



普通高等学校计算机教育课程“十二五”规划教材·创新系列

嵌入式技术实验教程

QIANRUSHI JISHU SHIYAN JIAOCHENG

王 荃 主编

孙志伟 张天翔 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校计算机教育课程“十二五”规划教材·创新系列

嵌入式技术实验教程

王 荃 主 编
孙志伟 张天翔 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书旨在为学生提供较新的知识体系、完善的实验讲解,主要包括:嵌入式系统基础,包括元器件基本知识、基本电路焊接技术、基本的仪器仪表使用方法;基于 Cortex M4 的嵌入式实验教学系统,包括 SmartSTM32F407 嵌入式教学系统简介,基于 Cortex M4 的嵌入式开发环境和仿真器;基于 Cortex M4 的嵌入式开发基础实验,包括 I/O 键盘接口实验、RS-232 串口通信实验、Realtime 实时时钟实验、A/D 和 D/A 转换实验、SPI 和 I²C 总线实验等基础实验;基于 Cortex M4 的嵌入式开发高级实验,包括 CAN 总线接口实验、以太网 LWIP Socket 实验、嵌入式网络协议 Telnet 实验和 Htpe Server 实验、USB 接口实验;基于 Cortex M4 的嵌入式开发操作系统实验,包括 μ C/OS_II 移植和 FATFS 文件系统移植实验。

本书适合作为高等学校相关专业嵌入式系统课程的实验教材,也可以作为从事嵌入式系统开发的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式技术实验教程/王荃主编. —北京:中国铁道出版社,2015.1

普通高等学校计算机教育课程“十二五”规划教材·创新系列

ISBN 978-7-113-19301-0

I. ①嵌… II. ①王… III. ①微处理器—系统设计—
高等学校—教材 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 298789 号

书 名: 嵌入式技术实验教程
作 者: 王荃 主编

策 划: 孟 欣
责任编辑: 孟 欣 彭立辉
封面设计: 淡晓库
封面制作: 白 雪
责任校对: 汤淑梅
责任印制: 李 佳

读者热线: 400-668-0820

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.51eds.com>

印 刷: 北京铭成印刷有限公司

版 次: 2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.75 字数: 358千

印 数: 1~2 000册

书 号: ISBN 978-7-113-19301-0

定 价: 29.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010) 63550836
打击盗版举报电话:(010) 51873659

本书是在高等学校工科类专业推行“卓越工程师”计划的背景下,在现有教学实践和工程实践总结的基础上,广泛征求嵌入式软件、硬件技术人员和产品经理需求后编写而成。本书结合嵌入式产品开发的实际,从基本概念、基础知识到嵌入式开发环境的建立、基础实验、高级实验、操作系统实验等内容做了深入翔实的介绍,每个实验都有详细的实验原理分析、参考程序分析。其目的是辅助培养具有动手操作能力的嵌入式工程技术人员,并使他们快速具备实际开发能力。

在本书的编写过程中,我们参考了大量国内有关嵌入式软件、嵌入式硬件类的教材,从很多教材中获得了深刻的启发和珍贵的资料。本书内容设计基本上是按照嵌入式硬件相关基础知识、基本仪器设备的使用、基础实验、高级实验相关知识以及相关实验设计来构成的,主要目的就是要涵盖嵌入式系统开发过程中的各个实际环节,使本书不仅能够成为一本务实的实验教材,还能成为一本企业工程技术人员的参考手册。

需要说明的是,根据实践教学结果我们发现传统的实验课程的教学对于本科院校的学生教学效果不理想,表现为课程中所用开发环境和硬件电路芯片已过时,无法满足学生毕业后实际应用的需要,学生无法在大学学习阶段了解市场应用开发所用到的主流系统和硬件环境。因此,所学内容同社会需求脱节,工作后不能很快融入技术团队。我们设计本书的主要目的就是要以市场主流的技术、开发环境、开发语言与本科生阶段的基础教育相融合,形成开阔学生视野、实践性强的综合性实验。为此,我们自主设计、开发了实验开发板,让学生在全新的实验环境下实验,大幅度提升嵌入式实验教学的效果。

本书不仅可以满足高等学校“电子工程”类专业的教学实验需要,还可以满足高职院校相关专业的教学需要,并能够作为企业快速培训嵌入式工程技术人员的培训教程。

本书由王荃任主编,孙志伟、张天翔任副主编,其中第1章由张天翔编写,第3章由孙志伟编写,第2章、第4章、第5章由王荃编写,华斌教授对全书进行了审校,提出了很多宝贵意见。

由于时间仓促,编者水平有限,疏漏与不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2014年10月于天津财经大学

第 1 章 嵌入式系统基础.....	1
1.1 元器件基本知识.....	1
1.1.1 电阻器.....	1
1.1.2 电容器.....	3
1.1.3 电感器.....	5
1.1.4 二极管.....	7
1.1.5 晶体管.....	9
1.1.6 传感器.....	10
1.1.7 电声器件.....	12
1.1.8 频率元器件.....	13
1.1.9 数码管、点阵及液晶屏.....	15
1.1.10 集成电路.....	17
1.2 基本电路焊接技术.....	18
1.2.1 回流焊机焊接.....	18
1.2.2 电烙铁手工焊接.....	19
1.2.3 接插件焊接手工焊接.....	24
1.3 基本的仪器仪表使用方法.....	32
1.3.1 数字万用表.....	33
1.3.2 函数信号发生器/计数器.....	38
1.3.3 数字示波器.....	45
1.3.4 直流稳压电源.....	58
第 2 章 基于 Cortex M4 的嵌入式实验教学系统.....	62
2.1 SmartSTM32F407 嵌入式实验教学系统简介.....	62
2.1.1 主控底板.....	62
2.1.2 核心板.....	64
2.1.3 开发系统周边模块.....	66
2.2 基于 Cortex M4 的嵌入式集成开发环境.....	68
2.2.1 基于 Cortex M4STM32 开发软件简介.....	68
2.2.2 基于 Keil 的集成开发环境 (μVision3 IDE).....	68
2.2.3 用 Keil for ARM-MDK 新建立工程.....	70
2.3 基于 Cortex M4 的嵌入式开发仿真器.....	75

第 3 章 基于 Cortex M4 的嵌入式开发基础实验	76
【实验 3-1】I/O 键盘接口实验	76
【实验 3-2】RS-232 串口通信实验	84
【实验 3-3】看门狗实验	93
【实验 3-4】Realtime 实时时钟实验	106
【实验 3-5】A/D 和 D/A 转换实验	121
【实验 3-6】SPI 总线实验	128
【实验 3-7】I ² C 总线实验	139
第 4 章 基于 Cortex M4 的嵌入式开发高级实验	158
【实验 4-1】CAN 总线接口实验	158
【实验 4-2】以太网 LWIP Socket 实验	167
【实验 4-3】嵌入式网络协议 Telnet 实验	179
【实验 4-4】嵌入式网络协议 Http Server 实验	187
【实验 4-5】USB 设备接口实验	191
第 5 章 基于 Cortex M4 的嵌入式开发操作系统实验	201
【实验 5-1】 μ C/OS_II 移植	201
【实验 5-2】FATFS 文件系统移植	212
附录 A 图形符号对照表	228
参考文献	229

第 1 章 嵌入式系统基础

1.1 元器件基本知识

本节涉及的元器件有电阻器、电容器、电感器、二极管、晶体管、传感器、电声器件、频率元件，以及数码管、点阵、液晶屏和集成电路。

1.1.1 电阻器

电阻器是电路元器件中应用最广泛的一种，在电子设备中占元器件总数的 30% 以上，其质量的好坏对电路工作的稳定性有极大影响。它的主要用途是稳定和调节电路中的电流和电压，其次还作为分流器、分压器和负载使用。

电阻器可分为以下几类：

1. 薄膜类

在玻璃或陶瓷基体上沉积一层碳膜、金属膜、金属氧化膜等形成电阻薄膜，膜的厚度一般在几微米以下。

① 金属膜电阻器（型号：RJ）：在陶瓷骨架表面，经真空高温或烧渗工艺蒸发沉积一层金属膜或合金膜。其特点是：精度高、稳定性好、噪声低、体积小、高频特性好，且允许工作环境温度范围大（ $-55 \sim +125^{\circ}\text{C}$ ）、温度系数小 [$(50 \sim 100) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]。目前是组成电子电路应用最广泛的电阻器之一。常用额定功率有 1/8 W、1/4 W、1/2 W、1 W、2 W 等，标称电阻值在 $10 \Omega \sim 10\text{M}\Omega$ 之间。

② 金属氧化膜电阻器（型号：RY）：在玻璃、瓷器等材料上，通过高温以化学反应形式生成以二氧化锡为主体的金属氧化层。该电阻器由于氧化膜膜层比较厚，因而具有极好的脉冲、高频和过负荷性能，且耐磨、耐腐蚀、化学性能稳定。但阻值范围窄，温度系数比金属膜电阻器差。

③ 碳膜电阻器（型号：RT）：在陶瓷骨架表面上，将碳氢化合物在真空中通过高温蒸发分解沉积成碳结晶导电膜。碳膜电阻器价格低廉，电阻值范围宽（ $10 \Omega \sim 10\text{M}\Omega$ ），温度系数为负值。常用额定功率为 1/8 ~ 10W，精度等级为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ ，在一般电子产品中大量使用。

薄膜类电阻器如图 1-1 所示。

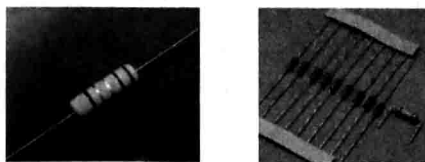


图 1-1 薄膜类电阻器

2. 合金类

用块状电阻合金拉制成合金线或碾压成合金箔制成电阻器，主要包括：

① 线绕电阻器（型号：RX）：将康铜丝或镍铬合金丝绕在磁管上，并将其外层涂以珐琅或玻璃釉加以保护。线绕电阻器具有高稳定性、高精度、大功率等特点。温度系数可做到小于 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，精度高于 $\pm 0.01\%$ ，最大功率可达 200 W。线绕电阻器的缺点是：自身电感和分布电容比较大，不适合在高频电路中使用。

② 精密合金箔电阻器（型号：RJ）：在玻璃基片上黏合一块合金箔，用光刻法蚀出一定图形，并涂敷环氧树脂保护层，引线封装后形成。该电阻器最大的特点是具有自动补偿电阻温度系数功能，故精度高、稳定性好、高频响应好。这种电阻器的精度可达 $\pm 0.001\%$ ，稳定性为 $\pm 5 \times 10^{-4}\%/ \text{年}$ ，温度系数为 $\pm 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。可见，它是一种高精度电阻器。

合金类电阻器如图 1-2 所示。

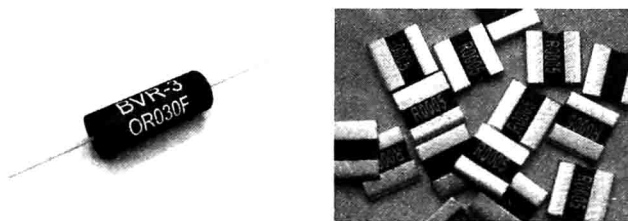


图 1-2 合金类电阻器

3. 合成类

合成类电阻器指将导电材料与非导电材料按一定比例混合成不同电阻率的材料后制成的电阻器。该电阻器的最突出的优点是可靠性高，但性能比较差。常在某些特殊的领域内使用（如航空航天工业、海底电缆等）。合成类电阻器种类比较多，按用途可分为通用型、高阻型和高压型等。

① 金属玻璃釉电阻器（型号：RI）：以无机材料做黏合剂，用印刷烧结工艺在陶瓷基体上形成电阻膜。该电阻器具有较高的耐热性和耐潮性，常用它制成小型化贴片式电阻器。

② 实芯电阻器（型号：RS）：用有机树脂和碳粉合成电阻率不同的材料后热压而成。其体积与相同功率的金属膜电阻器相当，但噪声比金属膜电阻器大。电阻值范围为 $4.7 \Omega \sim 22 \text{ M}\Omega$ ，精度等级为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 。

③ 合成膜电阻器（RH）：合成膜电阻器可制成高压型和高阻型。高阻型电阻器的电阻值范围为 $10 \sim 10^6 \text{ M}\Omega$ ，允许误差为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 。高压型电阻器的电阻值范围为 $47 \sim 1\,000 \text{ M}\Omega$ ，耐压分 10 kV 和 35 kV 两档。

④ 厚膜电阻网络（电阻排）：它是以高铝瓷做基体，综合掩膜、光刻、烧结等工艺，在一块基片上制成多个参数性能一致的电阻器，连接成电阻器网络，也叫集成电阻器。集成电阻器的特点是温度系数小，电阻值范围宽，参数对称性好。目前，已越来越多地被应用在各种电子设备中。

合成类电阻器如图 1-3 所示。



图 1-3 合成类电阻器

4. 敏感类

使用不同材料和工艺制造的半导体电阻器，具有对温度、光照度、湿度、压力、磁通量、气体浓度等非电物理量敏感的性质，这类电阻器叫作敏感电阻器。利用这些不同类型的电阻器，可以构成检测不同物理量的传感器。这类电阻器主要应用于自动检测和自动控制领域中。

敏感类电阻器如图 1-4 所示。



图 1-4 敏感类电阻器

1.1.2 电容器

电容器是临时电荷存储单元，其特性可用公式 $I = CdV/dt$ 描述。这个方程阐述了电容器通过的电流与电容器两端的电压随时间变化率成正比。电容器对电流的阻碍作用是由容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C}$ 决定的。当所使用的电压频率趋近于无穷大时，电容器的电抗趋近于 0，当电压频率趋近于零时，电容器的容抗趋近于无穷大。改变电容的大小也会影响阻抗，当电容增大时，阻抗也随之减小，电流相应增大。

电容器两端的电压波动时，电容器的阻抗随之改变，使得电容器成为一种非常实用的频率敏感型元器件。比如：频率敏感分压器、旁路或阻塞网络、滤波网络、瞬变噪声干扰装置、微分电路、积分电路、倍压电路、振荡电路、闪光灯电路等。

简单的电容器由两块平行极板构成。两个极板之间填充绝缘材料，绝缘材料的绝缘系数与极板面积、平行极板之间的距离一起决定了电容器的电容量大小。电容器的介质材料可以有纸张、塑料薄膜、云母、玻璃陶瓷或空气，极板材料一般为铝片或其他金属薄膜材质。

常见的电容器有：陶瓷电容器、电解电容器、独石电容器、纸介电容器等。

1. 陶瓷电容器

陶瓷电容器由薄瓷片两面镀银金属膜而成，其体积小、耐压高、价格低、频率高（有一种

是高频电容器)、易碎、容量低,如图 1-5 所示。

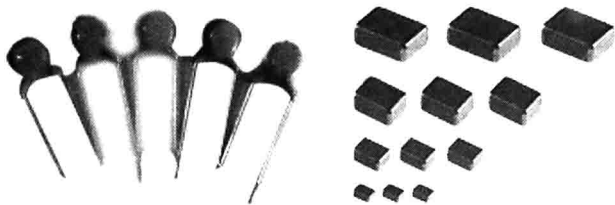


图 1-5 陶瓷电容器

2. 电解电容器

电解电容器介质有电解液,涂层有极性,分正负,不可接错。此种电容器有两个金属极,中间夹有绝缘材料(介质)。电解电容器长脚为正极。特点一:单位体积的电容量非常大,比其他种类的电容器大几十到数百倍。特点二:额定的容量可以做到非常大,可以轻易做到几万微法甚至几法(但不能和双电层电容器相比)。特点三:价格比其他种类具有压倒性优势,因为电解电容器的组成材料都是普通的工业材料,比如铝等。制造电解电容器的设备也都是普通的工业设备,可以大规模生产,成本相对较低,如图 1-6 所示。



图 1-6 电解电容器

3. 独石电容器

独石电容器比一般陶瓷电容器的电容量大($10\text{ pF}\sim 10\mu\text{F}$),具有电容量大、体积小、可靠性高、电容量稳定、耐高温、绝缘性好、成本低等优点,因而得到广泛应用。独石电容器不仅可替代云母电容器和纸介电容器,还取代了某些钽电容器,广泛应用在小型和超小型电子设备(如液晶手表和微型仪器)中。

特点:温度特性好,频率特性好。一般电容器随着频率的上升,电容量呈现下降的规律;独石电容器下降比较少,容量比较稳定,如图 1-7 所示。

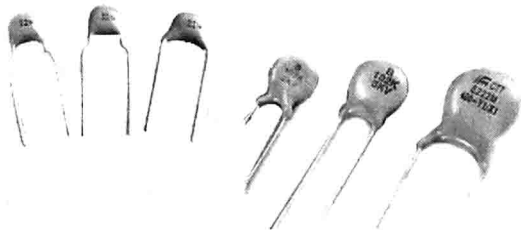


图 1-7 独石电容器

4. 纸介电容器

纸介电容器（见图 1-8）用特制的电容纸作为介质，铝箔或锡箔作为电极并卷绕成圆柱形，然后接出引线，再经过浸渍处理，用外壳封装或环氧树脂灌封而成。其特点为由于介质厚度薄（一般为 $6\sim 20\ \mu\text{m}$ ），且电容纸具有较高的抗拉强度，故可卷绕成电容量大、体积小的电容器，电容量可以达到 $1\sim 20\ \mu\text{F}$ 。其特点是：电容量范围宽，工作电压高，成本低廉，但是这种电容器化学稳定性和热稳定性都比较差；容易老化，介质损耗大，工作温度一般在 100°C 以下；吸湿性大，需要密封，不适合高频电路工作。



图 1-8 纸介电容器

1.1.3 电感器

电感器（电感线圈）和变压器绕组均是用绝缘导线（例如漆包线、纱包线等）绕制而成的电磁感应元器件，也是电子电路中常用的元器件之一。

1. 电感器的的工作原理

当电感器中通过直流电流时，其周围只呈现固定的磁感线，不随时间而变化；可是当在线圈中通过交流电流时，其周围将呈现出随时间而变化的磁感线。根据法拉第电磁感应定律，变化的磁感线在线圈两端会产生感应电动势，此感应电动势相当于一个“新电源”。当形成闭合回路时，此感应电动势就要产生感应电流。由楞次定律可知，感应电流所产生的磁感线总量会力图阻止磁感线的变化。磁感线变化来源于外加交变电源的变化，故从客观效果看，电感线圈有阻止交流电路中电流变化的特性。电感线圈有与力学中的惯性相类似的特性，在电学上取名为“自感应”，通常在拉开刀开关或接通刀开关的瞬间，会发生火花，这是由于自感现象产生很高的感应电动势所造成的。

电感器的参数用 L 表示， L 是感应电压与电流改变的比例常数，表现的是电感阻止电流变化的性能。 L 值取决于所用电感器的线圈的匝数、线圈的截面积、线圈的间距、绕组方式、磁芯材料等。

2. 固定电感器的类型

常见的固定型电感器有扼流圈、环形线圈、天线线圈、调谐线圈等。

（1）扼流圈

扼流圈是较为普通的一类电感器，用于限制或阻止通过此电感器的电流的波动。此类电感器的外观类型、缠绕方式、包装类型、电感量、容许误差等各异。典型的电感量范围为 $1\ \mu\text{H} \sim 100\ \text{mH}$ ，容许误差为 $\pm 5\% \sim \pm 20\%$ ，如图 1-9 所示。



图 1-9 扼流圈

(2) 环形线圈

这类线圈的形状是一个缠绕着电缆的环形体，每单位体积有很大的电感量、很高的品质因数，并且能够自我屏蔽，它们可在极高的频率下工作，如图 1-10 所示。

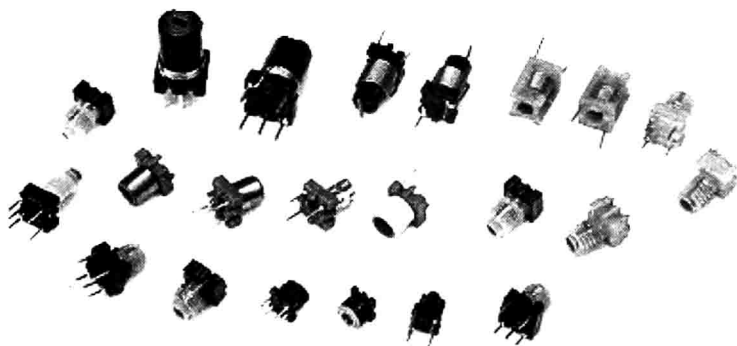


图 1-10 环形线圈

(3) 天线线圈

这类线圈的磁芯可以放大电磁场，使线圈对电流的小变化非常敏感。这类线圈用于调谐特高频信号，如图 1-11 所示。

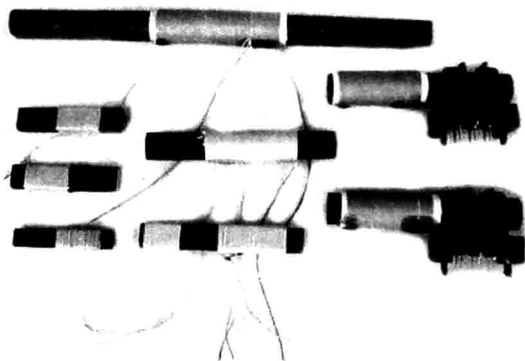


图 1-11 天线线圈

(4) 调谐线圈

调谐线圈通常含有一个螺钉状的磁芯，以及若干线圈抽头，它们经常用在收音机等设备中，

用于选择频率，如图 1-12 所示。



图 1-12 调谐线圈

1.1.4 二极管

二极管种类有很多，按照所用的半导体材料，可分为锗二极管（Ge 管）和硅二极管（Si 管）。根据其不同用途，可分为检波二极管、整流二极管、稳压二极管、开关二极管等。按照管芯结构，又可分为点接触型二极管、面接触型二极管及平面型二极管。点接触型二极管是用一根很细的金属丝压在光洁的半导体晶片表面，通以脉冲电流，使触丝一端与晶片牢固地烧结在一起，形成一个“PN 结”。由于是点接触，只允许通过较小的电流（不超过几十毫安），适用于高频小电流电路，如收音机的检波等。面接触型二极管的“PN 结”面积较大，允许通过较大的电流（几安到几十安），主要用于把交流电转换成直流电的“整流”电路中。平面型二极管是一种特制的硅二极管，它不仅能通过较大的电流，而且性能稳定可靠，多用于开关、脉冲及高频电路中。

1. 发光二极管

发光二极管（LED）在电子电路中作为指示灯。但它们并不像普通的白炽灯，并不含有可烧断的灯丝，也不会变得特别烫。它们能够发光，仅仅是半导体材料内的电子运动的结果，其使用寿命同普通的晶体管一样长。图 1-13 所示为发光二极管的实物图。

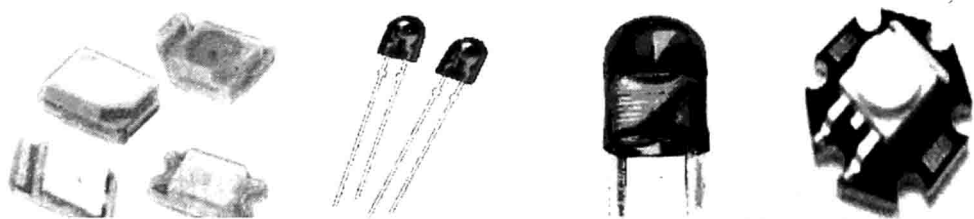


图 1-13 发光二极管

2. 稳压二极管

稳压二极管用于稳定电压的单结二极管，结构同整流二极管。加在稳压二极管的反向电压增加到一定数值时，将有大量载流子隧穿伪结的位垒，形成大的反向电流，此时电压基本不变，称为隧道击穿。当反向电压比较高时，在位垒区内将可能产生大量载流子，受强电场作用形成大的反向电流，而电压基本不变，称为雪崩击穿。因此，反向电压临近击穿电压时，反向电流迅速增加，而反向电压几乎不变。这个近似不变的电压称为齐纳电压（隧道击穿）或雪崩电压。

(雪崩击穿)。图 1-14 所示为稳压二极管的实物图。

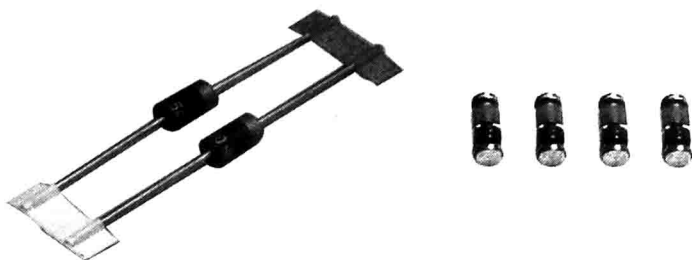


图 1-14 稳压二极管

3. 整流二极管

一种用于将交流电能转变为直流电能的半导体器件。通常它包含一个 PN 结, 有阳极和阴极两个端子。P 区的载流子是空穴, N 区的载流子是电子, 在 P 区和 N 区间形成一定的位垒。外加使 P 区相对 N 区为正的电压时, 位垒降低, 位垒两侧附近产生储存载流子, 能通过大电流, 具有低的电压降 (典型值为 0.7 V), 称为正向导通状态。若加相反的电压, 使位垒增加, 可承受高的反向电压, 流过很小的反向电流 (称反向漏电流), 称为反向截止状态。整流二极管具有明显的单向导电性, 可用半导体锗或硅等材料制造。硅整流二极管的击穿电压高, 反向漏电流小, 高温性能良好。通常高压大功率整流二极管都用高纯单晶硅制造 (掺杂较多时容易反向击穿)。这种器件的结面积较大, 能通过较大电流 (可达上千安), 但工作频率不高, 一般在几十千赫以下。整流二极管主要用于各种低频半波整流电路, 如要达到全波整流需连成整流桥使用。图 1-15 所示为整流二极管的实物图。

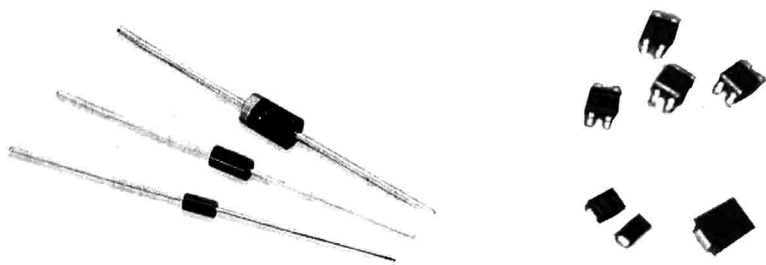


图 1-15 整流二极管

4. 光电二极管

光电二极管和普通二极管一样, 也是由一个 PN 结组成的半导体器件, 也具有单向导电特性。但在电路中它不是作为整流元器件, 而是把光信号转换成电信号的光电传感器件。普通二极管在反向电压作用时处于截止状态, 只能流过微弱的反向电流, 光电二极管在设计和制作时尽量使 PN 结的面积相对较大, 以便接收入射光。光电二极管是在反向电压作用下工作的, 没有光照时, 反向电流极其微弱, 称为暗电流; 有光照时, 反向电流迅速增大到几十微安, 称为光电流。光的强度越大, 反向电流也越大。光的变化引起光电二极管电流变化, 这就可以把光信号转换成电信号。图 1-16 所示为光电二极管的实物图。

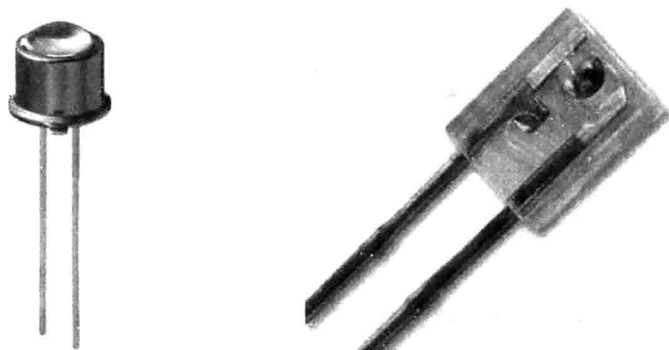


图 1-16 光电二极管

5. 肖特基二极管

肖特基二极管 (SBD) 是以其发明人肖特基博士命名的, SBD 是肖特基势垒二极管的简称。SBD 不是利用 P 型半导体与 N 型半导体接触形成 PN 结原理制作的, 而是利用金属与半导体接触形成的金属-半导体结原理制作的。因此, SBD 也称为金属-半导体 (接触) 二极管或表面势垒二极管, 是一种热载流子二极管。肖特基二极管是近年来问世的低功耗、大电流、超高速半导体器件。其反向恢复时间极短 (可以小到几纳秒), 正向导通压降仅 0.4 V 左右, 而整流电流却可达到几千毫安。这些优良特性是快恢复二极管所无法比拟的。中、小功率肖特基整流二极管大多采用封装形式, 如图 1-17 所示。

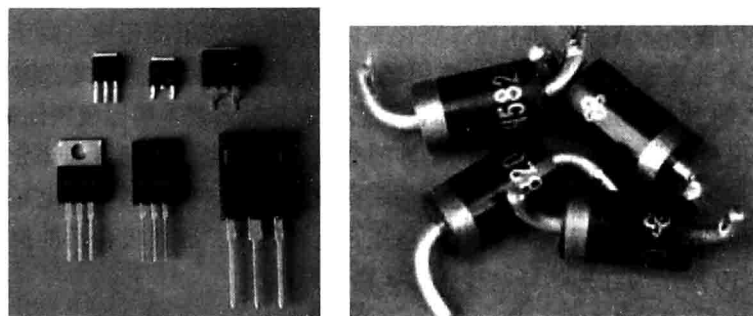


图 1-17 肖特基二极管

1.1.5 晶体管

晶体管是一种控制元器件, 主要用来控制电流的大小。以共发射极接法 (信号从基极输入, 从集电极输出, 发射极接地) 为例, 当基极电压 U_B 有一个微小的变化时, 基极电流 I_B 也会随之有一小的变化, 受基极电流 I_B 的控制, 集电极电流 I_C 会有一个很大的变化, 基极电流 I_B 越大, 集电极电流 I_C 也越大; 反之, 基极电流越小, 集电极电流也越小, 即基极电流控制集电极电流的变化。但是, 集电极电流的变化比基极电流的变化大得多, 这就是晶体管的放大作用。 I_C 的变化量与 I_B 变化量之比叫作晶体管的放大倍数 β ($\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$, Δ 表示变化量), 晶体管的放大倍数 β 一般在几十到几百倍。图 1-18 所示为晶体管的实物图。

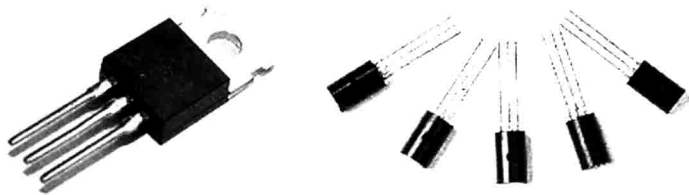


图 1-18 晶体管

晶体管工作状态有 3 种：放大、饱和、截止，其中又以放大状态最为复杂，主要用于小信号的放大领域。常用的晶体管放大电路形式有：共发射极放大电路、共集电极放大电路、共基极放大电路 3 种，其中共集电极放大电路用于电流放大（功率放大），共基极放大电路用于高频放大，共发射极放大电路用于低频放大。

1.1.6 传感器

1. 红外热释电传感器

红外热释电传感器和热电偶都是基于热电效应原理的热电型红外传感器。不同的是红外热释电传感器的热电系数远远高于热电偶，其内部的热电元件由高热电系数的铁钛酸铅汞陶瓷以及钽酸锂、硫酸三甘铁等配合滤光镜片窗口组成，其极化随温度的变化而变化。为了抑制因自身温度变化而产生的干扰，该传感器在工艺上将两个特征一致的热电元件反向串联或接成差动平衡电路方式，因而能以非接触式检测出物体放出的红外线能量变化，并将其转换为电信号输出。热释电红外传感器在结构上引入场效应管的目的在于完成阻抗变换。由于热电元件输出的是电荷信号，并不能直接使用，因而需要用电阻器将其转换为电压形式，该电阻器阻抗高达 $10^4 \text{ M}\Omega$ ，故引入的 N 型沟道结型场效应晶体管应接成共漏形式（即源极跟随器），来完成阻抗变换。红外热释电传感器由传感探测元、干涉滤光片和场效应管匹配器 3 部分组成。设计时应将高热电材料制成一定厚度的薄片，并在它的两面镀上金属电极，然后加电对其进行极化，这样便制成了热释电探测元。由于加电极化的电压是有极性的，因此极化后的探测元也是有正、负极性的。图 1-19 所示为红外热释电传感器实物及原理图。

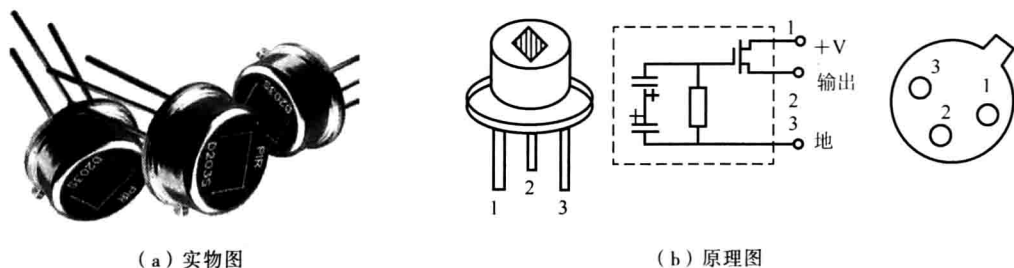


图 1-19 红外热释电传感器实物及原理图

2. 气敏传感器

气敏传感器是一种半导体敏感器件，它是利用气体的吸附而使半导体本身的电导率发生变化这一机理来进行检测的。人们发现某些氧化物半导体材料如 SnO_2 、 ZnO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 NiO 、

BaTiO₃等都具有气敏效应。

以 SnO₂ 气敏元器件为例, 它是由 0.1 ~ 10μm 的晶体集合而成, 这种晶体是作为 N 型半导体而工作的。在正常情况下, 是处于氧离子缺位的状态。当遇到离解能较小且易于失去电子的可燃性气体分子时, 电子从气体分子向半导体迁移, 半导体的载流子浓度增加, 因此电导率增加。而对于 P 型半导体来说, 它的晶格是阳离子缺位状态, 当遇到可燃性气体时其电导率则减小。图 1-20 所示为气敏传感器的实物图。

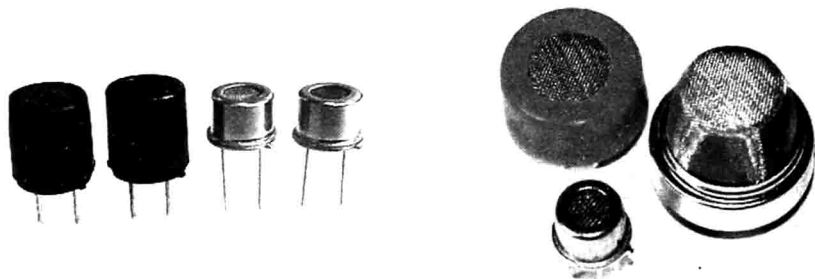


图 1-20 气敏传感器

3. 光敏传感器

在传感器中, 最常见的是光敏传感器。光敏传感器的种类比较多, 主要有红外线传感器、紫外线传感器、光纤式光电传感器、色彩传感器、CCD 和 CMOS 图像传感器等。

光敏传感器是利用光敏元器件将光信号转换为电信号的传感器, 它的敏感波长在可见光波长附近, 包括红外线波长和紫外线波长。光敏传感器不只局限于对光的探测, 还可以作为探测元器件组成其他传感器, 对许多非电学量进行检测, 只要将这些非电学量转换为光信号的变化即可。图 1-21 所示为光敏传感器的实物图。

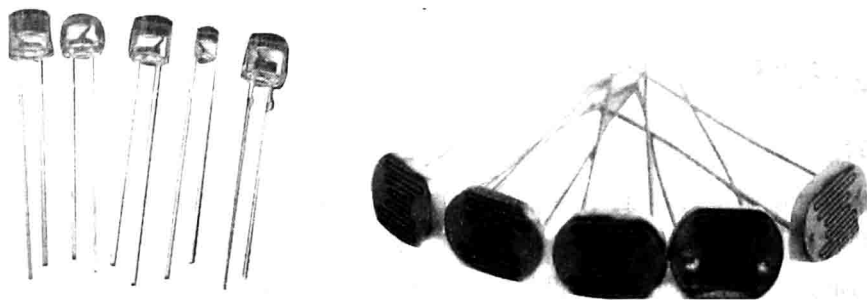


图 1-21 光敏传感器

4. 温度传感器

温度传感器指利用物质各种物理性质随温度变化的规律把温度转换为电学量的传感器。它的主要特点是测量精度高, 性能稳定。温度传感器是温度测量仪表的核心部分, 品种繁多。按测量方式可分为接触式和非接触式两大类; 按照传感器材料及电子元器件特性分为热电阻和热电偶两类。图 1-22 所示为温度传感器的实物图。