
2	40	15	8	2	3.96
3	46	25	5	7	6.03
4	12	25	136	7	8.24
5	9	30	7	9	10.5
6	34	30	11	9	12.8
7	32	30	67	9	15.0
8	16	30	107	9	17.3
9	31	30	110	9	19.6
10	41	30	111	9	21.8
11	4	30	215	9	24.1
12	8	35	3	10	26.4
13	26	35	5	10	28.7
14	1	35	16	10	31.4
15	27	35	20	10	34.1
16	29	35	32	10	36.8
17	48	35	35	10	39.5
18	25	35	45	10	42.2
19	0	35	108	10	45.1
20	2	40	3	11	48.1
21	6	40	4	11	51.0
22	10	40	5	11	54.0
23	35	40	7	11	57.0
24	17	40	35	11	59.9
25	42	40	37	11	62.9
26	44	40	38	11	65.9
27	20	40	55	11	69.9
28	45	40	65	11	73.9
29	7	45	6	12	77.9
30	14	45	7	12	81.9
31	39	45	9	12	85.9
32	23	45	73	12	94.8

表1所列是用这一试验方法所获得的数据。CDF计算是一种审查结果,这种审查可以减少试验样品和时间,图7是根据公式(3)和(5) β 值取0.9推算到10V时的单个结构的推算数据曲线,此外,在本研究中,还得到抽样母体的总的时间分布。

厂商B的样品呈现一种非对数正态分布或双峰分布,大多数的失效是在两种不同的试验条件下出现的。所得的数据有:85℃和150℃时的步进应力试验数据以及125℃、150℃16V时的寿命试验数据。估计 β 值的方

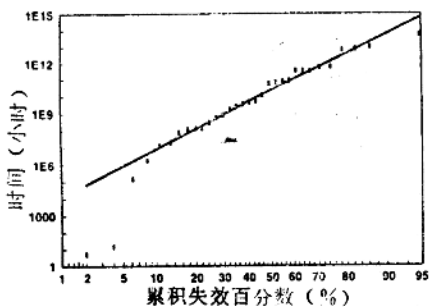
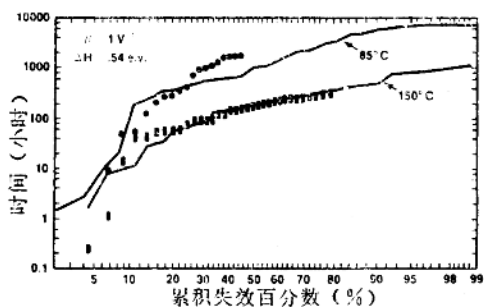


图7 10V85°C时, 厂商A的样品(P02/Subs)的时间-失效模型

150°C时的寿命试验结果相一致为止。 β 估计量为1.0时, 可以得到理想的失效率, 这是与从两个步进级所获得的0.8值比较之后提出来的。用 $\beta = 1$, $\Delta H = 0.54\text{eV}$ 处理85°C时的数据, 得到图8所示结果。



圆点和长方形为恒定应力, 实线是从步进应力推算出来的; 所用样品为厂商B的样品

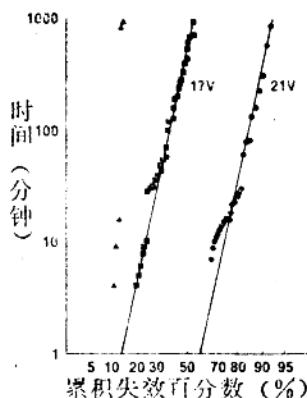
图8 步进应力与恒定应力的比较

显然, 由于多数失效是在一或二种试验条件下发生的, 所以在 σ 值很小时, 步进应力难以采用。电介质在 σ 值十分小的情况下一般是不会发生失效的, 因而这不是所述主要问题。

许多厂商已经成功地采用了步进应力试验。下面用厂商C的情况作为实例加以说明。用100只样品, 分为二个等份, 50只在70°C下进行步进应力试验, 另50只在150°C下进行步进应力试验。每次试验用100只电

容器, 由于5V时剔除了部份样品, 所以试验总数略有减少, 试验初始电压为5V, 时间间隔取16小时, 步进级为4V, 加步进应力到样品击穿便可知母体的先期情况。

图9所示是70°C温度下13V, 17V, 21V时的失效情况。在5V、9V以及25V (图中未标出) 时有附加的失效, 由17V和21V时所示两曲线计算出的 β 值是1.8, 而150°C时, β 值是1.6。如要拟合为单分布, 则所用 β 值取上述两个数的算术平均值即1.7, 根据公式(3)和(5), 可将70°C时的数据外推到5V。图10是小于10小时到 10^{18} 小时范围内



样品数=100, 试验温度为70°C, 步进级为4V, Δt 为16小时

图9 厂商C的样品的步进应力数据

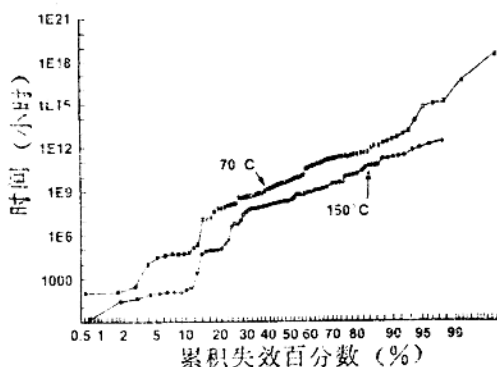


图10 厂商C的样品的步进应力试验外推到5V时的曲线, $\beta = 1.7$ V-1

的外推曲线。为使图示各点与对数正态分布有最好的拟合效果,采用了IBM公司Paul Tobias提出的统计方法。该方法能把二种分布改变为一种恒定 σ 分布,其分析结果列于表2。

表2 最大似然估计

温度	t_{50}	σ	μ
70°C	4.2E9	6.823	22.168
150°C	8.8E7	6.823	18.288

就所表示的温度和50%失效时的时间而言, ΔH 的估计值可能是0.6eV。最后,用对数正态分析计算了70°C时电介质失效率值。由于70°C这一级是直接测量的并被认为是最坏情况下的代表。所以 ΔH 值是不需要的。表3列出了不同时间范围内的累积失效和平均失效率。

表3 厂商C试验样品在70°C时电介质失效率

小时	累积失效百分数%	平均失效率%/1000小时
0-3000	0.019	0.63
0-40000	0.045	0.11
3000-40000	0.026	0.07

讨论与结论

以厂商C为例,试验工作大约进行一个月的时间,其中包括布线、试验和分析等工作。所用设备应是一种顺心应手的工具,并且通过改变布线便能使之适合于大多数试验位置^[6]。为获得相同的信息,先前的试

验需进行近四个月的试验才行。

如试验样品少时,步进应力试验并不适用,也不能用来试验混合结构的样品,从统计学角度来看,每项试验的失效样品越多越好,而时间越节省越有价值,但无必要让全部样品都失效。若能提供足够多的样品,则可望得到低于50%失效时的理想估计,这对于那些保护二极管抑制高电压的试验位置更显得必要。

Berman^[3]指出:斜面击穿也许是研究寿命特征的更为快捷的途径。事实上,步进应力试验所需的时间越来越少,电压间隔趋近于一斜线作为极限,对许多步进级的极限来说,公式(5)可以简化为:

$$t_F = t_N + \frac{\Delta t \exp[-\beta \Delta V]}{1 - \exp[-\beta \Delta V]} \rightarrow \frac{\Delta t}{\beta \Delta V} = \frac{1}{\beta R} \quad (6)$$

对小 Δt 和 ΔV 而言,这便是Berman模型中提及的在击穿电压时的有效时间。

步进应力试验和恒定应力试验之间的互换性仍是一个问题。从许多实例可以看出,步进应力试验所获得的失效率结果优于恒应力试验(相反的例子尚未见到)。步进应力确实与实际应用电压相适应,而恒应力却远远超过应用水平。如果极化或者电荷俘获在抑制某些缺陷的失效机理中起到一种作用的话,那么,上述的差别便可以阐明清楚。作为一种技术,步进应力试验是快捷的,可以在使用温度条件下应用,而且方法简便,容易实现自动化。

参考资料(略)

高加速温、湿度应力试验技术 (HAST)

J·E·Gunn, S·K·Malik and P·M·Mazumdar

摘要 本文介绍的是一种高加速温度、湿度和加偏压的应力试验方法。这种方法允许在温度为100℃~175℃、相对湿度为50%~85%的范围内进行试验。这种方法提供了在不同的高温高湿条件下, 腐蚀失效模式和对数正态分布的恒定不变的实验结果, 给出了与温度为85℃、相对湿度为81%和温度为60℃、相对湿度为81%的应力试验有关的加速因子。

前言

塑料封装集成电路在高可靠性应用方面已为工业界所接受。对于影响它们可靠性的一些因素: 模压树脂、器件制作工艺和钝化系统等已作了改进。这些改进使常规的温度-湿度-偏压试验(通常用来测定耐湿性和有关腐蚀过程的试验)所需的试验持续时间增加。2~5年前是用500~1000小时的试验时间来确保器件的长寿命, 而现在则需要1000~5000小时。发展高加速的温度、湿度、加偏压试验技术, 可以减少试验的时间和预测元件在现场使用环境条件(即用户使用环境)下的真实性能。

HAST试验的说明

高加速的温度、湿度、应力试验技术采用100~175℃的高温 and 50~85%的受控湿度以及加偏压来作为应力因子。在采用高加速的温、湿度应力试验时, 可使用一个两箱式系统来获得100~175℃温度下的受控湿度。这种系统的主体部分由两个热隔离的耐压容器组成。耐压容器通过转换阀与独立的温度控制器相连接。示意图如图1所示。

通过控制1号容器的温度, 可以控制进入2号容器的水汽的部分压力。例如, 使1号容器保持在141.9℃(水蒸气压力为2856毫米水银柱), 并使2号容器的温度保持在

150℃下, 可以使水在150℃下达到饱和度为80%的状态(饱和蒸气压在150℃时是3590毫米水银柱)。在高加速的温、湿度应力试验中, 用过的气体和在水蒸气的混合物可以通过一个受控漏泄阀排出外面。在该试验中, 湿度控制精度达到±2%以内。

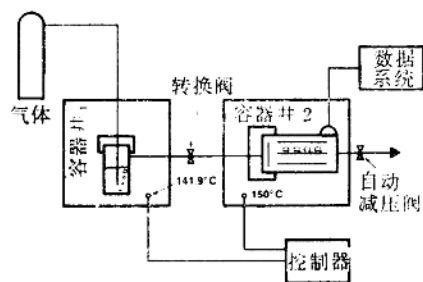


图1 试验系统示意图

用镀金铜-钎合金线缠绕的引线和316号不锈钢夹具构成专用的聚四氟乙烯板。其整个内部连接采用标准的聚四氟乙烯绝缘线缠绕。业已证明: 在高加速的温、湿度应力试验环境中, 在超过1000小时的试验时间里, 这种聚四氟乙烯板是十分安全可靠的。

试验样品

在应用高加速的温度湿度应力试验技术来评价腐蚀程度方面, 所选取的试样是一种市场上买得到的、塑料密封的复合大功率激

张汝强译 许甫校

励器和双极型集成电路。已知这些器件在温度、湿度和电压应力作用下会发生铝区腐蚀。样品是从一个“有代表性”的生产批中随机抽取的。为了使功率消耗减至最小和防止局部发热,输出功率晶体管被保持在一种反向偏置状态。

分 析

为了使高加速的温、湿度应力试验技术有充分的根据和了解温度/湿度(T/H)所引起的腐蚀过程,曾进行了广泛的分析研究。使用了等离子体色谱仪和质谱仪来鉴定密封材料中的防燃添加剂的高温稳定性。在试验前后,用热分析方法(DSC和TMA)来研究湿度对密封材料的影响。用测定机械稳定性来研究树脂的热应变能力。用离子色谱仪来测定析出管壳的离子数,并表征芯片上所析出的磷的动态特性。应用美军标准MIL-STD-883B中的铝腐蚀染色法来研究钝化缺陷的密度。测定了透湿率常数。使用能量色散X射线和扫描电子显微镜微探针技术来鉴别腐蚀产物。这些分析表明了高加速的温、湿度应力试验是与常规的温度/湿度(T/H)试验相符的。

试 验

选择了下列四种温度-湿度-偏压条件:

80°C/81% R·H/+70V

115°C/81% R·H/+70V

130°C/81% R·H/+70V

150°C/81% R·H/+70V

为了测定腐蚀的热激活能,所有的试验架都应保持在恒定的81%相对湿度和70伏偏压的状态下。试验温度的选择,应考虑到使所有部分都能经受高于和低于封装玻璃的转变温度($T_g = 145^\circ\text{C}$),从而确定本试验方法的合适的温度范围。把85°C/81%的试验架置于常规的温度/湿度试验箱里,以便提供

一个标准的温度/湿度(T/H)试验基准。

开始时,所有试验架都是各放50个样品。任何参数偏离元器件性能规范值,都认为是失效。所有元器件都定期取出进行电测试和有关腐蚀的失效物理分析。

先前的试验表明,主要的失效模式是集电极条的腐蚀。因此,用一集电极漏电流的现场监测器作腐蚀指示器和控制数据读出的时间间隔。典型的漏电流值在微安范围内。在多次读出时间点上对实测结果进行验证。器件偏置电压的实测表明规定的电应力数值是合适的。

高加速的温、湿度应力试验是在空气/水和氮/水的环境下进行的。

结 果

已经发现:氯引起的铝金属化腐蚀,是在三种高加速的温、湿度应力试验条件下的一种主要的失效模式。氯是作为生产过程的一种残留物而存在的。正如失效物理分析中所证实的,这一失效模式是与85°C/81%RH试验中所观察到的失效模式相同的。在150°C的高加速温、湿度应力试验架的试验中,也发现了由离子杂质所造成的失效。这种失效模式也出现在150°C的标准高温反偏压试验(HTRB)中。最重要的一点是:在高加速的温、湿度应力试验中,没有观察到新的失效模式。

由氯诱发腐蚀的试验数据如图2所示。对于所有试验条件,累积失效的对数正态分布曲线的 σ 值均为0.43。四种试验条件下的 t_{50} (50%失效的时间)如表1所示。表中,高加速的温、湿度应力试验的加速因子是以85°C/81%RH的试验条件为基准。在150°C时,加速系数大约为250(85°C/81%RH条件的试验是一种工业生产中公认的加速试验。这一应力条件相对于周围使用环境的加速系数已经知道)。

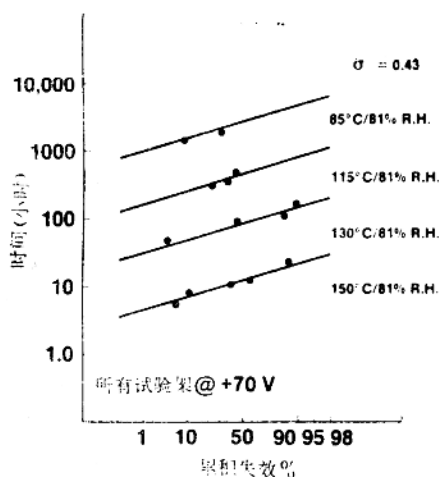


图2 $\ln t$ 与累积失效百分比的关系曲线

表 1

试验条件	t_{50} (小时)	A·F*
85°C/81% RH	3000	1
115°C/81% RH	446	7.4
130°C/81% RH	85.0	38.8
150°C/81% RH	12.4	266

* 以85°C/81% RH为基准的加速因子

我们假设阿列尼乌斯反应速率模型为动力学模型的起始点。

阿列尼乌斯方程描述了过程变化的时间速率与该过程出现的温度的关系，即：

$$R(t) = e^{(A-B)/T}$$

式中A和B是实验常数。

在本应用中，通过 t_{50} 来测量 $R(t)$ ，而B等于热激活能除以波耳兹曼常数 ($B = \Delta H/K$)。取对数得：

$$\ln t_{50} = A - \Delta H/KT$$

因此，当画出 $\ln t_{50}$ 与 $1/T$ 的关系曲线时， ΔH 可能与曲线的斜率有关。

在图3中，以 t_{50} 的自然对数作为四种试验条件下的 $1/T$ 的函数表示。当激活能等于1.1eV时，可以获得一线性关系。

对于85°C/81%RH和115°C/80%RH条件下的 t_{50} ，可由预计的早期失效数据获得，而在其他的试验架中，则已观测到高于50%的失效。应该指出，150°C的条件高于封装玻璃的变化温度；但无论如何，这些数据是和温度较低的试验架所得的数据相一致的。

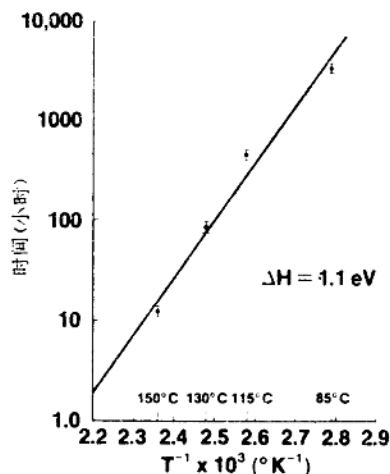


图3 $\ln T_{50}$ 与 $1/T$ (温度) 的关系曲线

NMOS 动态随机存贮器的试验

高加速的温、湿度应力试验也可以应用于NMOS动态随机存贮器，以研究高加速的温、湿度应力试验对于塑封NMOS器件的适用性。如前所述，试验的样品也是塑料密封的功能器件。

我们发现，高加速的温、湿度应力试验和常规试验具有相同的失效模式。这些元件的主要失效模式是磷诱发的铝金属化腐蚀，没有发现新的失效模式。在所有的试验架中，样品都施以静态的额定偏压。

这类腐蚀的失效数据已在先前的报告中进行了分析。我们发现：累积分布函数是与对数正态分布相拟合的，这里，各试验架之间的 σ 值均为1.34。推算出腐蚀的热激活能 ΔH 大约是0.3电子伏。当与60°C/81%RH/