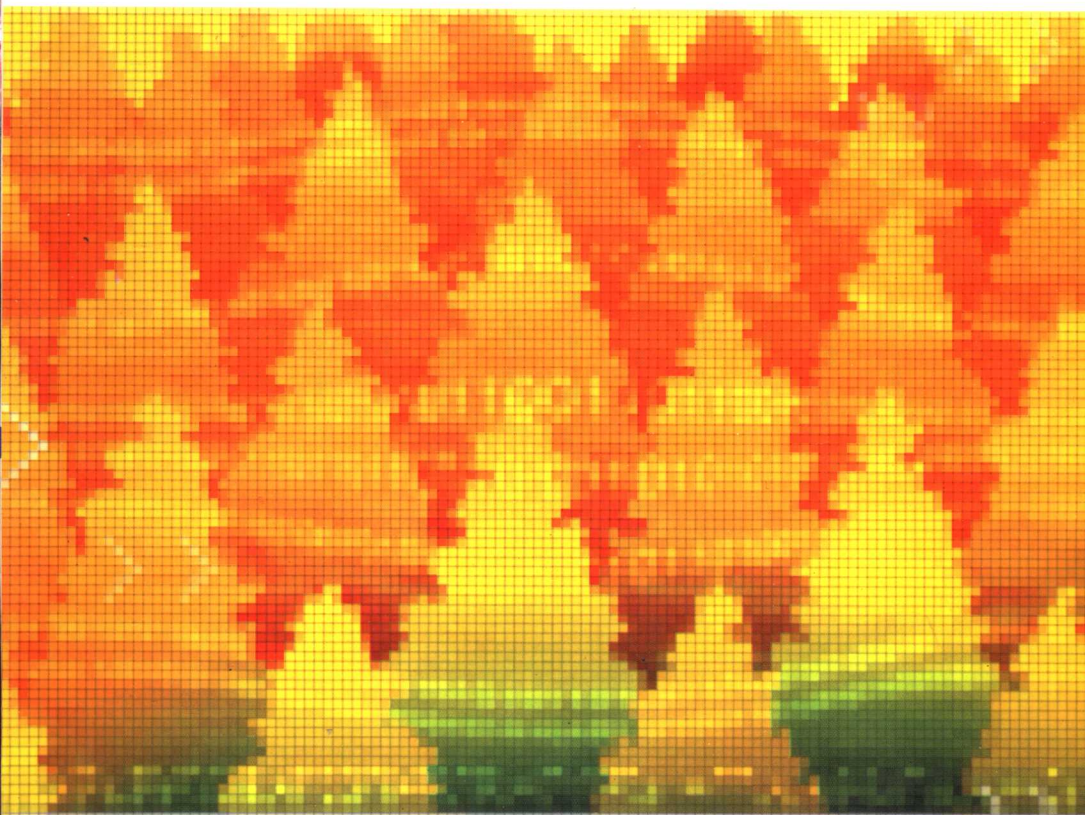


图解 半导体基础

〔日〕水野文夫 鹰野致和 著
彭 军 译



TN3-64
145
12

图解半导体基础

〔日〕水野文夫 鷹野致和 著
彭 军 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2006-5331 号

内 容 简 介

本书是半导体器件和半导体技术入门书,内容包括半导体的基本知识、各种半导体器件及集成电路,此外还以较大篇幅介绍集成电路制造技术及其技术要素。这些知识不仅是半导体技术的基础,而且对于以 MEMS 为代表的超精密技术也是非常重要的。

本书深入浅出、图文并茂的叙述方式,有助于初学者进一步理解集成电路技术。本书给出的丰富信息量和对先进技术发展动向的分析,也有利于集成电路产业的管理和技术人员的知识更新。

本书可以作为微电子技术及相近专业本科生的教学参考书,亦可作为从事半导体、集成电路产业的管理、技术人员的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

图解半导体基础/(日)水野文夫,鹰野致和著;彭军译. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018589-1

I. 图… II. ①水… ②鹰… ③彭… III. 半导体技术-图解
IV. TN3-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021266 号

责任编辑:岳亚东 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 祥

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 3 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2007 年 3 月第一次印刷 印张: 6 1/2

印数: 1—5 000 字数: 181 000

定 价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

Original Japanese language edition

Naruhodo nattoku! Handotai ga Wakaru Hon

By Fumio Mizuno and Munekazu Takano

Copyright © 2006 by Fumio Mizuno and Munekazu Takano

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2006

All rights reserved

なるほどナットク！

半導体がわかる本

水野文夫 鷹野致和 オーム社 2006

著者简介

水野文夫

明星大学理工学部电工电子系统工学主任、教授、工学博士、工程师(电工电子)

名古屋大学研究生院电子工程专业毕业。曾就职于(株)日立制作所,2001年至今在明星大学任教授

专业领域:半导体及纳米技术等

鷹野致和

明星大学理工学部长、教授、工学博士(东大物理工学)、Dr. HC(BUT, C_E)

横浜国大电气工程专业毕业。曾就职于经产省产总研(旧电总研)、京セウ中央研究所,自1996年起任明星大学教授。在此期间任华盛顿大学 Research Associate, NEDO 新功能元件研究协会研发部长, ICNF-IAC, 日本起伏现象研究会代表干事, 山梨大学客座讲师

专业领域:半导体器件等

主要著作

《ゆらぎの科学と技術》(合著, 2004, 东北大学出版社)

《ゆらぎの科学 9》(合著, 1999, 森北出版)

前言

半导体器件支撑着当今世界的信息技术 (Information Technology, IT), 给我们带来了一个高度文明的信息无处不在 (ubiquitous) 的世界。并且, 半导体技术还是超精密技术的基础。超精密技术则是“关系到以技术立国的日本能否持续发展”的关键技术, 美国等先进国家正在全力以赴地进行研究和开发超精密技术。在日本, 也将其作为与信息通信、生命科学、环境和能源同等重要的技术投入巨大的力量去研究和开发。

尽管半导体器件和半导体技术如此重要, 然而, 日本半导体产业的竞争力及技术能力却正在迅速下降。为了恢复日本在该领域世界第一的地位, 必须使更多的青年人关注半导体产业并增强对半导体的兴趣。如果本书能为吸引更多的人关心半导体产业而作出微薄的贡献, 那么本人甚感荣幸。

本书是半导体器件和半导体技术的入门书。这并不是说内容仅局限于入门知识, 而是在叙述上尽可能采取浅显易懂方式的意思。即使对于专门从事半导体行业的人来说, 阅读本书也具有整理知识体系、开拓思路的作用。特别是, 由于半导体工艺是超精密技术的基础, 因此在这方面的内容占了比较大的篇幅, 非常值得一读。

本书第 3 章有关化合物半导体的内容由对化合物半导体造诣很深的鹰野先生撰写, 其余部分由水野先生执笔。

最后, 对在插图方面给予大力协助的中西隆浩先生以及给予作者支持鼓励的欧姆出版株式会社的各位编辑表示感谢。

作者代表 水野文夫

2006 年 5 月

目 录

1	半导体是信息社会的支柱	1
1.1	IT 时代是信息无处不在的时代	2
1.2	支撑信息无处不在世界的“基石”——半导体器件 ...	3
1.3	半导体器件是控制信息和能量流的“大脑”与“心脏” ...	5
1.4	构成电路的有源元件和无源元件	7
1.5	典型的有源元件：晶体管	8
1.6	半导体器件	10
2	半导体	13
2.1	何谓半导体	14
2.2	半导体中的载流子	15
2.3	半导体的秘密在于能带的带隙	17
2.4	窄带隙的半导体	18
2.5	微量杂质的重要作用	20
2.6	N 型半导体与 P 型半导体	22
2.7	半导体的分类	24
2.8	半导体的主角是单晶硅	26
2.9	硅晶片的制造过程	27
2.10	硅片的演化	29
3	半导体器件	31
3.1	半导体器件的基本结构：PN 结与 MOS 结构	32

3.2	PN 结的工作原理	33
3.3	MOS 结构的工作原理	35
3.4	二极管和晶体管的结构	37
3.5	二极管的功能 (一)	38
3.6	二极管的功能 (二)	40
3.7	双极型晶体管的功能 (一)	42
3.8	双极型晶体管的功能 (二)	43
3.9	MOS FET 的功能 (一)	45
3.10	MOS FET 的功能 (二)	47
3.11	CMOS 是 IT 进步和发展的主角	48
3.12	CMOS 的优势是低功耗	50
3.13	IT 技术的关键器件: 化合物半导体	51
3.14	发光的半导体	53
3.15	高频和传感器半导体	55
3.16	半导体器件的各种现象和效应 (一)	56
3.17	半导体器件的各种现象和效应 (二)	58
	【篇外话】 关于单位	60

4 IC 的种类 61

4.1	半导体器件的发展方向	62
4.2	开发半导体器件的指导原理: 比例缩小法则	63
4.3	IC 的种类	65
4.4	数字 IC 的种类	67
4.5	RAM	68
4.6	PROM	70
4.7	通用 IC	72
4.8	ASIC	74
4.9	SOC	75
	【篇外话】 通过单位理解物理现象	77

5	IC 构造	79
5.1	IC 构造	80
5.2	管壳的内部(一)	81
5.3	管壳的内部(二)	83
5.4	封装举例——IC 卡	85
	【篇外话】 术语的含义	87
6	IC 的设计与制造	89
6.1	IC 的制造流程	90
6.2	IC 制造的成品率(一)	91
6.3	IC 制造的成品率(二)	93
6.4	IC 的设计(一)	95
6.5	IC 的设计(二)	97
6.6	掩模的制作(一)	98
6.7	掩模的制作(二)	100
6.8	掩模的制作(三)	102
6.9	晶片的加工(晶片工艺)	103
6.10	安装(一)	105
6.11	安装(二)	107
6.12	测试(一)	108
6.13	测试(二)	110
6.14	工厂(超净室)与制造装置(一)	112
6.15	工厂(超净室)与制造装置(二)	114
	【篇外话】 量子世界	115
7	晶片加工的主要技术	117
7.1	晶片的清洗(一)	118
7.2	晶片的清洗(二)	119
7.3	化学的湿法清洗(一)	121

7.4	化学的湿法清洗(二)	123
7.5	湿法清洗的要点:干燥	124
7.6	清洗的顺序与效果	126
7.7	干法清洗	128
7.8	薄膜的形成	129
7.9	CVD	131
7.10	等离子体(一)	133
7.11	等离子体(二)	135
7.12	等离子体(三)	136
7.13	PVD	138
7.14	热氧化	140
7.15	电镀与旋转涂覆	141
7.16	掺杂与热处理(一)	143
7.17	掺杂与热处理(二)	145
7.18	光刻	147
7.19	光刻胶	148
7.20	光刻的分辨率	150
7.21	光刻的焦深	152
7.22	光刻的超分辨率技术	153
7.23	光刻的超分辨率技术:照明的干涉	155
7.24	光刻的超分辨率技术:照明的入射角	157
7.25	光刻的超分辨率技术:掩模	158
7.26	光刻的超分辨率技术:液浸棱镜	160
7.27	未来光刻的候选技术:压印	162
7.28	腐蚀(一)	163
7.29	腐蚀(二)	165
7.30	测试与产品质量检查(一)	167
7.31	测试与产品质量检查(二)	168
7.32	测试与产品质量检查(三)	170

8	未来的半导体技术	173
8.1	面临变革的半导体器件和半导体技术(一)	174
8.2	面临变革的半导体器件和半导体技术(二)	175
8.3	面临变革的半导体器件和半导体技术(三)	177
8.4	掌控日本发展之关键的半导体技术(一)	179
8.5	掌控日本发展之关键的半导体技术(二)	180
索 引		183

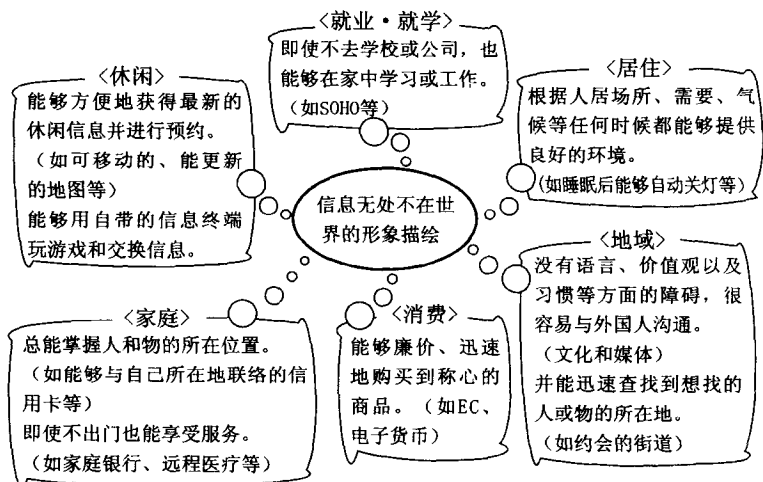
1

半导体是信息社会的支柱

1.1 IT 时代是信息无处不在的时代

当今世界,可以说进入了 IT 时代。信息对于掌握者而言,具有非常重要的意义。所谓信息量,就是以“由于掌握它而带来意外惊奇的程度”来表示的。信息给人们带来的有用价值,无疑要比“金钱和物质”的作用更大。

所谓无处不在(ubiquitous),在词典中的意思是“存在于任何所到之处”。什么东西无处不在呢?当然就是信息。“任何人不论在何时何地都能够安全地获得所需要的、可靠的信息”,“到处都有计算机的世界”,可以说就是“信息无处不在的世界”。世界各国都在不断地进行技术研究和开发,试图比其他国家更早地达到这个目标。信息无处不在的世界为什么值得人们期待?因为它能使人们的生活更安心、更安全、更健康、更丰富和更方便。图 1.1 描绘出信息无处不在世界的部分生活场景。对于像作者这样不习惯随意与外国人交流的人来说,更是期待着便携式自动翻译机的出现。不妨设

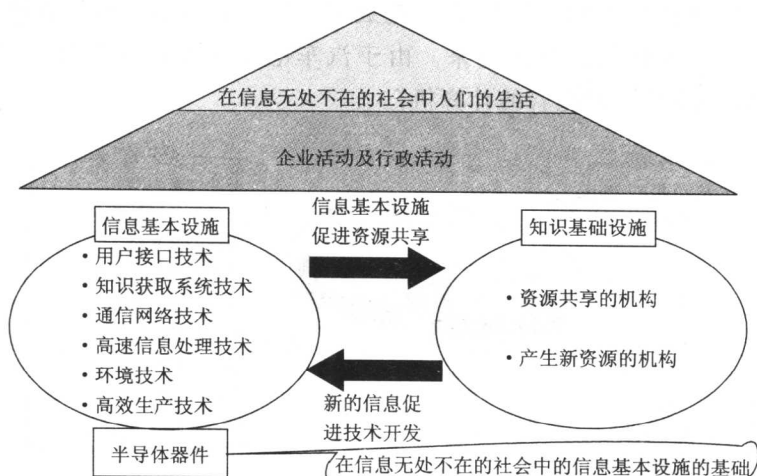


注:部分资料引用了(财团法人)机械系统振兴协会的关于半导体国际需求的调查报告书中的内容。

图 1.1 信息无处不在世界的形象描绘

想,没有了语言上的障碍,人们的交流将会变得更广泛、更深入,于是民族间、国家间的纷争也就减少了。

为了实现信息无处不在的生活,需要些什么呢?如图 1.2 所示,即必须开发和构筑“机器、装置、设备、系统”等信息基本设施以及“应用信息机构”之类的知识基础设施。首先,需要整备信息基本设施。对于构筑信息基本设施来说,不可缺少的要素就是半导体器件。



注:部分资料引用了(财团法人)机械系统振兴协会的关于半导体国际需求的调查研究报告书中的内容。

图 1.2 构筑信息基本设施的基础是半导体器件

1.2 支撑信息无处不在世界的“基石”—— 半导体器件

构筑信息无处不在世界的“基石”是半导体器件。如果没有半导体器件这块“基石”,别说构筑信息无处不在的世界,即使对于现在的文明社会来讲,也是会很快崩溃的。就拿现代人出行离不开的汽车来说,保障汽车可靠、安全、快速、舒适地运转的就是几十个称为超小型计算机的半导体器件。大众传媒大规模宣传的机器人

的眼、耳、触觉等都是由称为固态传感器的半导体器件构成的。小学生喜爱的游戏机、手机及计算机，它们的核心部件，也都是由最先进的半导体器件构成的。

图 1.3 示出汽车上使用的一些超小型计算机控制系统。例如，为了减少成为全球变暖最大因素的二氧化碳的排放量，以及减少日益匮乏的石油的消耗量，人们期待能够驾驶将压缩点火式内燃发动机与电动机组合起来运行的混合车。混合车发动机的控制和变速控制就是由超小型计算机完成的。进行控制时，必要的数据都由半导体存储器储存起来。由于汽车电子化的迅速发展，也有人把汽车叫做“奔跑着的计算机”。

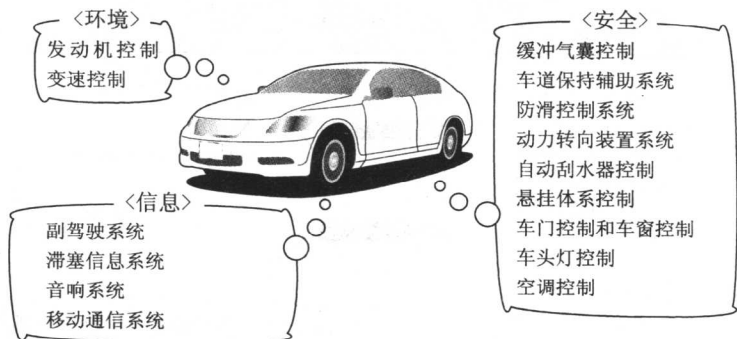


图 1.3 汽车中使用超小型计算机进行控制的例子

图 1.4 示出手机使用的一些半导体器件。手机之所以能够具备网络终端、音响、照相及游戏等功能，也要归功于半导体器件。

将这种半导体器件进一步高性能化、多功能化和高功能化，并装入机器、装置、设备和系统中，是实现信息无处不在世界所必须的条件。

1.3 半导体器件是控制信息和能量流的“大脑”与“心脏”

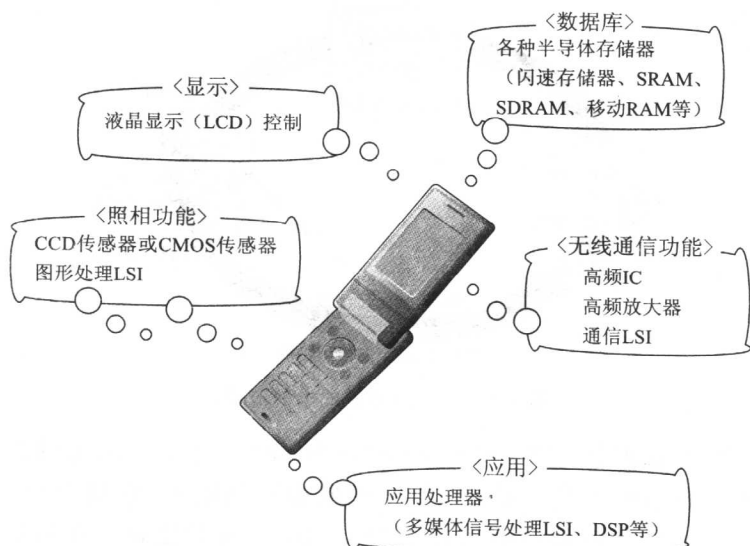


图 1.4 在手机中使用的许多半导体器件

1.3 半导体器件是控制信息和能量流的“大脑”与“心脏”

半导体器件是一切信息基本设施的“大脑”与“心脏”。因此，提高半导体器件的性能，对于实现信息无处不在的世界来讲是非常必要的。另一方面，与“围绕以大脑为中心的神经网络”或者“以心脏为起点进行循环的血管网”相似的则是电路网络。在现代社会中，以图 1.5 所示的电能为例，传送信息或能量的是电流；使机器、设备、装置和系统发挥作用的就是电流流动的通路，即电路。在构成电路的元器件中，“控制电流即信息或能量流动的典型代表”就是半导体器件。

在介绍电路与半导体器件之前，先来说明一些最基本的概念。首先，什么是电？所谓电，就是“电荷”或者“电荷作用的现象”。电荷是基本粒子的固有量之一。所谓基本粒子就是构成物质的基本要素，基本粒子的性质是由这种粒子所具有的电荷（单位为C

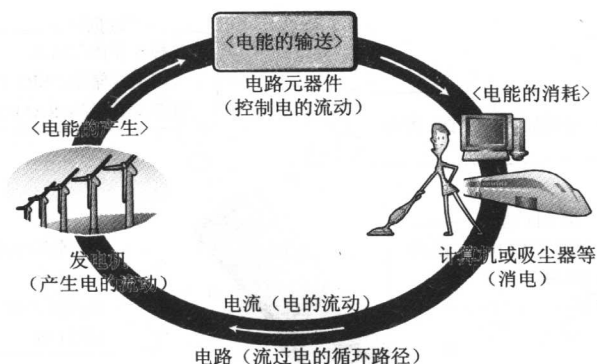


图 1.5 以电能为例的电的流动

(库[仑]),有正负两种)和质量(单位为 kg (千克))所决定的。例如,作为基本粒子之一的、产生电现象根源的电子,它具有 $-e = -1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 的负电荷和 $9.109 \times 10^{-31} \text{kg}$ 的质量。我们把持有电子等电荷的粒子叫做荷电粒子。荷电粒子的移动就会产生“电的流动”,即“电流”。电流的单位是 A (安[培], $\text{A} = \text{C/s}$),需要注意的是,它相当于每秒钟通过的电荷量。另一方面,产生电流的能力叫做电位差,用 V (伏[特])作为单位。电压与电位差的意义基本上相同。图 1.6 以比喻的方式说明电位差产生电流的情况。

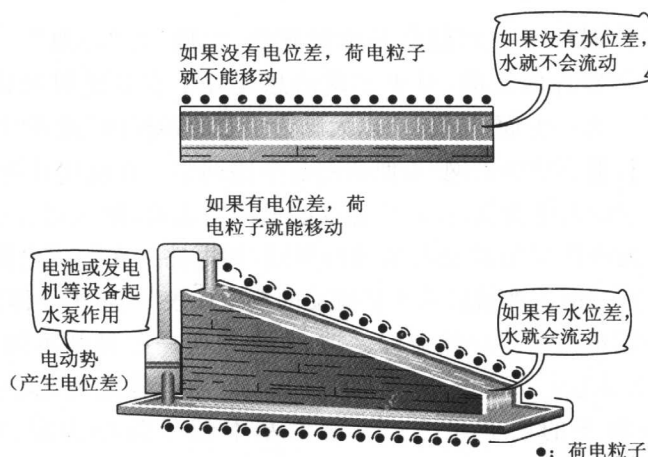


图 1.6 电位差产生电流

1.4 构成电路的有源元件和无源元件

电路是由电路元器件以及将它们连接起来的导线构成的。在电路元器件中,如图 1.7 所示,包括有源元件和无源元件。

无源元件妨碍电的流动,包括阻止电流流动的电阻器、阻止电流发生变化的电容器和电感器(线圈)。电容器具有阻止电压(电荷量)发生变化的作用,而电感器具有阻止电流(磁通)发生变化的作用。

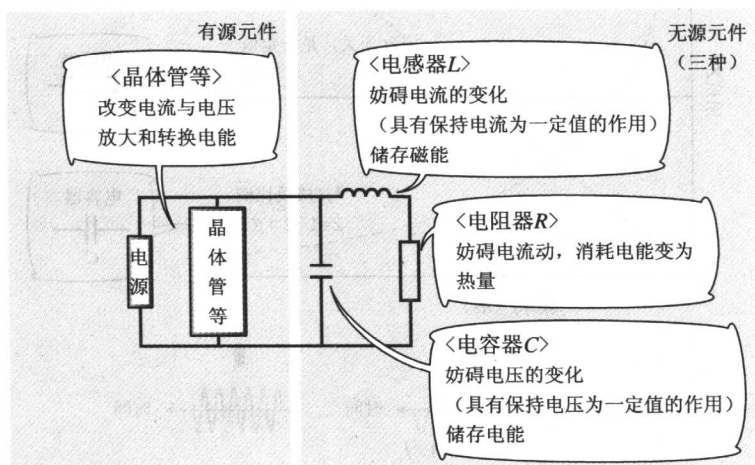


图 1.7 无源元件与有源元件

将电阻器、电容器和电感器妨碍电流流动的这些作用合在一起,就叫做阻抗。阻抗定义为加在电路上的电压与流过电路的电流之比,用符号 Z 表示。 Z 的单位是 Ω (欧[姆]), Ω 可以用电压的单位 V 和电流的单位 A 表示为 $\Omega = V/A$ 。电阻器阻止电流的流动,并以热量的形式消耗掉。用符号 R 表示,单位为 Ω 。电容器妨碍电压即电荷量的变化,具有储存电能的作用。符号是 C (注意与电荷的单位库[仑]不同),单位为 F (法[拉])。 F 可以用 $F = A \cdot s/V$ 表示。电感器妨碍电流即磁通的变化,具有储存磁能的作用。符号