



普通高校“十一五”规划教材

付桂翠 陈 颖 张素娟 编著
高 成 孙宇锋

电子元器件可靠性 技术教程

 北京航空航天大学出版社



普通高校“十一五”规划教材

电子元器件可靠性 技术教程

付桂翠 陈颖 张素娟 编著
高成 孙宇锋

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是高等工科院校“质量与可靠性”专业本科生教材,主要围绕元器件可靠性技术这一主题,针对元器件的固有可靠性和使用可靠性的保证技术进行了分类介绍。在固有可靠性保证中主要介绍了元器件的制造工艺、封装技术、失效机理、可靠性试验技术等。在使用可靠性保证中主要介绍了元器件选用控制、使用设计方法、静电防护、可靠性筛选、破坏性物理分析及失效分析技术等。本书在编写过程中强调了理论与工程实践相结合,不仅具有系统的技术性,还具有较强的工程实用性,并对一些前沿的元器件可靠性技术,如 MEMS 器件的可靠性现状及失效机理等进行了简要介绍。

本书也可供大专院校其他专业本科生、研究生使用及工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子元器件可靠性技术教程 / 付桂翠等编著. —北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. 7
ISBN 978-7-5124-0136-5

I. ①电… II. ①付… III. ①电子元件—可靠性—高等学校—教材 IV. ①TN60

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 123899 号

版权所有,侵权必究。

电子元器件可靠性技术教程

付桂翠 陈 颖 张素娟 编著
高 成 孙宇锋
责任编辑 李 青 李徐心 李 玉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:18 字数:403 千字

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-0136-5 定价:35.00 元

前 言

可靠性技术是研究产品全寿命过程中故障的发生、发展规律,达到预防故障,消灭故障,提高产品效能的一门工程技术。它兴起于 20 世纪 50 年代,60 年代得到全面而迅速的发展并进入国防领域。目前可靠性技术的研究已从航空、航天、兵器、舰船和核等国防领域逐渐渗透到通信、交通运输、电力、石油和化工等民用行业。

随着现代化武器装备、通信系统、交通设施、工业自动化系统以及空间技术所使用的电子设备日趋复杂,所使用的环境条件愈加恶劣,装置密度不断增加,对电子产品的可靠性也提出了更高的要求。电子元器件(以下简称元器件)是电子设备的基本单元,其可靠性的高低直接影响电子设备可靠性的高低,因此如何提高元器件的可靠性,设计出可靠性高的电子产品,是当前急需解决的问题。

元器件的可靠性由固有可靠性和使用可靠性组成。其中固有可靠性由元器件的生产单位在元器件的设计、工艺和原材料的选用等过程中的质量控制所决定,而使用可靠性则主要由元器件使用方对元器件的选择、采购、使用设计、静电防护和筛选等过程的质量控制所决定。大量的失效分析数据表明,由于固有缺陷导致的元器件失效与使用不当造成的元器件失效各占 50% 左右,因此,在保证元器件固有可靠性的同时,必须高度重视元器件的使用可靠性的保证。

本书共分为 10 章,围绕元器件可靠性技术这一主题,针对元器件的固有可靠性和使用可靠性技术进行了分类介绍。在固有可靠性中主要介绍了元器件的制造工艺、封装技术、失效机理和可靠性试验技术等。在使用可靠性中主要介绍了元器件的选用控制、使用设计方法、静电防护、可靠性筛选、破坏性物理分析及失效分析技术等。本书在编写过程中强调了理论与工程实践相结合,不仅具有系统的技术性,还具有较强的工程实用性,并对一些前沿的元器件可靠性技术,如 MEMS 器件的可靠性现状及失效机理等进行了简要介绍。

参加本书编写工作的有:陈颖(第1~3章),高成(第4章),孙宇锋、张书农(第5章),付桂翠(第6章、7章、9章),张素娟(第8章、10章)。全书由付桂翠主编,戴慈庄教授对全书进行了审阅并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

本书可供大专院校本科生及研究生使用,也可供工程技术人员学习和参考。由于水平有限,书中存在的不足之处,希望广大读者批评指正。

作 者

2010年6月

目 录

第 1 章 元器件的分类	1
1.1 现代元器件的发展里程碑	1
1.1.1 第一个半导体晶体管的诞生	1
1.1.2 集成电路的发明和商业化	1
1.2 元器件的分类与功能	2
1.2.1 电气元件	3
1.2.2 机电元件	7
1.2.3 电子器件	9
1.2.4 其他元器件	16
1.3 MEMS 器件	17
1.3.1 MEMS 压力与惯性器件	17
1.3.2 微流体器件	19
1.3.3 微光机电系统	19
1.3.4 生物 MEMS 器件	20
1.3.5 射频 MEMS 器件	21
1.3.6 MEMS 器件的主要失效机理	21
本章小结	22
习 题	22
第 2 章 元器件制造技术	23
2.1 半导体集成电路芯片制造技术	23
2.1.1 发展里程碑	23
2.1.2 基本工艺	23
2.1.3 器件工艺	28
2.1.4 芯片加工中的缺陷和成品率预测	33
2.2 混合集成电路工艺	33
2.2.1 厚膜工艺	34
2.2.2 薄膜工艺	35
2.2.3 混合集成电路的失效	35
2.3 微机械加工技术	35

2.3.1 体硅加工	36
2.3.2 表面微加工	36
2.3.3 LIGA 工艺	37
2.4 纳米尺度制造	38
本章小结	39
习 题	40
第 3 章 微电子的封装技术	41
3.1 微电子封装概述	41
3.1.1 封装的作用	41
3.1.2 封装发展历程	41
3.1.3 微电子封装的分级	43
3.1.4 封装的分类	43
3.2 器件级封装工艺	45
3.2.1 典型工艺流程	45
3.2.2 芯片互连方法	47
3.3 器件级封装的分类及其特点	50
3.3.1 插装型封装	50
3.3.2 表面安装型封装	51
3.3.3 多芯片组件	53
3.4 封装技术的发展及应用	55
3.4.1 3D 封装	55
3.4.2 系统封装	56
3.4.3 MEMS 封装	56
3.5 微电子的失效机理	56
3.5.1 热/机械失效	57
3.5.2 电致失效	60
3.5.3 电化学失效	63
本章小结	65
习 题	65
第 4 章 元器件可靠性试验与评价技术	67
4.1 元器件可靠性试验	67
4.1.1 元器件可靠性试验的定义	67
4.1.2 元器件可靠性试验的分类	67
4.1.3 元器件可靠性试验方法的国内外标准	69

4.2 元器件可靠性基础试验	70
4.2.1 元器件可靠性基础试验的定义	70
4.2.2 可靠性基础试验的分类	71
4.2.3 气候环境应力试验	74
4.2.4 机械环境应力试验	78
4.2.5 与封装有关的试验	80
4.2.6 与密封有关的试验	82
4.2.7 老炼试验	83
4.2.8 与外引线有关的试验	85
4.2.9 特殊试验	86
4.2.10 与标识有关的试验	90
4.2.11 与辐射有关的试验	90
4.2.12 塑封器件特殊的可靠性基础试验	91
4.3 元器件可靠性寿命试验	92
4.3.1 寿命试验的定义和分类	92
4.3.2 指数分布寿命试验方案的确定	93
4.3.3 寿命试验中的一些技术问题	96
4.4 元器件加速寿命试验	98
4.4.1 加速寿命试验的定义	98
4.4.2 加速寿命试验的分类	99
4.4.3 加速寿命试验的理论依据	100
4.4.4 恒定应力加速寿命试验方案的设计与实施	103
4.4.5 加速寿命试验的数据处理	106
4.4.6 加速寿命试验举例	108
4.5 元器件可靠性试验的设计	114
4.6 现代元器件可靠性评价技术	116
4.6.1 现代元器件可靠性评价技术的发展	116
4.6.2 晶片级可靠性评价技术	117
4.6.3 微电子测试结构可靠性评价技术	118
4.6.4 结构工艺质量认证可靠性评价技术	118
4.6.5 敏感参数可靠性评价技术	118
4.7 计算机辅助集成电路可靠性评价技术	119
4.7.1 计算机辅助集成电路可靠性评价技术概述	119
4.7.2 计算机辅助集成电路可靠性评价系统的构成	120

4.7.3	电迁移失效计算机模拟技术	121
4.7.4	热载流子退化计算机模拟技术	123
4.7.5	氧化层击穿失效计算机模拟技术	124
本章小结		125
习 题		125
第 5 章 元器件的使用可靠性控制		126
5.1	元器件可靠性与质量的概念	126
5.1.1	元器件的可靠性	126
5.1.2	元器件的失效率	126
5.1.3	元器件质量与质量等级	127
5.2	元器件的使用质量管理	130
5.2.1	元器件的使用质量管理流程	130
5.2.2	元器件选择	132
5.2.3	元器件采购	132
5.2.4	元器件监制	133
5.2.5	元器件验收	133
5.2.6	元器件二次筛选	134
5.2.7	元器件破坏性物理分析(DPA)	134
5.2.8	元器件失效分析	135
5.2.9	元器件使用	135
5.2.10	元器件电装与调试	136
5.2.11	元器件储存保管和超期复验	136
5.2.12	元器件发放	136
5.2.13	失效或不合格元器件处理	137
5.2.14	元器件评审	137
5.2.15	元器件质量信息管理	137
5.3	元器件选用分析评价及其控制要求	138
5.3.1	元器件选用与分析评价过程	138
5.3.2	元器件优选目录制定和使用	140
5.3.3	军用产品元器件的选择	141
5.3.4	军用元器件选用的控制要求	143
5.4	军用元器件质量保证及其标准	145
5.4.1	军用元器件质量保证概述	145
5.4.2	军用元器件可靠性和质量保证有关标准	147

本章小结	151
习 题	151
第 6 章 元器件的降额设计	152
6.1 降额设计的定义与目的	152
6.2 降额设计的工作内容与基本原则	153
6.2.1 降额设计的工作内容	153
6.2.2 降额设计的基本原则	158
6.3 降额设计的工作过程	159
6.3.1 确定降额准则	159
6.3.2 确定降额等级	159
6.3.3 确定降额参数及多项参数的降额考虑	160
6.3.4 确定降额因子	161
6.3.5 降额计算及分析	161
6.4 降额设计中元器件结温的计算	162
6.4.1 通过热阻计算结温	162
6.4.2 结温的近似计算	163
6.5 降额设计示例	164
6.5.1 模拟电路(运算放大器)降额设计示例	164
6.5.2 电阻器降额设计示例	165
6.5.3 电容器降额设计示例	166
本章小结	166
习 题	167
第 7 章 热设计与热分析	168
7.1 热设计的目的与作用	168
7.2 温度对元器件可靠性的影响	168
7.3 热设计理论基础	169
7.3.1 传热的基本原则	169
7.3.2 传热的基本定律	169
7.3.3 热阻及热阻网络	170
7.3.4 热电模拟	170
7.4 元器件的热匹配设计	171
7.4.1 热不匹配应力的产生	171
7.4.2 热匹配设计的内容	172
7.5 元器件使用中的热设计	173



7.5.1	元器件的自然冷却设计	173
7.5.2	元器件的强迫空气冷却设计	174
7.5.3	元器件的液体冷却设计	174
7.5.4	元器件的安装与布局	175
7.5.5	元器件在印制板上的安装与布局	176
7.5.6	减小元器件热应变的安装方法	176
7.5.7	元器件的热屏蔽与热隔离	177
7.6	功率器件的热设计	178
7.6.1	功率器件热性能的主要参数	178
7.6.2	功率器件的热设计方法	179
7.6.3	功率器件散热系统传热分析	179
7.6.4	散热器的选择与应用	181
7.7	热分析	184
7.7.1	热分析的目的	184
7.7.2	热分析方法	184
7.7.3	热分析步骤及注意事项	186
7.7.4	热分析示例	187
本章小结		191
习 题		191
第 8 章 静电放电损伤及防护		192
8.1	静电的产生	192
8.1.1	摩擦产生静电	192
8.1.2	感应产生静电	193
8.2	静电源	193
8.2.1	人体静电	193
8.2.2	尘埃静电	194
8.3	静电放电模型	195
8.3.1	人体静电放电模型(HBM)	195
8.3.2	带电器件放电模型(CDM)	195
8.3.3	电场感应放电模型(FIM)	196
8.4	半导体器件对静电放电的敏感度	196
8.5	静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理	198
8.5.1	静电放电对元器件损伤的特点	198
8.5.2	静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理	199

8.6 静电防护	200
8.6.1 器件生产设计中的防静电措施	200
8.6.2 使用中的防静电措施	201
本章小结	203
习 题	203
第9章 可靠性筛选	204
9.1 可靠性筛选的定义与目的	204
9.2 可靠性筛选的特点	205
9.3 可靠性筛选的分类	205
9.4 筛选方法的确定	206
9.4.1 筛选项目的确定	206
9.4.2 筛选应力强度的确定	208
9.4.3 筛选时间的确定	209
9.5 筛选方案的设计	210
9.6 筛选效果的评价	211
9.7 特殊使用条件下的筛选	213
9.7.1 二次筛选	213
9.7.2 升级筛选	216
本章小结	220
习 题	220
第10章 破坏性物理分析与失效分析	221
10.1 破坏性物理分析	221
10.1.1 破坏性物理分析的定义	221
10.1.2 破坏性物理分析的目的	221
10.1.3 国内外开展破坏性物理分析的情况	222
10.1.4 破坏性物理分析的工作适用范围及时机	223
10.1.5 破坏性物理分析的工作方法和程序	223
10.1.6 破坏性物理分析试验项目的裁剪	227
10.1.7 破坏性物理分析的结论和不合格处理	228
10.1.8 破坏性物理分析工作实例	229
10.2 失效分析	230
10.2.1 失效分析的目的和作用	230
10.2.2 失效分析的基本原则	231
10.2.3 失效分析工作的基本内容	233

10.2.4	元器件的主要失效模式和失效机理·····	234
10.2.5	元器件失效分析的基本实施程序·····	237
10.2.6	半导体集成电路失效分析程序·····	243
10.2.7	电容器的失效分析程序·····	244
10.2.8	失效分析常用设备·····	245
10.2.9	失效分析实例·····	246
10.3	破坏性物理分析与失效分析的比较·····	249
	本章小结·····	250
	习 题·····	250
附录 A	电阻器与电位器的分类代号及意义·····	251
附录 B	电容器的分类代号及意义·····	252
附录 C	国产半导体分立器件的型号命名·····	253
附录 D	JM88SC1616 型加密存储器电路鉴定检验 A 组电测试项目·····	254
附录 E	JM88SC1616 型加密存储器电路鉴定检验 B 组物理性能试验项目·····	256
附录 F	JM88SC1616 型加密存储器电路鉴定检验 C 组鉴定检验项目·····	258
附录 G	JM88SC1616 型加密存储器电路鉴定检验 D 组鉴定检验项目·····	259
附录 H	JM88SC1616 型加密存储器电路鉴定检验 E 组(辐射强度保证试验)鉴定 检验项目·····	262
附录 I	国产元器件降额参数、降额等级及降额因子·····	263
附录 J	各类元器件破坏性物理分析(DPA)试验项目·····	268
	参考文献·····	271

第 1 章 元器件的分类

1.1 现代元器件的发展里程碑

1.1.1 第一个半导体晶体管的诞生

1906 年,美国物理学家,“电子管之父”Lee De Forest 发明了真空三极管。利用这种新的元件,电路能够实现放大、振荡和开关等功能。真空三极管的发明,使电子管成为实用的器件。电子管能够放大音乐和语音,它使长途通话在 20 世纪上半叶成为现实。但电子管功耗大,产生的热量过多,且极易烧坏。真空电子管技术的最高成就是 1946 年诞生的第一台电子计算机 ENIAC(电子数字集成器和计算器),其中采用了大约 18 000 只电子管,占地面积 170 多平方米,质量约 30 吨,功率 25 kW。这台机器每隔两天发生一次故障。数字技术的来临把电子管逼到了极限,人们需要发热量低、消耗功率小、可靠性高的新型有源器件。

1947 年 12 月 16 日,William Shockley、John Bardeen 和 Walter Brattain 成功地在贝尔实验室制造出第一个晶体管,如图 1-1 所示,这使三人获得了 1956 年的诺贝尔物理学奖。1950 年,William Shockley 又开发出双极晶体管,这是现在通行的标准晶体管。1954 年 5 月 24 日,贝尔实验室使用 800 只晶体管组装了世界上第一台晶体管计算机 TRADIC (Transistorized Airborne Digital Computer),功率仅为 100 W,占地 3 立方英尺。

半导体晶体管的发明奠定了现代半导体和电子工业的基石。贝尔实验室总裁 Ian M. Ross 在评价晶体管的发明时提到,晶体管“使我们的社会发生了伟大变革,这场变革的深远意义不亚于钢铁的发现、蒸汽机的发明以及英国工业革命。”

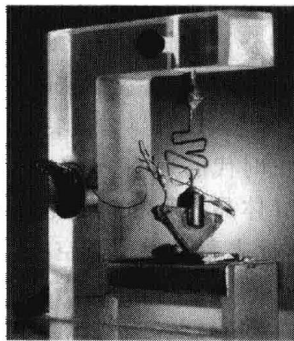


图 1-1 世界上第一个半导体晶体管

1.1.2 集成电路的发明和商业化

晶体管发明后,工程师们开始尝试设计高速计算机,但由晶体管组装的电子设备还是太笨重了,设计的电路需要几英里长的线路还有上百万个的焊点。新的电子设备要求规格更小的晶体管,即集成电路。



图 1-2 世界上第一块集成电路

1952 年 5 月,英国科学家 G. W. A. Dummer 第一次提出了集成电路的设想,但没有成功。1958 年 9 月 12 日,德州仪器公司的 Jack Kilby 研制出世界上第一块集成电路,如图 1-2 所示。它是一个具有 5 个集成元件的简单振荡电路,电路中的晶体管、二极管、电阻器和电容器等全部制造在同一个硅片上,从此集成电路取代了晶体管,并大幅度降低了成本,使微处理器的出现成为了可能,同时开创了电子技术历史的新纪元。Kilby 获得了

2000 年的诺贝尔物理奖。

1959 年 7 月,仙童半导体公司的 Robert Noyce 研究出了二氧化硅的扩散技术和 PN 结的隔离技术,并创造性地在氧化膜上制作出铝条连线,使元件和导线合成一体,从而为半导体集成电路的平面制作工艺,也为工业大批量生产奠定了坚实的基础。与 Kilby 在锗晶片上研制集成电路不同,Noyce 把眼光直接盯住硅这一地球上含量最丰富的元素之一,商业化价值更高,成本更低,半导体产业由“发明时代”进入了“商用时代”。

1961 年,仙童半导体公司和德州仪器公司共同推出了第一颗商用集成电路。1965 年,仙童半导体公司的研发主管 Gordon Moore 指出:微处理器芯片的电路密度,以及它潜在的计算能力,每隔一年翻番。后来,这一表述又修正为每 18 个月翻番。这也就是后来闻名于 IT 界的“摩尔定律”。1971 年,英特尔公司推出了世界上的第一块商用化的 4 位微处理器,标志着电子计算机时代的来临。

半导体晶体管和集成电路的发明是元器件发展的重要里程碑,为现代电子带来了革命性的发展,标志着人类由真空电子时代向半导体时代、由模拟电子向数字信息时代的跨越。

1.2 元器件的分类与功能

元器件是电路的组成单元,在不同标准中有不同的定义。欧洲空间局 ESA 标准中对元器件的定义为:“完成某一电子、电气或机电功能,并由一个或几个部分构成而且一般不能被分解或不会破坏的某个装置。”GJB4027—2000《军用电子元器件破坏性物理分析方法》将元器件定义为:“在电子线路或电子设备中执行电气、电子、电磁、机电或光电功能的基本单元。该基本单元可由一个或多个零件组成,通常不破坏是不能将其分解的。”随着元器件技术的发展,其定义和内涵发生了很大的变化,品种逐渐覆盖光、机、电等各个方面。

元器件可分为元件和器件两大类。元件又细分为电气元件和机电元件。元件指在工厂生

产加工时不改变分子成分的成品,如电阻器、电容器和电感器。它们本身不产生电子,对电压、电流无控制和变换作用。器件指在工厂生产加工时改变了分子结构的成品,如晶体管、电子管和集成电路。它们本身能产生电子,对电压和电流有控制、变换作用(如放大、开关、整流、检波、振荡和调制等),又称电子器件。电子器件包括半导体分立器件、集成电路、真空电子器件和光电子器件等;另外,将电声器件和电池等归为其他元器件类。图1-3为根据2007年版的《军用电子元器件合格产品目录》整理的元器件分类总图。

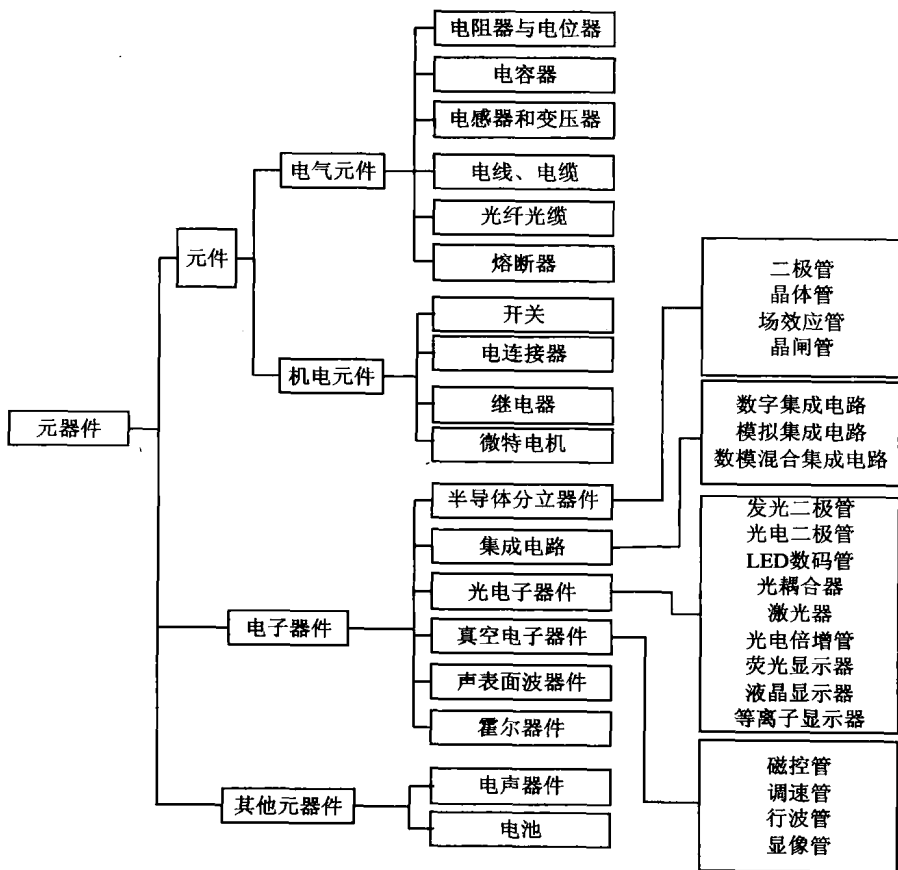


图1-3 元器件分类总图

1.2.1 电气元件

电气元件包括电阻器、电位器、电容器、电感器、变压器、电线电缆、光纤光缆和熔断器等。

1.2.1.1 电阻器及电位器

电阻器是所有电子电路中使用最多的元件,它阻碍电流流通,对远距离输电不利,但在电

子领域内,电阻器能对电能进行吸收,故在电路中通常起限流、降压和分压的作用,对信号来说,交流与直流信号都可以通过电阻器。电阻器的种类众多,电阻体使用的材料不同,制作工艺也不同,特性各异。电阻器按照材料可分为金属膜电阻器、氧化膜电阻器、合成膜电阻器、釉膜电阻器和玻璃釉电阻器等类型。图 1-4 为常见的固定电阻器。

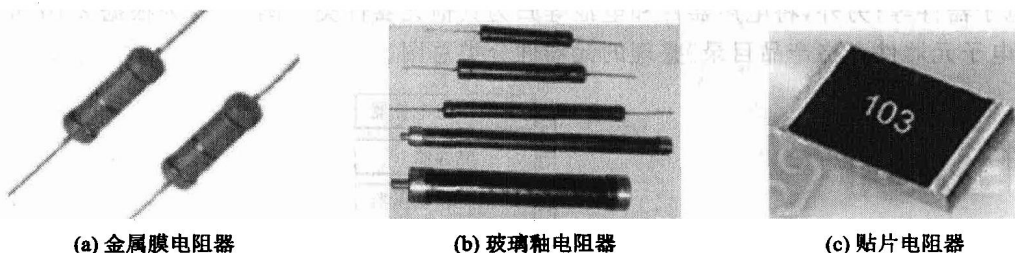


图 1-4 常见的固定电阻器

国家标准 GB7159—87 中电阻器的命名包括 5 部分,见附录 A。电阻器的阻值标法有直接标注法、文字符号法和色环标注法。色环标注法比较常见,但对于比较小的电阻器,如手机电路中的电阻器,若标注则一般采用数字法,即用三位数字表示标称值。电阻值的数字从左到右,第一和第二位为有效值,第三位为指数,即零的个数,单位为 Ω 。例如,101 表示 $100\ \Omega$ 的电阻,102 表示 $1\ \text{k}\Omega$ 的电阻,103 表示 $10\ \text{k}\Omega$ 的电阻,以此类推。如果一个电阻上标 223,则这个电阻为 $22\ \text{k}\Omega$ 。

特殊电阻器是指其阻值随温度、光通、电压、机械力、湿度、磁通和气体等外界因素变化的电阻器。特殊电阻器可把非电量转换为电量,同时也在电路中也具有一定的功能。特殊电阻器包括熔断电阻器和敏感电阻器。熔断电阻器又称为保险丝电阻器,超过其额定功率,可以熔断,使电路开路,从而保护贵重元器件,防止故障扩大。敏感电阻器又称为半导体电阻器,常见的有热敏、磁敏、气敏和力敏等电阻器。敏感电阻器用途广泛,如热敏电阻器可用于航天中的卫星姿态控制、辐射能的探测和各种测温、控温;光敏电阻器可用于自动控制设备;压敏电阻器可用于电路保护,它能稳定地工作在数万伏电压状态下。

电阻器是应用最为广泛的元件,也是所有电子元器件中最为可靠的元件之一。电阻器的失效模式有开路、机械损伤、接点损坏、短路、绝缘击穿以及由于导电材料与基体、骨架和保护层等绝缘材料的问题,或焊接点随时间老化而造成的电阻值漂移量超过容差。

接触式电位器是靠电刷在电阻体上的滑动来取得电阻的变化,并在加电压时,取得与电刷位移成一定关系的输出电压的元件。它实际上是连续可调的电阻器,在电路中可实现信号或电量控制等作用。常见电位器有绕线电位器、双联电位器、微调电位器和直滑电位器等,如图 1-5 所示。

以绕线电位器为例,其主要失效模式有:接触不良、滑动噪声大、开路、机械损伤和阻值超差等。其中开路是电位器经常发生的一种典型失效模式,产生的原因主要是电刷接触不良(压