

单块微电路可靠性手册

下 册

上海无线电十九厂

1973年

前 言

这本《单块微电路可靠性估计》是《硅单块微电路可靠性手册》中的第三卷,是得克萨斯仪器公司根据 NAS8-20639 合同为国家宇宙航行局准备的。该手册共分以下数卷:

第一卷 单块微电路应用

第二卷 单块微电路失效机构

第三卷 单块微电路失效分析

第四卷 单块微电路可靠性估计

《硅单块微电路可靠性手册》是一本关于单块微电路的合理应用、性能了解以及电路最佳质量和可靠性控制的参考书。

第三卷论述:

- 有效的失效分析方法
- 失效分析的具体步骤
- 说明失效机构及其引起的原因
- 对失效分析的结果予以评价以及对在发现和受影响的参数或特性之间存在的关系加以说明

第四卷论述:

- 单块微电路在最大额定值中和在温度为 85°C 、 55°C 和 25°C 中工作所产生的失效率数据
- 条件最大额定值超过 0°C 至 125°C 范围的失效率外推法使用的一条曲线
- 某一特定单块微电路的失效率同所属的同一族中其他系列的平均失效率大大不同; 电路与其失效率一致
- 据最近获得的参数, 而非使用加速因子换算的失效率

前 言

随着科学技术特别是国防尖端工程和空间技术的发展, 电子系统日趋复杂, 对器件和元件的可靠性提出了更高的要求。硅单块集成电路即单块微电路的研究和生产, 正是为了满足这一要求。但是人们对可靠性重要意义的认识却有一个过程。在初期往往估计不足, 使发展过程出现严重的曲折。以美国微电子技术的发展为例, 在 1963 年研制第一台微电路计算机即“民兵 II”导弹制导计算机时, 开始对可靠性认识不足, 生产的微电路达不到可靠性指标, 即机器的故障间隔平均时间为一万小时, 微电路失效率为 $0.008\%/千小时$ 。所以在六十年代中期, 由于制导计算机生产不出来而使大批导弹不能服役。其后采取了改进微电路可靠性的措施, 投入大量人力、物力。在 1964 年到 1966 年的二年中, 微电路失效率从 $0.07\%/千小时$ 降低到 $0.000\%/千小时$, 即可靠性提高了 100 倍以上, 达到了预定指标。这样的例子, 在国外屡见不鲜。把相当的人力、物力投入可靠性工作, 看起来似乎多余, 但无数事实表明, 只有这样才能达到保证可靠和降低成本。

美国的可靠性工作在五十年代开始重视, 六十年代得到发展并日趋成熟。其技术特点可归纳成下面二种方法。第一种方法是结合分离元件发展起来的。主要是进行长时间的大规模寿命试验, 从而统计出失效率, 作为进行整机可靠性指标分配, 设计和预测的数据。这对元件应用部门有用, 但是生产部门从中得不到很多关于改进和提高产品质量的资料。它是五十年代统

计学者所热衷的经典可靠性方法。重点为统计出失效率，而不是改进失效率。对高可靠的元件，必须用大量的元件一小时才能统计出平均值，所以时间长、成本高。微电路的复杂度和按功能计算的可靠性都较分离元件提高了。上面的寿命试验方法就不适用。所以在六十年代随着微电路的生产和应用，发展短时间，高应力的加速试验及其一套相应的分析方法。主要是抽样模底，对规模较小的样品进行加速应力试验，然后对每一失效电路进行较深入的分析，找出其失效类型及原因，采取针对性的纠正措施来消除或控制这一失效类型。它的重点不在于统计出失效率，而在于改进失效率。所以强调失效分析与质量改进的结合。在失效分析中，往往必须采用物理、化学、金相、显微分析等较精密的仪器设备和分析手段，并开展相应的失效机构的研究，以便较彻底的解决问题。除此之外，由于微电路的筛选较分离元件复杂，可靠性工作还包括各种筛选方法的研究。在1968年发表的美国微电子技术军用标准 883 就是一个例子。

本书就反映了美国 1967 年左右单块微电路可靠性工作的一个侧面。它是德克萨斯仪器公司根据美国宇航局的合同编写的技术报告。全书有四卷，我们分上、下册出版。其内容如下：

上册：卷 1，单块微电路的应用

卷 2，单块微电路的失效机构

下册：卷 3，单块微电路的失效分析

卷 4，单块微电路的可靠性估计

卷 1 的目的是为了帮助读者从可靠性着眼较有效的应用单块微电路。内容包括应用中碰到的典型问题和减额使用等方法。对不熟悉微电路的读者，本卷也是阅读其后三卷的基础。卷 2 是失效机构。列举了各工艺、工序引进的缺陷和当时生产的微电路中的主要失效类型及其失效率。讨论了失效机构，筛

选方法和纠正措施，但都不够深入。这也反映了当时这方面的水平。卷3是失效分析。其内容为对失效的微电路进行分析的方法和步骤。使从事失效分析的人能参照本书进行工作。它包括逐步分析的具体方法，如何去找出失效类型及其原因。特别是在金相剖析部分有较细致的工作。这些内容在一般的公开文献中是不易见到的。卷4是可靠性估计，即估计应用微电路的电子设备能达到的可靠性。使应用者了解微电路的可靠工作，就能更合理地使用它。它包括可靠性的基本概念，质量控制中的抽样统计方法，1961~1966年美国微电路的失效率及其与温度的关系曲线，和寿命、环境、应力加速试验、参数稳定性等可靠性测验工作。本卷的抽样统计方法和失效率的估计都是较有用的资料。但可靠性测验的讨论则偏重实际，理论分析较少。总的来看“可靠性手册”总结了美国1967年前单块微电路的可靠性工作。

在毛主席革命路线指引下，我国电子工业形势大好。随着单块微电路产量的增加和应用的普及，它的可靠性问题越来越引起各方面的重视。我们遵照毛主席洋为中用的教导，译出了这本可靠性手册，供从事微电路工艺和应用的广大工人和科技人员参考。书中介绍的内容不一定完全适合我们情况，希望读者在阅读本书时要特别注意这一点的。更重要的是，我们要在实践中结合自己的经验，在不久的将来，赶上和超过世界先进水平。

由于我们对可靠性工作还不够熟悉，加上原书有些地方字迹不清，所以错误或不妥之处一定很多，希望同志们批评指正。

吴锡九

1972.12

• III •

序

本手册是一本关于集成电路合理应用、考核、管理及质量和可靠性控制的参考文献。共编成四卷，分别论述应用、失效机构、失效分析和可靠性估计等问题。本手册中的数据，有些同《微电子器件数据手册》中的相类似，但他们涉及到的是一般的微电路，而本书研究的则只是单块微电路的可靠性问题。

本手册是在阿拉巴马州马歇尔宇宙飞行中心质量和可靠性实验室指导下出版的。

马歇尔宇宙飞行中心质量和可靠性实验室主任

格 劳

目 录

第三卷 单块微电路失效分析

3.1	引言.....	1
3.2	单块微电路开装前的估计.....	3
3.2.1	总结分析得到的失效数据.....	3
3.2.2	验证失效数据.....	3
3.2.2.1	引言.....	3
3.2.2.2	参数测试与所需要的设备.....	4
3.2.2.2.1	数字器件.....	4
3.2.2.2.2	线性器件	19
3.2.2.3	数据的关系	23
3.2.2.4	忽好忽坏现象的处理	23
3.2.2.4.1	应用分析	24
3.2.2.4.2	温度循环	24
3.2.2.4.3	振动	24
3.2.2.4.4	目查	24
3.2.2.4.5	结论	24
3.2.3	起始电测试	25
3.2.3.1	隔离与导通测试及其设备	25
3.2.3.2	管脚对管脚测试与寄生效应	26
3.2.3.2.1	数字器件	26
3.2.3.2.2	线性器件	38
3.2.4	封装的机械估计	40

3.2.4.1	开装前的目查	40
3.2.4.2	X 光照相分析	40
3.2.4.3	密封性估计	40
3.3	打开管壳说明	45
3.3.1	扁平封装	45
3.3.1.1	引言	45
3.3.1.2	微型铣床	45
3.3.1.3	刀或锋利工具	47
3.3.1.4	打砂	51
3.3.2	直插式封装	51
3.3.3	To-5 型封装	55
3.4	单块微电路开装后的分析	56
3.4.1	引言	56
3.4.2	目查	56
3.4.2.1	设备	56
3.4.2.2	典型问题举例	59
3.4.2.2.1	引言	59
3.4.2.2.2	光刻问题	60
3.4.2.2.3	蒸发引线	60
3.4.2.2.4	芯片问题	66
3.4.2.2.5	连接引线	69
3.4.2.2.6	外引线	72
3.4.2.2.7	电过应力	74
3.4.2.3	观察到的问题和原始记录问题之间的相互关系	75
3.4.3	电分析	76
3.4.3.1	引言	76
3.4.3.2	具体需要的设备	76

3.4.3.2.1	功能探测设备	76
3.4.3.2.2	选择去除和全部去除引线的设备	78
3.4.3.2.3	修补开路引线	80
3.4.3.2.4	温度循环设备	80
3.4.3.2.5	去除金属膜	81
3.4.3.3	数字电路	81
3.4.3.3.1	引言	81
3.4.3.3.2	目视观察到的缺陷检验	81
3.4.3.3.3	关于不能目视观察的缺陷	82
3.4.3.3.4	估计典型问题的举例	82
3.4.3.4	线性电路	88
3.4.3.4.1	引言	88
3.4.3.4.2	直流与交流电路分析	88
3.4.3.4.3	目查验证缺陷	102
3.4.3.4.4	确定观察不到的缺陷	104
3.4.3.5	电问题举例	110
3.4.3.5.1	引言	110
3.4.3.5.2	光刻窗中的氧化物	110
3.4.3.5.3	开路的针形, 劈刀形和超声键合	112
3.4.3.5.4	开路球焊接	113
3.4.3.5.5	扩散不当	114
3.4.3.5.6	氧化物缺陷(针孔)	117
3.4.3.5.7	反型层	117
3.5	半导体器件的冶金截面	119
3.5.1	引言	119
3.5.2	密封材料与技术	119
3.5.2.1	密封材料	119

3.5.2.2	密封技术·····	120
3.5.2.2.1	表面清洁·····	120
3.5.2.2.2	样品夹·····	120
3.5.2.2.3	环氧树脂密封·····	122
3.5.2.2.4	抽空器件表面的空气·····	122
3.5.3	粗磨设备与技术·····	125
3.5.4	精磨设备与技术·····	125
3.5.5	粗抛光设备与技术·····	128
3.5.6	精抛光设备与技术·····	132
3.5.7	显示硅结材料与技术·····	136
3.5.7.1	引言·····	136
3.5.7.2	材料·····	136
3.5.7.3	用法·····	137
3.6	热扫描器·····	139
3.6.1	引言·····	139
3.6.2	能力与极限·····	141
3.6.3	数据的测量·····	141
3.7	其他分析技术·····	143
3.7.1	电子显微术·····	143
3.7.1.1	引言·····	143
3.7.1.2	物理检查·····	143
3.7.1.3	细小粒子的化学分析·····	148
3.7.1.3.1	引言·····	148
3.7.1.3.2	电子衍射·····	148
3.7.1.3.3	电子衍射应用·····	149
3.7.2	电子微探针·····	154
3.7.2.1	引言·····	154
3.7.2.2	样品准备·····	155
3.7.2.3	电子微探针化学元素分析举例·····	155

图 示 目 录

第三卷 单块微电路失效分析

3-1	RCTL 器件输入电流测试电路	5
3-2	RCTL 器件“导通”电压测试电路	5
3-3	RCTL 器件“截止”电压测试电路	5
3-4	RCTL 器件动态测试电路	6
3-5	单块微电路失效分析测试排列	8
3-6	DTL 器件“0”状态 V_{cc} 电流测试电路	9
3-7	DTL 器件“1”状态 V_{cc} 电流测试电路	9
3-8	DTL 器件“0”状态输入电流测试电路	10
3-9	DTL 器件“1”状态输入电流测试电路	10
3-10	DTL 器件短路输出电流测试电路	11
3-11	DTL 器件“1”状态输出电流测试电路	11
3-12	DTL 器件输入电压测试电路	12
3-13	DTL 器件“0”状态输出电压测试电路	13
3-14	DTL 器件“1”状态输出电压测试电路	13
3-15	DTL 器件动态测试电路	14
3-16	TTL 器件“0”状态输入电流测试电路	15
3-17	TTL 器件“1”状态输入电流测试电路	16
3-18	TTL 器件“0”状态输出电压测试电路	17
3-19	TTL 器件“1”状态电压测试电路	17
3-20	TTL 器件“1”状态短路输出电压测试电路	18
3-21	TTL 器件动态测试电路	18

3-22	差分放大器 DICO 与 CMOVO 的测试电路	20
3-23	差分放大器 V_A 计算 DICO 的测试电路	21
3-24	差分放大器电压增益 (GV), 交流讯号和截止频率 (Fh) 的测试电路	22
3-25	曲线扫描仪电路	25
3-26	曲线扫描仪测试电路举例	27
3-27	图 3-26 电路引线 1 上接“正”电极时曲线扫描仪 显示	27
3-28	图 3-26 电路引线 2 上接“正”电极时曲线扫描仪 显示	28
3-29	RCTL 的门电路	28
3-30	RCTL 电路引线 1 上接“正”电极时所预期的曲线 扫描仪显示	29
3-31	RCTL 电路引线 1 上接“正”电极时实际曲线扫描 仪显示	29
3-32	抽出电容结构的 RCTL 的门电路	30
3-33	图 3-29 电路引线 7 上接“正”电极时所预期的曲线 扫描仪显示	30
3-34	图 3-32 电路引线 7 上接“正”电极时所预期的曲线 扫描仪显示	30
3-35	RCTL 门电路引线 7 上接“正”电极时的实际曲线 扫描仪显示	31
3-36	曲线扫描仪比较测试的测试盒	32
3-37	DTL 门电路	33
3-38	DTL 门电路的扩散断切面	33
3-39	关于寄生元件 DTL 门电路的组成部件	34
3-40	关于用寄生元件 DTL 门电路	35

3-41	TTL 门电路	35
3-42	TTL 门电路扩散断切面	36
3-43	关于寄生 TTL 门电路部件	36
3-44	关于寄生元件 TTL 门电路	37
3-45	有寄生元件(用虚线表示)的线路图	38
3-46	扩散断面	39
3-47	“大漏”检查法测试发现的扁平封装漏气	42
3-48	聚乙烯二醇“大漏”检查法测试设备	43
3-49	To-84 型单块微电路扁平封装	46
3-50	打开金属扁平封装的微型铣床	47
3-51	打开扁平封装的微型铣床	48
3-52	打开金属扁平封装的微型铣床的一部分	49
3-53	打开扁平封装微型铣床的铣轮机械夹具	50
3-54	塑料直插式封装	52
3-55	单块微电路改进的 To-5 型封装	53
3-56	To-5 型封装开装器	54
3-57	因掩模缺陷发射极——基极短路	57
3-58	因金属膜缺陷开路	57
3-59	因金属膜过多开路	58
3-60	金——硅低共熔晶体	58
3-61	因金属膜过多开路	59
3-62	金——硅低共熔晶体	61
3-63	因污染引线开路	61
3-64	脱焊	62
3-65	因化学成分开路	63
3-66	引线从窗口脱落	64
3-67	引线从氧化物脱落	65

3-68	芯片裂缝·····	66
3-69	芯片折断·····	67
3-70	切成小片的芯片(短路)·····	68
3-71	切成小片的芯片(间断的开路)·····	69
3-72	因引线折断开路·····	70
3-73	因引线排列不当短路·····	71
3-74	因机械——封装引线短路·····	72
3-75	外引线与硅芯片短路·····	73
3-76	外引线与外壳短路·····	74
3-77	电过应力·····	74
3-78	因电过应力闪光垮接·····	74
3-79	探针装置·····	77
3-80	钨探针磨尖技术·····	78
3-81	引线——开路线路·····	79
3-82	好的 TTL 门电压值 ·····	82
3-83	有缺陷的 TTL 门实际电压值 ·····	83
3-84	有缺陷的 TTL 门晶体管测得的电压 ·····	83
3-85	好的 RCTL 门电压值 ·····	84
3-86	有缺陷的 RCTL 门实际电压值 ·····	84
3-87	隔离 Q-输出晶体管时需将引线断开 ·····	86
3-88	好的 DTL 门应有的电压值 ·····	86
3-89	有缺陷的 DTL 门实际电压值 ·····	87
3-90	包含 DTL 门缺陷的引线部分 ·····	87
3-91	差分放大器电路 (SN350, 得克塞斯仪器公司) ·····	88
3-92	晶体管的工作区域·····	90
3-93	晶体管低频等效电路·····	91
3-94	测试 γ_0 的曲线扫描仪显示器·····	92

3-95	测试 γ_e 的曲线扫描仪显示	94
3-96	测试 β 与 γ_e 的曲线扫描仪显示	95
3-97	基本晶体管连接法	96
3-98	SN 350 推挽放大器等效电路	100
3-99	有缺陷的 SN 350 差分放大器实际电压值	106
3-100	串联各级增益相乘 ($A_{v1} \cdot A_{v2}$)	108
3-101	SN 350 差分放大器电路简化图	108
3-102	光刻窗中的氧化物	111
3-103	上图光刻窗中的氧化物位置	111
3-104	开路键合	113
3-105	开路球键合(金——铝系统)	114
3-106	开路球键合(金——金系统)	114
3-107	因扩散不当引起电阻——衬底短路	115
3-108	因扩散不当引起电阻——电阻短路	115
3-109	因扩散不当引起集电极——衬底短路	116
3-110	因扩散不当引起基极——衬底短路	116
3-111	去除金属膜后的氧化层针孔	117
3-112	<i>NPN</i> 基极反型层的 $C \sim E$ 测试与 <i>PNP</i> 集电极 反型层的 $B \sim C$ 测试	118
3-113	<i>PNP</i> 集电极反型层的 $C \sim E$ 测试	118
3-114	塑料夹子	121
3-115	配制环氧化物与催化剂的玻璃量杯装置	123
3-116	排泄环氧树脂混合物的真空装置	124
3-117	研磨粉范围	126
3-118	样品夹在带形研磨器上的适当部位	127
3-119	样品夹在精细磨床上的适当部位	129
3-120	割痕平均深度(割痕深度——研磨粉的尺寸)	130

3-121	样品在精抛光时去除多余材料的速率·····	131
3-122	样品夹在精抛光机上的适当部位·····	135
3-123	热扫描器·····	140
3-124	施加应力前铝条的电子显微照相·····	145
3-125	经过大电流与高温后的铝条电子显微照相·····	146
3-126	经过高温梯度与化学腐蚀后的铝条电子显微照相··	147
3-127	晶体管平面模型与电子衍射效应说明·····	148
3-128	铝的电子衍射图形·····	150
3-129	器件片上不规则生长的电子显微照相·····	151
3-130	不规则生长与电子衍射图形的电子显微照相·····	152
3-131	不规则生长的电子显微照相·····	153
3-132	有引线分解的单块微电路·····	156
3-133	有引线分解区域中的微探针抽样电流显示·····	157
3-134	有引线分解区域中氯表面分布的微探针显示·····	158
3-135	有外来材料粒子的单块微电路·····	159
3-136	有外来材料粒子区域中的微探针显示·····	160

目 录

第四卷 单块微电路可靠性估计

4.1	导言.....	174
4.2	可靠性基本概念.....	175
4.2.1	质量概念.....	175
4.2.1.1	引言.....	175
4.2.1.2	质量概念的定义.....	175
4.2.1.2.1	引言.....	175
4.2.1.2.2	抽样方案所提供的保证.....	176
4.2.2	可靠性概念.....	186
4.2.2.1	引言.....	186
4.2.2.2	统计分布.....	186
4.2.2.3	指数分布.....	186
4.2.2.3.1	引言.....	186
4.2.2.3.2	失效率计算示范.....	188
4.2.2.3.3	表示失效率的其他方法.....	190
4.2.2.4	维伯分布.....	192
4.2.2.4.1	引言.....	192
4.2.2.4.2	维伯分布的应用.....	196
4.2.2.5	正则(高斯)分布.....	202
4.2.3	选择有意义的数据.....	203
4.2.3.1	引言.....	203
4.2.3.2	恰当的失效标准.....	203