

图形与表格细说

知识与技术融合

学习与查阅并用

晶体管 及其应用

王新贤 张兆虎 徐素颖 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

晶体管及其应用

王新贤 张兆虎 徐素颖 编著
贾士伟 张佳莹 李艳英 胡玉萍

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了各种晶体管的工作原理、性能特点、主要参数和典型应用；同时将众多知识点梳理成表格形式，便于理解和记忆，易学易用，也突出了电子技术特色和工具书特点。全书内容分为7章，包括PN结、二极管、晶体三极管、晶闸管、场效应管、光电器件和特殊二极管。

全书立足于知识普及与技术创新，坚持器件与应用并重，知识与技术融合的原则，是极具参考价值的实用书籍。本书适合电子技术领域从业人员、爱好者、初学者阅读，是电子、计算机、自动化、测量类专业大、中专学生的优秀读物，也是电子、自动化和电工工程师应对知识老化的好帮手。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

晶体管及其应用/王新贤等编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.4
ISBN 978-7-121-25702-5

I. ①晶… II. ①王… III. ①晶体管 IV. ①TN32

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第050843号

策划编辑: 曲 昕

责任编辑: 夏平飞 特约编辑: 郭茂威

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.75 字数: 564千字

版 次: 2015年4月第1版

印 次: 2015年4月第1次印刷

定 价: 49.90元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

PN 结是半导体技术的基石，简单而神奇，掌握其形成机理和性能特点就为后续的专业学习奠定了坚实的基础。各种晶体管的性能差异在很大程度上取决于其内部 PN 结的数量及相互位置的配制。各类晶体管的工作原理、性能特点、主要参数、实用电路及检测方法是专业学习和工作必备的知识点。

为适应电子技术的迅速发展，直面知识老化，着力构筑课堂通往实用的桥梁，促进新器件的推广和应用，本书在选材方面，既重视广泛应用的传统器件，更看重新推出、适应新需求的新器件及实用技术；在编排方面，采用文字、图和表格解说模式，简洁直观，一目了然，可适应快节奏的需求；在内容组织方面，力求知识与技术融合，理论与实用相接，在深入分析和讲解典型器件的同时，比较详细地介绍了主要新器件及其应用；在编写时，注意突出重点，深入浅出、图表并用，语言通俗、行文流畅。本书具有鲜明的电子技术普及和实用特色，同时又详略得当、广集资源、扩大视野，具有工具书的特点，便于随时查阅。鉴于部分器件在电子、电工领域都有应用，所以书中有意模糊了电子和电工的界限，以适应现实的需要。

本书对各种晶体管知识、技术的广度和深度仔细斟酌，兼顾内容的知识性、技术先进性和实用性，以及工具性，利于技术普及、学以致用和知识更新。特别适合电子技术领域从业人员、爱好者、初学者阅读，是电子、自动化、计算机、测量类专业的大、中专学生和研究生的优选读物，也是电子、自动化与电工工程师和教师应对知识老化的好帮手和极具参考价值的实用书籍。

多位作者参与了本书的编写工作，第 1 章由王新贤、范明通编写；第 2 章由张兆虎、王立敏编写；第 3 章由王新贤、李艳英编写；第 4 章由王新贤、张佳莹编写；第 5 章由王新贤、贾士伟编写；第 6 章由王新贤、胡玉萍编写；第 7 章由徐素颖、王新贤编写。

由于编著者的学识和能力有限，书中难免有不尽人意之处，甚至失误，敬请读者不吝指教！

编著者

2014 年 11 月

目 录

第1章 PN 结	1
1.1 制造 PN 结的材料——半导体	1
1.1.1 半导体基本知识	1
1.1.2 半导体的性能特点及参数	5
1.2 PN 结的生成	6
1.2.1 PN 结的形成过程	6
1.2.2 PN 结的特性	7
1.3 半导体器件及命名	9
1.3.1 器件类型	9
1.3.2 半导体器件型号的命名	10
第2章 二极管	15
2.1 基本知识	15
2.1.1 符号与结构	15
2.1.2 工作原理及类型	18
2.2 二极管的特性与参数	20
2.2.1 伏安特性	20
2.2.2 技术参数	21
2.3 二极管的用途与检测	23
2.3.1 二极管的用途	23
2.3.2 二极管的检测	23
2.4 整流二极管	24
2.4.1 基本知识	24
2.4.2 整流模块	25
2.4.3 整流二极管的选用和检测	29
2.5 检波二极管	29
2.5.1 基本知识	30
2.5.2 特性与参数	31
2.5.3 检波二极管应用电路	32
2.6 开关二极管	34
2.6.1 基本知识	34
2.6.2 原理与参数	34
2.6.3 常用开关二极管	35
2.6.4 开关二极管实用电路	38
第3章 晶体三极管	40
3.1 结构和原理	40

3.1.1	基本知识	40
3.1.2	三极管的电流放大原理	42
3.1.3	主要特性	44
3.1.4	特性参数	46
3.2	低频放大器	53
3.2.1	静态工作点	53
3.2.2	单管小信号放大器	54
3.2.3	两级耦合放大器	55
3.3	差分放大器	57
3.3.1	零点漂移及补偿	57
3.3.2	差分放大器的构成及原理	58
3.4	反馈放大电路	60
3.4.1	反馈放大电路的构成	60
3.4.2	负反馈放大电路分析	61
3.4.3	射极跟随器	63
3.4.4	常见负反馈放大电路	64
3.5	功率放大器	65
3.5.1	大功率三极管	65
3.5.2	大功率三极管主要参数	66
3.5.3	达林顿管	68
3.5.4	功放电路	72
3.6	开关三极管及应用	78
3.6.1	开关三极管	78
3.6.2	三极管开关电路	83
3.6.3	脉冲的基本知识	84
3.6.4	逻辑电路	86
3.6.5	三极管振荡电路	88
3.7	三极管的辨识与检测	90
3.7.1	三极管的辨识	90
3.7.2	三极管的检测	91
3.8	新型晶体管	93
3.8.1	数字晶体管	93
3.8.2	异质结双极型晶体管	98
第4章	晶闸管	101
4.1	基本知识	101
4.1.1	符号与分类	101
4.1.2	结构与工作原理	102
4.1.3	特性与参数	104
4.1.4	串并联及保护	106

4.1.5 晶闸管模块	108
4.1.6 晶闸管保护	112
4.2 触发电路	114
4.2.1 晶闸管控制极特性	114
4.2.2 单结晶体管	115
4.2.3 可编程单结晶体管 (PUT)	118
4.2.4 实用电路	120
4.2.5 检测与判断	123
4.3 可控整流与逆变电路	123
4.3.1 单相整流	124
4.3.2 三相整流器	128
4.3.3 逆变器	132
4.4 双向晶闸管	136
4.4.1 基本结构和工作原理	136
4.4.2 特性与参数	138
4.4.3 交流调压	139
4.5 开关晶闸管与晶闸管开关电路	140
4.5.1 开关晶闸管	140
4.5.2 硅开关	143
4.5.3 晶闸管开关电路	145
4.6 其他晶闸管	147
4.6.1 门极可关断晶闸管	147
4.6.2 逆导晶闸管	149
4.6.3 快速晶闸管	151
4.6.4 温控晶闸管	153
4.6.5 光控晶闸管	156
4.6.6 光耦晶闸管	159
第5章 场效应管	161
5.1 场效应管的结构与原理	161
5.1.1 场效应管的基本知识	161
5.1.2 场效应管的基本原理	163
5.1.3 结型场效应管的特性曲线	167
5.1.4 NMOS 管的特性曲线	168
5.1.5 场效应管的主要参数	169
5.2 场效应管的基本放大原理	171
5.2.1 共源极放大器	171
5.2.2 共漏极放大器	173
5.2.3 共栅极放大器	173
5.3 其他场效应管	174

5.3.1	VMOS 和 TMOS 场效应管	174
5.3.2	DMOS (即 π MOS) 场效应管	175
5.3.3	MESFET 场效应管	177
5.3.4	TFT 场效应管	178
5.4	场效应管的识别与检测	179
5.4.1	场效应管的识别	180
5.4.2	场效应管的检测	181
5.5	场效应管的应用电路	182
5.5.1	场效应管在电源电路中的应用	182
5.5.2	场效应管在逆变电路中的应用	185
5.5.3	场效应管在驱动电路中的应用	186
5.5.4	场效应管的其他几种应用电路	189
5.6	IGBT 的原理及应用	191
5.6.1	IGBT 的基本知识	191
5.6.2	工作原理	193
5.6.3	主要参数和特性	194
5.6.4	驱动原理及应用	196
第 6 章	光电器件	198
6.1	光电二极管	198
6.1.1	基本知识	198
6.1.2	工作原理与工作模式	201
6.1.3	光电二极管特性	202
6.1.4	主要技术参数	203
6.1.5	常用光电二极管	205
6.1.6	光电二极管的应用	206
6.1.7	光电二极管的检测	209
6.2	光电三极管	209
6.2.1	光电三极管基本知识	209
6.2.2	工作原理	210
6.2.3	特性曲线	211
6.2.4	主要参数	213
6.2.5	光电三极管的检测与识别	214
6.2.6	应用电路	214
6.3	发光二极管	215
6.3.1	发光二极管基本知识	215
6.3.2	LED 特性	219
6.3.3	LED 参数	220
6.3.4	术语及应用	222
6.3.5	红外发光二极管	223

6.3.6 其他发光二极管	227
6.3.7 发光二极管的封装	235
6.3.8 LED 显示器	236
6.3.9 LED 显示屏	239
6.3.10 发光二极管的驱动电路	241
6.3.11 应用与检测	243
6.4 光电耦合器	245
6.4.1 基本知识	246
6.4.2 工作原理及特性	247
6.4.3 主要参数及特点	248
6.4.4 检测与应用	249
6.5 激光二极管	251
6.5.1 基本知识	251
6.5.2 产生机理和工作原理	254
6.5.3 主要特性和参数	255
6.5.4 常见激光二极管类型及特点	258
6.5.5 应用与检测	261
第 7 章 特殊二极管	263
7.1 稳压管	263
7.1.1 稳压管基本知识	263
7.1.2 工作原理及特性曲线	265
7.1.3 技术参数	266
7.1.4 特殊的稳压管稳压方式	268
7.1.5 稳压电路	269
7.1.6 其他应用	271
7.1.7 三端稳压管	272
7.1.8 稳压管的辨别与检测	276
7.2 变容二极管	277
7.2.1 变容二极管基本知识	277
7.2.2 工作原理及特性	278
7.2.3 主要参数	279
7.2.4 应用与检测	281
7.3 肖特基二极管	282
7.3.1 肖特基二极管基本知识	282
7.3.2 工作原理与特性	284
7.3.3 特点与参数	284
7.3.4 应用与检测	285
7.4 PIN 二极管	286
7.4.1 基本知识	286

7.4.2 特性与参数	288
7.4.3 典型应用	290
7.5 其他二极管	291
7.5.1 隧道二极管	291
7.5.2 快恢复二极管	294
7.5.3 双向二极管	297
7.5.4 其他特殊二极管	300
附录 A 晶体管的封装形式	317

第 1 章 PN 结

PN 结是一种简单而神奇的结构，它是半导体器件和集成电路的基本构件，是现代电子和微电子技术的基石。

一个 PN 结可构成一个二极管；两个 PN 结可以做成一个三极管；三个 PN 结便可形成一个电力电子器件——晶闸管；四个 PN 结就可构成双向晶闸管；一块集成电路中会有许许多多的 PN 结。当然这不是 PN 结的简单叠加和堆积，而是要有精确设计为前提、精细材料作基础、精密工艺作保障的。

PN 结的性能特点不仅取决于材料和制造工艺，而且与外加电压的大小和方向有关，还明显受工作环境条件的影响。

PN 结都是用什么材料制成的？工作原理是什么？又有什么性能特点呢？

1.1 制造 PN 结的材料——半导体

半导体是一种晶体，拥有整齐的结构和规则的几何形状。半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间，是单向导电材料；它可以形成 PN 结，进而制造各种半导体器件和集成电路。半导体对光照、温度、湿度、电场、磁场、压力等外界因素的变化通常十分敏感。目前应用最广的半导体材料是硅、碳化硅、锗和砷化镓等。

1.1.1 半导体基本知识

1. 常用半导体材料

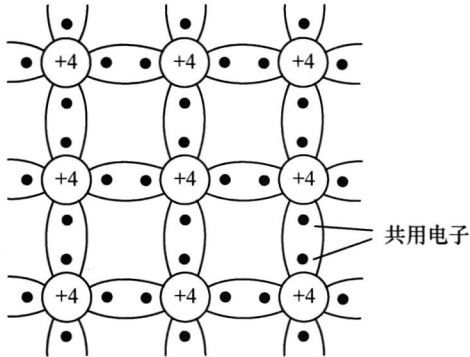
常用半导体材料有元素半导体、化合物半导体、非晶态与液态半导体、本征半导体和杂质半导体，其中杂质半导体中又有 P 型半导体和 N 型半导体。

1) 元素半导体	元素半导体是由单一元素制成的半导体材料。在元素周期表中有多种具有半导体特性的元素，其中主要有硅、锗、硒等，以硅材料应用最为广泛。
2) 化合物半导体	(1) 无机化合物半导体：可分为二元系、三元系、多元系等。二元系化合物半导体是由两种元素化合而成的，主要有碳化硅、砷化镓、磷化铟、碲化锌、硫化锌等化合物。三元系和多元系化合物半导体主要有镓铝砷固溶体、镓锗砷磷固溶体等。 化合物半导体器件具有优良特性，在高频、大功率、高效率等方面与硅基集成电路形成互补，广泛用于无线通信、电力电子、光纤通信等领域。例如，以砷化镓 (GaAs) 为代表的第二代半导体材料已广泛应用于无线及光电通信中；以碳化硅 (SiC)、氮化镓 (GaN) 为代表的第三代半导体材料能制成大功率模块、SiCMOSFET、IGBT 等新型半导体器件。 (2) 有机化合物半导体：有机化合物半导体主要有萘、聚丙烯腈和一些芳香族化合物等几十种，但它们真正用作半导体器件的制造材料尚待时日。

3) 非晶态与液态半导体	非晶态与液态半导体同晶态半导体的最大区别是不具有规则排列的晶体结构。非晶态半导体的导电特性也比较复杂，其实用技术仍在试验和深入研究中。
--------------	---

2. 本征半导体及其性能特点

本征半导体是没有掺入杂质且无晶格缺陷的纯净半导体。

1) 常用本征半导体的原子结构	最常用的本征半导体硅和锗都是四价元素，其原子结构的最外层有 4 个电子，每个电子带一个负电荷；原子核带有 4 个正电荷，电子围绕原子核转动，整个原子呈电中性。
2) 共价键结构 在硅（或锗）半导体的晶体结构中，每一个原子都与相邻的四个原子结合在一起，组成共价键结构，如图 1-1 所示。	 图 1-1 硅晶体的共价键结构
3) 共用电子	相邻两个原子的一对外层电子不但各自围绕自身所属的原子核运动，而且出现在相邻原子所属的轨道上，成为共用电子，如图 1-1 所示。
4) 本征激发	共价键中的共用电子从外界获得一定的能量（如光照、温升、电磁场激发等）就可能挣脱共价键的束缚而成为自由电子。这种现象称为本征激发。
5) 电子-空穴对	共价键中的共用电子受激发成为自由电子的同时，在共价键中便留下一个空位（即空穴）。这种成对出现的自由电子与空穴称为电子-空穴对。
6) 复合	当自由电子在运动过程中遇到空穴时会填充进去恢复一个共价键，并导致一个电子-空穴对的消失，这一过程称为复合。复合是激发的逆过程。
7) 空穴运动	在本征半导体中，当空穴出现时，相邻原子的电子会移动过来填补这个空穴而使相邻原子的共价键中出现一个新的空穴，新空穴又会被相邻原子的电子填补，再出现新的空穴，如此等等。这种电子填补空穴的运动相当于带正电荷的空穴在运动，且运动方向与电子运动方向相反。这种运动被称为空穴运动。通常把空穴看成是一种带正电荷的载流子（即运载电荷的粒子）。
8) 本征导电	电子和空穴都是能自由移动而成为运载电荷的粒子，所以都被称为载流子。电子的移动称为电子导电，空穴的移动称为空穴导电。由于电子、空穴的移动而形成的混合型导电称为本征导电。
9) 动态平衡	在一定温度下，本征半导体中电子-空穴对的产生与复合同时存在，当两者速度相等时便形成相对平衡（即动态平衡）。达到动态平衡的本征半导体具有一定的载流子浓度，也具有一定的电导率。
10) 电子电流和空穴电流	在外加电场的作用下，自由电子产生的定向移动形成电子电流；电子在一定的方向依次填补空穴，犹如空穴产生了定向移动，形成空穴电流。电子电流加空穴电流就是本征半导体的电流。自由电子和空穴所带电荷极性不同，运动方向也相反。

3. 杂质半导体

杂质半导体是通过扩散工艺，在本征半导体中掺入少量杂质元素而形成的半导体。半导体中的杂质对其电导率的影响非常大。杂质半导体一般可分为带负电荷的 N 型半导体和带正电荷的 P 型半导体，它们是在本征半导体中扩散不同的杂质而形成的两种类型的半导体。

1) P 型半导体 P 型半导体（也称空穴型半导体）是在纯净的硅或锗等半导体材料中加入微量三价元素硼、铟、镓或铝等形成的以空穴导电为主的半导体。	在 P 型半导体中，带正电荷的空穴为多数载流子，带负电荷的自由电子为少数载流子，如图 1-2 所示。图中，硼元素在结构中顶替了一个硅原子，因硼外层只有 3 个电子，使得与硼相连的 4 个原子结构元中有一个是单电子在运转，于是就有了电子空位，即空穴。 图 1-2 空穴的产生
2) N 型半导体 N 型半导体（也称电子型半导体）是在纯净硅或锗等半导体材料中加入微量五价元素磷、锑、砷等形成的以电子导电为主的半导体，如图 1-3 所示。图中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。	在合适范围内，掺入的杂质越多，多数载流子（即自由电子）的浓度就越高，导电性能就越强。 图 1-3 自由电子的形成

4. 碳化硅半导体

碳化硅（俗称金刚砂，简称 SiC）为硅与碳组成的化合物，碳化硅在自然界以矿物的形式存在，碳化硅约有 250 种结晶形态。纯的碳化硅是无色的，碳化硅耐温可高达 2000℃ 以上。

1) 碳化硅与其他半导体材料性能比较 碳化硅半导体和其他半导体材料主要性能比	碳化硅半导体具有禁带宽度大、电子漂移速度快、击穿电场强度高、热导率好、介电常数低、抗辐射能力强等优良的物理化学性能和电学特性。在高温、高频、大功率、抗辐射、不挥发存储器、短波光电子器件和光电集成电路等场合和领域是理想的半导体材料。
--	--

较见表 1-1。

表 1-1 主要半导体材料性能比较

	硅	砷化镓	氮化镓	SiC
大功率适用性	中	低	高	高
高频适用性	低	高	高	中
高温适用性	差	差	好	好
低成本衬底	是	否	是	否

2) 主要性能

在碳化硅中掺入杂质氮或磷可以形成 N 型半导体，掺入杂质三价元素铝、硼、镓或铍可以形成 P 型半导体。大量掺杂硼、铝或氮的碳化硅可具备与金属比拟的电导率，甚至可以使碳化硅在 1.5K 的温度下拥有超导性。

碳化硅二极管没有普通二极管开关时的反向恢复电流，其导通与关断状态间的转换速度非常快，能耗降低 70%，能够在宽温度范围内保持高效能。

3) 主要应用

碳化硅在半导体、太阳能、压电晶体等领域主要用于制造半导体与电子元件、紫外线检测器、耐热元件和高压器件。用碳化硅制造的大功率电子器件主要有场效应管（MOSFET、JFET）、双极晶体管、开关二极管、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、蓝光 LED、太阳能电池等，如图 1-4 所示。

碳化硅 MOSFET 将会取代太阳能逆变器中的高压硅绝缘栅双极晶体管，这样不仅可降低 50%的能耗，还不需要特殊的驱动电路，且工作频率更高。

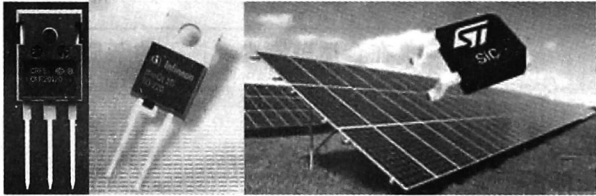


图 1-4 碳化硅半导体应用

5. 砷化镓

砷化镓（简称 GaAs）是一种重要的化合物半导体材料。

1) 分类

- (1) 单晶。
- (2) 外延材料。砷化镓外延材料是采用气相沉积或液相沉积等方法，使镓、砷源或其衍生物在以砷化镓或其他材料为衬底的表面上生成的砷化镓单晶薄膜。衬底和外延层材料相同的为同质结外延层；材料不同的为异质结外延层。外延材料可以是单层结构，也可以是多层结构。

2) 特性

- (1) 砷化镓半导体材料与传统的硅材料相比，具有很高的电子迁移率（约为硅材料的 5.7 倍）以及宽的禁带结构，同样条件下可以更快地传导电流。
- (2) 砷化镓半导体材料具有直接带隙及宽禁带结构等特点，光发射效率高于硅、锗等半导体。
- (3) 砷化镓半导体具有硅、锗半导体不具备的负阻效应。当对砷化镓半导体施加直流电压时，从零伏（0V）开始，电流与电压呈线性关系，电流随电压的升高而增大，符合欧姆定律。因此砷化镓是一种具有欧姆性质的电阻材料；但当外加电场强度超过 3kV/cm 以后，流过砷化镓半导体材料的电流，却随着电压

2) 特性	的升高而减小，即砷化镓具有负阻效应。3kV/cm 的电场强度称为砷化镓负阻效应的阈值。利用这种负阻效应，砷化镓可以制作微波固体振荡器。
	(4) 微波振荡器采用砷化镓器件后，振荡频率可达 20GHz 或者更高。
	(5) 砷化镓器件具有良好的高频（高于 250GHz）、高温、低温性能和噪声小、抗辐射能力强等优点。
	(6) GaAs 能够发光，可以用来制作红外发光二极管、光探测器、半导体激光器等。
	(7) 用砷化镓制作的晶体三极管的放大倍数小、导热性差、功率较小。
	(8) 砷化镓还适合制作微波器件、超晶格结构材料、集成电路、换能器件等。
3) 应用	砷化镓广泛应用在卫星通信、微波点对点传输、雷达系统、遥控、DVD、计算机外设、照明、光电集成、太阳能电池、移动通信、GPS 导航等领域。

1.1.2 半导体的性能特点及参数

1. 性能特点

半导体与导体、绝缘体的区别不仅在于导电能力的不同，更重要的是半导体具有独特的导电特性。

1) 两种载流子	导体内只有一种载流子，即自由电子；而半导体内有两种载流子，即带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。
2) 掺杂性	在纯净的半导体中掺入特定的适量杂质，半导体的导电性能就会极大地提高并可控。利用这一特性可以制造晶体二极管、晶体三极管、晶闸管等多种电子器件。
3) 光电特性	有些半导体在光线照射时导电能力很强，但无光线照射时却不导电。光电二极管、光电三极管等光电器件就是利用半导体的光电特性制成的。
4) 单向导电特性	半导体的导电具有方向性。当两端施加正向电压时导通，加反向电压时截止。整流二极管、开关二极管和检波二极管等器件的工作原理都是基于这一特性。
5) 温度特性	当环境温度升高时，有些半导体的电阻会随着温度的上升而降低，导电能力显著增强，具有负温度系数；也有的半导体却具有相反的温度特性，其电阻随着温度的升高而增加，导电能力显著减弱，具有正温度系数。以此可制造热敏电阻等温度敏感元件。

2. 特征参数

半导体材料的特征参数反映不同半导体材料彼此之间的差别和在不同情况下的差异。

1) 禁带宽度	禁带宽度的大小主要与半导体的晶体结构和原子的结合性质等有关。禁带宽度实际上是反映电子被束缚强弱程度的一个物理量，是半导体材料原子中的电子从束缚状态激发到自由状态所需要的最小能量。半导体材料不同，禁带宽度也不同。
2) 电阻率	半导体材料电阻率的大小与所含杂质的量有关，并对环境温度、光照、电磁场、压力等外界条件的变化具有很高的敏感性。半导体电阻率的变化范围通常为 $10^{-3} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

3) 载流子迁移率	载流子迁移率是指载流子（自由电子和空穴）在单位电场作用下的平均漂移速度。载流子运动越快，迁移率越大，电阻越小，功耗也越小，电流承载能力越大；载流子运动越慢，迁移率越小，电阻越大，电流承载能力越小。同一种半导体材料中的载流子类型不同，迁移率也不同，一般电子的迁移率高于空穴。不同半导体材料的载流子迁移率也往往是不同的。载流子迁移率反映材料的导电能力并影响器件的最高工作频率。
4) 位错密度	位错是晶体中最常见的一类晶体缺陷。位错密度可以用来衡量半导体单晶材料晶格完整性的程度。 半导体材料特征参数的数值与材料中的杂质和晶体缺陷密切相关。例如，半导体材料的电阻率因杂质类型和数量的不同而大范围地变化；而载流子迁移率却随着杂质和晶体缺陷的增加而减小。

1.2 PN 结的生成

在半导体基片上通过特定工艺可以形成 P 型半导体和 N 型半导体的交界面，邻近交界面的区域通常称为 PN 结。PN 结有同质结和异质结两种。用相同的半导体材料制成的 PN 结叫同质结，用不同的半导体材料制成的 PN 结叫异质结。

1.2.1 PN 结的形成过程

1. 概念术语

1) 空间电荷区	在 P 型半导体和 N 型半导体结合处附近，扩散到 P 区的自由电子与空穴复合，扩散到 N 区的空穴与自由电子复合。于是在 P 型半导体和 N 型半导体的结合处附近的 P 型区存有负载流子，N 型区存有正载流子，这个存有不能移动载流子的区间称为空间电荷区。
2) 扩散运动	扩散运动是指载流子从高浓度区域向低浓度区域的运动。
3) 内电场的形成	由于正负载流子的扩散和存在，空间电荷区形成内电场。空间电荷区加宽，内电场会增强。内电场的方向是由 N 区指向 P 区，它能减缓和阻止扩散运动的进行。
4) 漂移运动	载流子在内电场力作用下的运动称为漂移运动。运动方向与扩散运动的方向相反。
5) 多子与少子	在 N 型半导体中，浓度大于空穴的自由电子称为多子（即多数载流子）；在 P 型半导体中，空穴的浓度大于自由电子的浓度，多子即为空穴。 在 N 型半导体中，浓度小于自由电子的空穴为少子（即少数载流子）；在 P 型半导体中，浓度小于空穴的自由电子称为少子。
6) 电子流	在纯净硅晶体上施加电压时，晶体内的自由电子很容易被吸引移向正电压端而形成电流（即电子流），它是半导体中的一种电流形式。
7) 空穴流	电子跳出形成的空穴会有邻近原子的电子来填补而在原来位置形成一个新的空穴，新空穴又会有邻近的电子来补充。这个填补空穴的过程就像空穴在晶体结构中从一个地方移到另一个地方从而形成了空穴流。

2. PN 结形成机理

(1) 在由 P 型半导体和 N 型半导体结合区的两边，电子和空穴的浓度是不同的，这种浓度的差别使电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。 扩散的结果使 P 区一边失去空穴，留下了带负电荷的离子；N 区一边失去电子，留下了带正电荷的离子。半导体中的离子是不能任意移动的，也不参与导电。这些不能移动的带电离子通常称为空间电荷，它们集中在 P 区和 N 区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，即 PN 结。
(2) 空间电荷区内正负离子间的相互作用形成了一个内电场。这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移，使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。漂移运动使内电场增强。
(3) 从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面附近 P 区所失去的空穴，从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面附近 N 区所失去的电子，这就使空间电荷减少，内电场减弱。
(4) 在空间电荷区内，如果多数载流子几乎都扩散到对方，或被对方扩散过来的多数载流子复合，以致使多数载流子被消耗殆尽，所以又称此区域为耗尽区。耗尽区的特点是电阻率很高，为高电阻区。

3. PN 结的平衡状态

载流子的扩散运动使空间电荷区加宽，内电场增强。内电场有利于少子的漂移而不利于多子的扩散；而漂移运动使空间电荷区变窄，内电场减弱，又有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时，交界面形成稳定的空间电荷区，即 PN 结处于动态平衡状态。 当 PN 结内的温度均匀、稳定，没有外加电场，外加磁场、光照射等外界因素的作用时，宏观上达到稳定的平衡状态称为 PN 结的平衡状态。

1.2.2 PN 结的特性

1. 导电特性

1) 单向导电	当在 PN 结上外加电压时，如果 P 型边接正极，N 型边接负极，电流便从 P 型一边流向 N 型一边；PN 结呈低阻特性，电流容易通过。如果 N 型边接外加电压的正极，P 型边接电压负极，PN 结呈高阻特性，电流很难流过。这就是 PN 结的单向导电性。利用它的单向导电特性可以制造整流二极管、开关二极管和检波二极管等。
2) PN 结的正偏压和正向电流	当外加电压使 PN 结 P 区的电位高于 N 区的电位时，外加电压称为正向电压，简称正偏压或正偏，这时由 P 区流向 N 区的电流称为正向电流。
3) PN 结的反偏压和反向饱和电流	当外加电压使 PN 结 P 区的电位低于 N 区的电位时，外加电压称为反向电压，简称反偏压或反偏，此时由 N 区流向 P 区的电流称为反向电流。当反向电流变得极其微小、且不随外加电压改变而变化的电流称为反向饱和电流。