

电子设备贮存与不工作

可靠性预计方法

叶 万 举 编

中国人民解放军军械研究所

1994.9

电子学
PDG

前 言

可靠性是电子设备最重要的质量特性之一。可靠性预计是可靠性工程的组成部分，主要任务是为研制、使用和保障提供必要的信息。

以往的电子设备可靠性预计，着重研究工作状态。本书研究不工作状态。不工作状态最基本的是贮存(仓库贮存和部队贮存)，设备处于地面环境。同时，不工作状态还泛指一切未通电工作的状态。贮存、运输、待命、甚至在执行任务的武器系统中未通电工作的一切电子设备，都呈不工作状态。设备处于地面、天空、海上、海下等一系列复杂环境。因此，从广义讲，不工作状态包括贮存，而贮存是不工作状态最基本的类型。

在相对平时时期，不工作可靠性的重要性显得十分突出。这是因为，若不工作失效率仅为工作失效率的5%左右，而不工作时间却为工作时间的20倍左右；则不工作失效数就有可能和工作失效数相当。5%这个数据，在许多电子元器件中并不少见(请见5.2节)。

虽然“贮存”包含在“不工作”之中，但为了突出贮存可靠性预计在当前的迫切性；本书书名把这两者并列起来。贮存可靠性已列入某些武器装备的战术技术指标，读者迫切需要系统地了解其预计技术。广义的不工作可靠性预计是高一级的发展阶段，它需要在贮存可靠性预计的基础上，掌握比较准确的各种复杂环境的不工作环境系数值，以及设备交替处于工作、不工作状态的时间历程，才能比较准确地预计。进而，可开展同时考虑工作与不工作可靠性的综合可靠性预计，使可靠性预计技术更加完善。本书亦介绍了综合可靠性预计的框架。

元器件不工作失效研究，是设备不工作可靠性预计的基础。因此，本书前五章以元器件为主要对象，从环境与失效机理、失效数据统计分析、建立预计模型以及数据比较等各个角度讨论元器件失效率问题。作为归宿，第六章讨论设备的不工作可靠性与综合可靠性预计问题。由于国内数据暂时缺乏，本书附录列出美国14类元器件不工作失效率预计模型及详细数据。附录的作用，一是作为有关章节分析问题的实例；二是可供采用国外元器件的设备参考应用。

本书的主要素材有两类。第一类是按编者的观点，从美国权威性研究报告和数据手册中精炼出来的、对我们有实用价值的经验。第二类是按主要读者对象的需要，为了充实基本原理和方法，回答美国研究报告中未说明的问题，从其它国内外文献中汲取的素材。对这两类素材分析加工后，形成本书的系统性，并力求在基本理论和方法方面结合国内实际，有助于开展国产设备的不工作可靠性研究；在数据方面，绝对数据可供采用国外元器件的设备参考应用，相对数据在一定程度上对国产元器件有参考价值。

本书的主要读者对象是从事电子设备设计研究、生产、监造和管理的工作者。本书亦可作为大专院校有关专业的参考书。

本书于1993年11月完成初稿，1994年2月完成征求意见稿，同年5月完成送审稿。经决定，按该稿付印。

在本书编写过程中，得到总参兵种部首长和领导机关的关怀，以及所领导的积极支持。各方面专家曾提出宝贵意见和建议，其中有：何国伟、甘茂治、张廉宝、由中强、黄允华、池俊、冯振声、章仁川、潘敬武、魏英才、李金水、刘树勇、阮金元、果德杰、卢旭初、张广喜等。此外，王永会同志曾参加第四章一部分素材的翻译工作。编者对上述领导和同志们以及参考文献的作者们深表谢意，并恳请读者批评指正。

编者 1994.9.17

目 录

前 言	—1—
术语和符号	1
第一章 不工作环境与失效机理	4
1.1 环境影响分析	4
1.2 电子元器件不工作失效机理	11
1.3 定期测试对系统可靠性的影响	21
第二章 不工作失效数据统计分析	27
2.1 合格数据的条件	27
2.2 数据统计分析要点	28
第三章 建立不工作失效率预计模型一般方法	46
3.1 一般建模程序	46
3.2 建立理论模型	48
3.3 设备电源通断循环影响分析	49
3.4 温度影响分析	54
3.5 不工作环境系数分析	58
第四章 各类元器件建模特点	69
4.1 微电子器件的建模特点	69
4.2 半导体分立器件的建模特点	92
4.3 电阻器的建模特点	107
4.4 电容器的建模特点	117
4.5 感性器件的建模特点	128
4.6 激光器的建模特点	133
4.7 电子管的建模特点	134
4.8 机械、机电器件的建模特点	139
4.9 互连器件的建模特点	147
4.10 连接的建模特点	149

4.11 其它元件的建模特点	150
第五章 贮存失效率比较数据	152
5.1 贮存失效率预计值和现场数据比较	152
5.2 贮存失效率预计值和工作失效率预计值比较	152
第六章 设备不工作可靠性与综合可靠性预计	159
6.1 设备可靠性预计的意义	159
6.2 设备可靠性预计的一般方法	160
6.3 设备不工作可靠性预计模型	164
6.4 设备综合可靠性预计概念	168
附 录 14类元器件不工作失效率预计模型及详细数据(美)	173
7.1 不工作失效率预计说明	173
7.2 微电子器件	175
7.3 半导体分立器件	185
7.4 电子管	193
7.5 激光器	194
7.6 电阻器	196
7.7 电容器	200
7.8 感性器件	203
7.9 转动器件	206
7.10 继电器	207
7.11 开关	208
7.12 连接器	209
7.13 含镀层穿孔的互连器件	210
7.14 连接	211
7.15 其它元件	212
参考文献	213

术 语 和 符 号

术 语

鉴于和不工作可靠性有关的术语尚未标准化,下面只说明本书常用术语的基本含义,而不是严格的定义。

不工作 不工作是指产品能工作(能完成预定功能)但不需要它工作的状态。此时,它不承受被设计规定的工作时的电或机械的应力,而可能承受陆海空环境、运输、装卸、惯性力等造成的应力,也可能承受定期测试引起的应力。

贮存是广义不工作状态最基本的类型,对应的是贮存环境。

不工作可靠性 不工作可靠性是指持续处于不工作状态的产品,在规定的 t ,当它转入工作状态,即被设计规定的电的或机械的方式启动时,能完成规定功能的可能性。不工作可靠性的概率度量是不工作可靠度。它是不工作失效率 λ 和时间的函数。

当给定的不工作状态是贮存时,对应的不工作可靠性即为贮存可靠性。

不工作失效率 $(\lambda, \text{预计值}\lambda_p)$ 不工作失效率是指持续处于给定的不工作状态的产品,在规定的时间内,单位时间的平均失效数。本书采用的单位时间是 10^6 小时。在 n 个元器件寿命试验中,不工作失效率的点估计量,用其中的失效数 r 和 n 个元器件总试验时间之比来衡量。不同类型的寿命试验,总试验时间的算法不同(见2.2节)。

当给定的不工作状态是贮存时,对应的不工作失效率即为贮存失效率。

不工作基本失效率 (λ_m) 不工作基本失效率是指当不工作元器件的环境温度、环境类别、质量等级都符合规定的基准条件,且不受定期测试引起的应力时,该元器件的不工作失效率。本书规定的基准环境温度是 25°C ,基准环境类别是地面良好环境,基准质量等级因元器件类型而异(见第四章和附录)。此时,不工作温度系数、环境系数、质量系数均取值为1。因此,不工作基本失效率只考虑了上述基准条件和元器件类型、工艺、复杂度、封装

方式等因素对不工作失效率的影响。

不工作温度系数 (π_{NT}) 不工作温度系数是指当不工作元器件处于非基准的环境温度时, 对不工作失效率的修正系数。

不工作环境系数 (π_{NE}) 不工作环境系数是指当不工作元器件处于非基准的环境类别时, 对不工作失效率的修正系数。当不工作失效率预计模型中有单独的 π_{NT} 时, π_{NE} 中不包括环境温度的影响。否则, 包含环境温度的影响。

不工作质量系数 (π_{NQ}) 不工作质量系数是指当不工作元器件的质量非基准质量等级时, 对不工作失效率的修正系数。

设备电源通断循环系数 (π_{eye}) 设备电源通断循环系数是指对不工作元器件进行定期测试时, 考虑设备电源通断循环率对不工作失效率影响的修正系数。设备电源通断循环是指电子设备的电激励值从零上升到设计激励值, 然后又回到零值的循环。对应的循环率是指 10^3 小时内的平均循环数。

微电子器件缩写词

CCD	电荷耦合器件
CMOS	互补金属氧化物半导体器件
CMOS/SOS	在蓝宝石硅片上制作的CMOS器件
DIP	双列直插封装
DTL	二极管晶体管逻辑电路
ECL	发射极耦合逻辑电路
HTTL	高速晶体管晶体管逻辑电路
IIL	集成注入逻辑电路
LSIC	大规模集成电路
LSTTL	低功耗肖特基晶体管晶体管逻辑电路
LTTL	低功耗晶体管晶体管逻辑电路
MNOS	金属氮化物氧化物半导体器件
MOS	金属氧化物半导体器件
MSI	中规模集成(电路)
NMOS	N沟道金属氧化物半导体器件
PMOS	P沟道金属氧化物半导体器件

PROM	可编程序只读存储器
RAM	随机存取存储器
ROM	只读存储器
SSI	小规模集成(电路)
STTL	肖特基晶体管晶体管逻辑电路
VLSI	超大规模集成(电路)

第一章 不工作环境与失效机理

本章分析环境对不工作电子设备失效的影响。这些设备也许贮存或固定于地面，也许正随同飞机、舰船或装甲车行驶，但都未通电工作。

研究电子设备的可靠性，重要任务是分析设备发生失效的条件与概率。不工作的电子设备不承受通电工作产生的应力(定期通电测试除外)，其失效的条件决定于周围环境和元器件结构、材料、工艺、封装的性能。环境是产生应力的根源。元器件本身的缺陷可以因环境应力的作用而加速其失效。

为检查不工作电子设备的失效状况，需定期对它通电测试。然而，通电测试既是检查失效的必要环节，又可能是诱发失效的因素。前者对可靠性有正面的影响，将在本章讨论。后者，即设备电源通断循环对失效的影响，将在第三章讨论。

1.1 环境影响分析

本节分析不工作电子设备和外部环境的种种联系。

1.1.1 环境因素

处于贮存阶段的电子设备面临的环境条件相对较好；而待命的、执行任务的武器系统中的不工作电子设备，要跟随武器系统承受各种恶劣的环境条件。下面举出16类环境，并说明其主要的因素或环境应力^[1]。

地面良好环境：电磁干扰；湿度；载荷冲击；温度冲击与循环；霉菌与微生物。

地面固定环境：湿度；电磁干扰；高温；低温；温度冲击与循环；霉菌与微生物；盐雾；太阳辐射。

地面移动环境：温度冲击与循环；载荷冲击；高温；低温；灰尘与砂粒；湿度；泄漏；正弦振动；电磁干扰；随机振动；盐雾；霉菌与微生物；噪声；太阳辐射。

背负环境：温度冲击与循环；泄漏；湿度；载荷冲击；高温；低温；

随机振动；霉菌与微生物；正弦振动；盐雾；电磁干扰。

运输机座舱：温度冲击与循环；随机振动；温度—飞行高度；湿度；正弦振动；电磁干扰；载荷冲击；噪声；高温；低温；加速度；飞行高度；霉菌与微生物；温度—湿度—飞行高度。

战斗机座舱：随机振动；温度冲击与循环；加速度；温度—飞行高度；湿度；温度—湿度—飞行高度；高温；低温；电磁干扰；正弦振动；噪声；载荷冲击；飞行高度；霉菌与微生物。

运输机无人舱：飞行高度；温度—飞行高度；温度冲击与循环；温度—湿度—飞行高度；随机振动；高温；低温；载荷冲击；噪声；电磁干扰；湿度；正弦振动；太阳辐射；盐雾；加速度；霉菌与微生物；爆炸性空气。

战斗机无人舱：温度冲击与循环；随机振动；飞行高度；温度—湿度—飞行高度；高温；低温；载荷冲击；湿度；正弦振动；电磁干扰；噪声；压力冲击；太阳辐射；盐雾；霉菌与微生物；爆炸性空气。

直升(旋翼)飞机：随机振动；温度冲击与循环；正弦振动；高温；低温；载荷冲击；温度—飞行高度；噪声；湿度；灰尘与砂粒；温度—湿度—飞行高度；电磁干扰；加速度；飞行高度；盐雾；霉菌与微生物。

舰船舱内：湿度；爆炸性空气；随机振动；电磁干扰；正弦振动；载荷冲击；盐雾；温度冲击与循环；加速度；霉菌与微生物；噪声。

潜艇：盐雾；正弦振动；湿度；载荷冲击；霉菌与微生物；随机振动；噪声；电磁干扰；低温；爆炸性空气。

舰船舱外：盐雾；湿度；泄漏；载荷冲击；高温；低温；随机振动；霉菌与微生物；正弦振动；温度冲击与循环；电磁干扰；压力冲击；太阳辐射；加速度；噪声；爆炸性空气。

无遮盖的水下环境：盐雾；湿度；泄漏；压力冲击；载荷冲击；正弦振动；温度冲击与循环；高温；低温；随机振动；霉菌与微生物；电磁干扰。

水下发射环境：泄漏；载荷冲击；烟火冲击；随机振动；湿度；压力冲击；温度冲击与循环；噪声；盐雾；加速度；正弦振动；高温；低温；温度—飞行高度；霉菌与微生物；温度—湿度—飞行高度；电磁干扰。

导弹发射环境：烟火冲击；随机振动；加速度；温度—湿度—飞行高度；载荷冲击；温度冲击与循环；噪声；温度—飞行高度；电磁干扰；正

弦振动；湿度；高温；低温；压力冲击；飞行高度；宇宙空间模拟；爆炸性空气。

宇宙空间飞行：太阳辐射；宇宙空间模拟；温度—飞行高度；高温；低温；电磁干扰；温度冲击与循环；飞行高度；随机振动。

在以上各类环境中，不工作电子设备面临的主要环境因素是：

- 高温极值
- 低温极值
- 温度循环
- 湿度
- 大气污染
- 热冲击
- 机械冲击和振动
- 霉菌与微生物
- 核辐射
- 电磁场

1971年，美国曾对机载电子设备全年的各类故障进行过剖析。各种因素引起的故障百分数见表1.1.1-1。

表 1.1.1-1 机载电子设备故障百分数^[2]

故 障 原 因	百 分 数	故 障 原 因	百 分 数
温 度	22.2%	盐 雾	1.94%
振 动	11.38%	低 气 压	1.94%
潮 湿	10%	冲 击	1.11%
砂 尘	4.16%	其 它	47.3%

由表可见，50%以上的故障系各种环境因素所致。温度、振动、潮湿环境造成电子设备43.58%的故障。环境对电子设备的影响不能不引起我们极大的关注。

1.1.2 环境影响和失效模式

由环境应力造成失效，这是可靠性问题的基本物理现象。环境造成系统

失效可分为两类：(1)永久性损坏。(2)功能故障，即系统各种功能出现不利的变化，或受环境的影响功能不能正常发挥，一旦外界条件消失，系统功能仍能恢复。

电子设备中有大量电子元器件，也包括各种金属、非金属构件和材料；且处于整个武器系统之中。下面分析主要环境因素的主要影响和典型的失效模式。见表1.1.2-1。

表 1.1.2-1 环境影响和失效模式^[2]

环境因素	主要影响	典型失效模式
高温	热老化： 金属氧化 结构变化 设备过热 粘度下降、蒸发	绝缘失效 接点接触电阻增大，金属材料表面电阻增大。 橡胶、塑料裂纹和膨胀。 元件损坏，锡焊开裂，焊点脱开。 丧失润滑特性。蓄电池电解液挥发。
低温	增大粘度和浓度 结冰现象 脆化 物理收缩 元件性能改变	丧失润滑特性。 电气机械功能变化。 结构强度减弱，电缆损坏，蜡变硬，橡胶变脆。 结构失效，增大活动件的磨损，衬垫、密封垫弹性消失，引起泄漏。机械卡死。 铝电解电容器损坏，石英晶体往往不振荡，蓄电池容量降低。
高湿度	吸收湿气 电化反应： 锈蚀，电解	物理性能下降，电强度降低，绝缘电阻降低，电介常数增大。 机械强度下降。 电气性能下降，增大绝缘体的导电性。
温度冲击	机械应力	结构失效和强度下降，密封破坏，电器元件封装损坏。
振动	机械应力疲劳 电路中产生噪声	晶体管外引线、固体电路管脚、导线折断。 金属构件断裂、变形、结构失效。 联结器、继电器、开关瞬间断开，电子插件性能下降。 粘层、键合点脱开，电路瞬间短路、开路。

表1.1.2-1(续)

环境因素	主要影响	典型失效模式
冲击	机械应力	结构失效,电子设备瞬间短路、开路。
噪声	低频影响与振动相同。高频影响设备元件谐振。	电子管、波导管、速调管、磁控管、压电元件、薄壁上的继电器,传感器活门、开关、扁平的旋转天线等均受影响,结构可能失效。
太阳辐射	老化和物理反应: 脆化、软化粘合	表面特性下降、膨胀、龟裂、折皱、破裂。橡胶和塑料变质,电气性能变化。绝缘失效、密封失效、材料失色,产生臭氧。
砂尘	磨损 堵塞 静电荷增大 吸附水分	增大磨损,机械卡死,轴承损坏。 电气性能变化。 产生电噪声。 降低材料的绝缘性能。
盐雾	化学反应: 锈蚀和腐蚀 电解	增大磨损,机械强度下降,电气性能变坏,绝缘材料腐蚀。 产生电化腐蚀,结构强度减弱。
霉菌	霉菌吞噬和繁殖 吸附水分 分泌腐蚀性液体	有机材料强度降低、损坏,活动件受阻。 导致其它形式的腐蚀,如电化腐蚀。 光学透镜表面薄膜浸蚀,金属腐蚀和氧化。
臭氧	化学反应: 破裂、裂纹 脆化 粒化 空气绝缘强度下降	加速氧化。 电气或机械性能发生变化。 机械强度下降。 影响功能。 绝缘性能下降,发生跳弧现象。
低气压	膨胀 漏气 空气绝缘强度下降 散热不良	容器破裂,爆裂膨胀。 电气性能变化,机械强度下降。 绝缘击穿、跳弧,出现电弧、电晕放电现象和形成臭氧,电气设备工作不稳定甚至发生故障。 设备温度升高。

1.1.3 成对环境因素的相互作用

在实际环境中，各种环境因素不是单一的，起码是成对出现的。下面分析各对环境因素的相互作用。

高温和湿度：高温将提高湿气浸透速度。高温提高湿度的锈蚀影响。

高温和低压：当压力降低时，材料的放气现象增强；温度升高，放气速度增大。因此，这两种因素起相互强化的作用。

高温和盐雾：高温将增大盐雾所造成锈蚀的速度。

高温和太阳辐射：增大对有机材料的影响。

高温和霉化：霉化、微生物生长需要一定的高温。但温度在71℃以上，霉化和微生物不能发展。

高温和砂尘：砂尘的腐蚀作用因高温而加速。

高温和臭氧：温度从150℃左右开始，臭氧减少。在270℃左右以上，通常压力下，臭氧不能存在。

高温和冲击振动：相互强化对方的影响。塑料和聚合物要比金属更易受这种综合影响。

高温和爆炸性空气：温度对爆炸性空气的点燃影响很小。但它对作为一种重要因素的空气与水蒸气比则有影响。

低温和低压：会加速密封件的漏气。

低温和太阳辐射：低温会减少太阳辐射的影响，反之亦然。

低温和盐雾：低温可以减小盐雾的侵蚀速度。

低温和湿度：湿度随温度的降低而减小。但低温会造成湿气冷凝，如果温度更低，还会出现霜冻和结冰现象。

低温和砂尘：低温可以增大砂粒的渗透性。

低温和霉化：低温可以减小霉化作用。在0℃以下，霉化现象呈不活动状态。

低温和臭氧：在较低温度下，臭氧影响减小。但随着温度降低，臭氧浓度增大。

低温和冲击振动：低温会强化冲击振动的影响，但这只是在温度很低时的一种考虑。

低温和爆炸性空气：低温对爆炸性空气影响极小。但它对作为一种重要因素的空气与水蒸气比则有影响。

湿度和霉化：湿度有助于霉化和微生物的生长，但对它们的影响无促进作用。

湿度和低压：湿度可以增大低压的影响，特别是对电子或电气设备。影响程度取决于温度。

湿度和盐雾：高湿度可以冲淡盐雾浓度，但它对盐的侵蚀作用没有影响。

湿度和振动：将增大电气材料的分解速度。

湿度和砂尘：砂尘对水有自然的附着性，因而这种综合可增大磨蚀作用。

湿度和太阳辐射：湿度可以增大太阳辐射对有机材料的侵蚀作用。

低压和振动：对所有设备都会起强化影响的作用，电子和电气设备尤其明显。

低压和加速度：伴随高温环境，这种综合才有重要性。

盐雾和砂尘：这种综合可增大磨蚀作用。

盐雾和振动：会增大电气材料的分解速度。

砂尘和振动：振动可能增大砂尘的磨蚀效应。

加速度和振动：在高温和低气压下，这种综合会增大各种影响。

综上所述，从广泛的意义上讲，处于不工作状态的电子设备要承受和工作状态相似的各种环境应力。不同的是，不工作的电子设备不承受工作应力以及工作应力和环境应力的联合作用(定期通电测试除外)。

不工作电子设备最重要的失效原因，可能是各种环境因素造成的腐蚀。潮湿、高温、盐雾、电化学反应、各种污染性杂质等等，都可能造成腐蚀。腐蚀的速率决定于这些环境因素的强弱。例如，相对湿度大于60%常常可以引起材料腐蚀速率的显著增加。热应力可能使材料发生裂缝，污染性杂质乘虚而入。

在整个国民经济中，由于腐蚀造成的损失是巨大的。据美国国家标准局前几年的调查，腐蚀引起的损失占当年国民生产总值的4%，比当年水灾、风灾、火灾、雷击和地震等自然灾害所造成的损失总和还要多。我国若按1992

年国民生产总值的4%计算,则腐蚀的损失达到近1000亿元,何等惊人!其中,包括许多电子设备的腐蚀损失。可见,电子设备的设计、监造、生产、使用、管理人员,不仅要重视工作可靠性,而且要重视不工作可靠性。从设计、工艺、检验、包装、保管各方面尽量减少不工作失效的可能性。

1.2 电子元器件不工作失效机理

不同类型电子器件的结构、材料、工艺和封装方式不同,其失效机理和加速失效的环境应力亦不相同。本节分析各类器件的具体情况。由于微型电路应用很广,结构工艺复杂,本节以此为重点。

1.2.1 微型电路不工作失效机理

微型电路有两种基本类型:单片集成电路和混合集成电路。在单片集成电路中,全部电路元件包括有源和无源的,都是同时在一个硅片上用扩散平面工艺形成的。在硅片氧化的上表面蒸发淀积上金属线条,把电路元件相互连接以形成需要的电子电路。混合集成电路是在某些绝缘材料诸如陶瓷板、微晶玻璃片等基板表面上,直接形成无源电路元件和金属互连线,然后以分立芯片的形式加进有源半导体器件和微型无源元件,最后制成微型电路。

结构工艺简介

工艺中隐藏的缺陷,在环境应力的作用下会加速失效过程。因此,有必要以硅单片集成电路为例,简要说明其结构和工艺过程。

图1.2.1-1表示含1000个集成电路(每个集成电路包含100个元器件)的硅片详图。

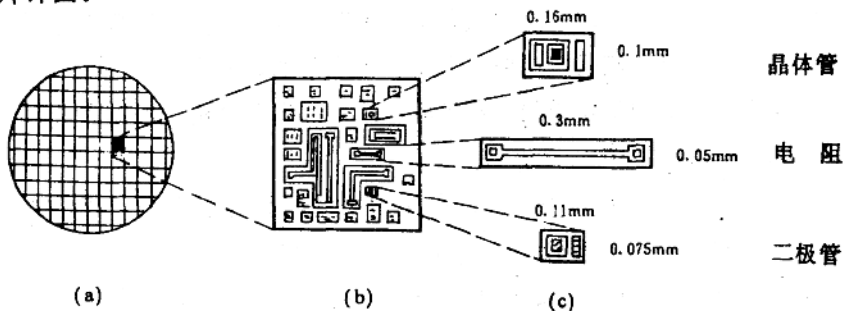


图1.2.1-1 典型的集成电路详图^[3]

分图(a)表示一个集成电路基片,例如直径为50mm的硅片。它包含1000个相同的面积为 1.2mm^2 的集成电路芯片。分图(b)表示其中一个芯片的放大图,它包含100个电路元器件。分图(c)表示芯片中的晶体管、电阻、二极管等集成电路元器件的再放大图,并标有实际尺寸。

单独讲硅双极npn平面晶体管,其结构剖面示于图1.2.1—2。

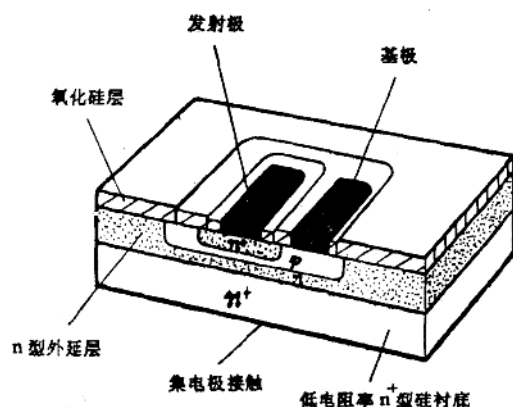


图1.2.1—2 基本的硅平面晶体管结构^[3]

在晶体管工作时,发射极—基极结是正向偏置,于是为低电阻;而集电极—基极结是反向偏置,于是为高电阻。靠加在发射结两端的低正向电压,电子通过发射结注入到基区。由于基区很薄,电子一旦到达基区,这些电子就会扩散到反向偏置的集电结的空间电荷内,此时,他们就被集电极的正电位吸引到集电极中,形成了高电阻集电极电路中的电流。这样我们靠低电压产生了电流,并且在高阻抗电路中流动,得到了功率放大。为了减少硅片下表面集电极连接处与集电结的内部串联电阻,晶体管结构一般制做在低电阻率硅片上的薄外延层中。

因此,如图1.2.1—2所示,在低电阻率的 n^+ 型硅衬底上,通过“外延生长”工艺制有一个叫做n型外延层的淀积层,厚度约为 $7.5\mu\text{m}$ 。再上面是氧化硅层,厚度约为 $0.5-1.0\mu\text{m}$,它可以阻止杂质向硅中扩散。基极、发射极是通过光刻、扩散、蒸镀铝等工序制成的。