



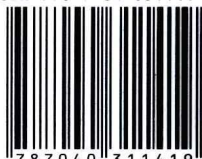
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电子学原理与应用

麻寿光 主编



ISBN 978-7-04-031141-9



9 787040 311419 >

定价 40.90元



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电子学原理与应用

Dianzixue Yuanli yu Yingyong

麻寿光 主编

麻寿光 葛春亮 张寅孩 杜晶晶 鲍佳 编

 高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,吸收了国内外同类优秀教材的主体思想、内容、方法和手段,并将作者多年的教学、科研经验有机融合到教材中。

本书内容包括:固态电子学、二极管与二极管电路、场效应管、双极型三极管、小信号放大器、功率放大器、运算放大器、振荡器、电子控制器件和电路、直流稳压电源。

扎实的理论功底与将基本原理转化到工程应用中的技能是创新的要素。本书以基本的物理概念和基本的数学分析过程为基础,引出由器件基本特性构成的电路模型,这个过程尽可能论据充足,使读者充分理解不同的工作条件下,如何合理建立相应的电路模型。为适应现代微电子技术发展的趋势,将 MOSFET 作为重点内容介绍。从 MOS 电容的特性入手,建立 MOSFET 的导电模型,并对高密度 MOS 集成电路中的一些问题及解决办法做较详细介绍。电子技术的应用领域不断拓展,新的技术与器件层出不穷,本教材内容的选择尽可能反映当前电子新技术在工业领域的新应用。在基本内容的选取上,充分体现了当前电子工程应用中模拟与数字、线性与非线性等相互结合的特点。本书使用相当多的篇幅,通过工程实例讨论了电磁兼容问题的解决方案,将为工程技术人员设计一个可靠的电子产品提供有用的思路。

本书适于作为高等学校电气信息、电子信息类专业模拟电子技术课程的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子学原理与应用/麻寿光主编. —北京:高等教育出版社,2011.1

ISBN 978-7-04-031141-9

I. ①电… II. ①麻… III. ①电子学-高等学校-教材 IV. ①TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 242537 号

策划编辑 王勇莉 责任编辑 李葛平 封面设计 于文燕 责任绘图 尹莉  
版式设计 余杨 责任校对 王超 责任印制 尤静

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a> <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a> <a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 刷	北京宏信印刷厂	畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×1092 1/16	版 次	2011 年 1 月第 1 版
印 张	28.25	印 次	2011 年 1 月第 1 次印刷
字 数	690 000	定 价	40.90 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 31141-00

# 前 言

本书是为电气信息、电子信息科学、通信工程等本科专业学生学习模拟电子技术课程编写的,也可作为从事电子设计的工程技术人员的参考书。本书内容是电子学的基本原理及工程应用。内容共有十章:

第1章 固态电子学;第2章 二极管与二极管电路;第3章 场效应管;第4章 双极型三极管;第5章 小信号放大器;第6章 功率放大器;第7章 运算放大器;第8章 振荡器;第9章 电子控制器件和电路;第10章 直流稳压电源。

数学、物理、化学、电子工程、机械工程、材料工程以及冶金学等学科的有机交叉,奠定了现代电子技术迅速发展的理论基础。本书名为“电子学原理与应用”,与其他同类教材相比具有如下特点:

1. 基本原理力求透彻。以基本的物理概念和基本的数学分析过程为基础,引出由器件基本特性构成的电路模型,尽可能论据充足,使读者充分理解不同的工作条件下,如何合理建立相应的电路模型。对于同一种器件给出多种模型与分析方法并进行比较,其中较详细地介绍求解非线性器件电路的迭代法、处理器件容差问题的最坏情况分析法与蒙特卡罗分析法等,有利于读者掌握现代电子设计的基本工具,如 Spice、Multisim 等。

2. 为顺应现代微电子技术发展的趋势,本书将 MOSFET 作为重点内容介绍。从 MOS 电容的特性入手,建立 MOSFET 的导电模型;介绍了 MOS 管尺寸减小后对漏极电流、栅极电容、延迟时间、电路的功率密度、截止频率、场强限制等器件性能的影响。这样处理便于了解电路设计的内在本质,并为有志于从事微电子电路设计的读者打下进一步深造的良好基础。

3. 电子技术的应用领域不断拓展,新的技术与器件层出不穷,本教材内容的编写尽可能反映当前电子新技术在工业领域的应用。如新型的功率器件 IGBT 是 MOSFET 与 BJT 的有机结合,在现代电力电子技术中起重要作用。本教材详细介绍了这种器件以及驱动电路,并以 1 kW 以下三相逆变电路为例,详细地分析工程实用电路的设计与制作要领。书中许多内容均为作者多年工程研究实践的总结,相信有志从事电子设计的读者能从中获益。

4. 本书是为电气信息类专业学生学习模拟电子技术课程编写的。在基本内容的选择上,充分体现了当前电子工程应用中模拟与数字、线性与非线性等相互结合的特点。读者可以发现本书的内容既传统又有新意。说其传统,因为要解决电子工程问题总离不开传统的物理、化学及数学的经典概念;说其有新意,因为本书介绍许多新的器件与电路拓扑,让人耳目一新。

5. 知识的综合应用是解决问题与创新的基础。为了讨论问题的方便,许多时候需要用集总参数假设与线性电路模型,但是解决电子系统设计中的电磁兼容问题,如共模干扰、串模干扰、冲激干扰、共地干扰、电磁屏蔽等,所依据的理论基础与集总参数假设是相悖的。本书使用相当的篇幅,通过工程实例讨论电磁兼容问题的解决方案,虽然充分理解它需要一定的经验积累,但及早了解它将为工程技术人员设计一个可靠的电子产品提供有用的思路。

为便于读者掌握书中的内容,大部分章节结尾附有练习题,并给出答案。

我国高等教育越来越重视创新型、应用型人才的培养,要达到该目标教材是关键。一本好的教科书能启迪睿智,激发钻研热情,作者希望本书能为人才培养这一战略目标贡献微力。虽经几易书稿,但因能力所限错误难免,恳请读者指正。

本书编写分工如下:杜晶晶编写第2章与索引;葛春亮编写第4章;鲍佳编写第7章;张寅孩编写第9章;其余各章由麻寿光编写并负责全书的统稿。于秀香完成大部分的文字输入。

王传新教授在百忙中不辞辛苦仔细审阅了书稿,提出许多宝贵的修改意见和建议,对提高本书的质量起了重要的作用,在此表示衷心的感谢。

在哈佛大学工作的麻浩波博士和孔媛博士于本书编写伊始为作者收集了大量的资料。本书的编写过程得到浙江理工大学教务处和信息电子学院有关领导的全力支持。对以上所有同志一并致以诚挚的谢意。

作者

2010年4月

于杭州

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010)58581897/58581896/58581879

**传 真：**(010)82086060

**E - mail：**dd@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

**邮 编：**100120

**购书请拨打 电话：**(010)58581118

# 目 录

第 1 章 固态电子学	1	2.4.1 反向偏置	28
1.1 固态电子学材料	1	2.4.2 零偏置	28
1.2 共价键模型	2	2.4.3 正向偏置	28
1.3 半导体中的漂移电流与迁移率	5	2.5 二极管的温度系数	29
1.3.1 漂移电流	5	2.6 反向偏置二极管	31
1.3.2 迁移率	5	2.6.1 实际二极管的饱和电流	31
1.3.3 饱和速度	6	2.6.2 反向击穿电压	32
1.4 本征硅的电阻率	6	2.6.3 击穿区的二极管模型	32
1.5 半导体掺杂	7	2.7 PN 结电容	33
1.5.1 硅晶体中的施主杂质	7	2.7.1 反向偏置电容	33
1.5.2 硅晶体中的受主原子	8	2.7.2 正向偏置电容	33
1.6 掺杂半导体中电子与空穴 的浓度	9	2.8 肖特基势垒二极管	33
1.6.1 N 型材料( $N_D > N_A$ )	9	2.9 二极管模型与版图	34
1.6.2 P 型材料( $N_A > N_D$ )	9	2.10 二极管电路	35
1.7 掺杂半导体的迁移率与电阻率	10	2.10.1 负载线分析	36
1.8 扩散电流	13	2.10.2 用数学模型分析	37
1.9 总电流	14	2.10.3 用理想二极管模型分析	38
1.10 能带模型	14	2.10.4 恒压降二极管模型分析	40
1.10.1 本征半导体内的电子- 空穴对	15	2.10.5 模型比较与讨论	41
1.10.2 掺杂半导体的能带模型	15	2.11 多二极管电路	41
1.10.3 补偿半导体	16	2.11.1 含两个二极管电路分析	41
小结	16	2.11.2 含三个二极管电路分析	42
习题	18	2.12 工作在击穿区的二极管	43
第 2 章 二极管与二极管电路	21	2.12.1 负载线分析	44
2.1 PN 结二极管	21	2.12.2 分段线性化模型分析	44
2.1.1 PN 结的静态电荷	22	2.12.3 稳压器	44
2.1.2 二极管内的电流	24	2.12.4 考虑稳压二极管齐纳电阻 电路分析	45
2.2 二极管的伏安特性	25	2.12.5 电源与负载的稳定性	46
2.3 二极管的数学模型	26	2.13 半波整流电路	46
2.4 反向偏置、零偏置、正向偏置下的 二极管特性	28	2.13.1 电阻负载的半波整流 电路	47
		2.13.2 滤波电容	48



2.13.3 有RC负载的半波整流 电路.....	49	3.2.5 MOSFET 伏安特性的 饱和区 .....	81
2.13.4 纹波电压与导通间隔.....	49	3.2.6 饱和(夹断)区的数学模型 .....	82
2.13.5 二极管电流.....	51	3.2.7 跨导 .....	83
2.13.6 浪涌电流.....	52	3.2.8 沟道长度调制效应 .....	84
2.13.7 额定反向峰值电压.....	52	3.2.9 转移特性与耗尽方式 MOSFET .....	84
2.13.8 二极管功耗.....	52	3.2.10 体效应或衬底灵敏度.....	85
2.13.9 输出负电压的半波整流 电路.....	53	3.3 PMOS管 .....	86
2.14 全波整流电路.....	53	3.4 MOSFET 的电路符号.....	88
2.14.1 输出正电压.....	53	3.5 MOS管制造与布线设计规则.....	89
2.14.2 输出负电压.....	54	3.5.1 最小化特征尺寸与对 准容差 .....	89
2.15 桥式全波整流.....	55	3.5.2 MOS管布线.....	90
2.16 整流电路比较与设计权衡.....	55	3.6 MOS管内的电容.....	91
2.17 直流-直流(DC-DC)变换器 .....	56	3.6.1 工作在导通区的NMOS 管电容 .....	91
2.17.1 升压(boost)变换器 .....	57	3.6.2 工作在饱和状态的MOS 管电容 .....	92
2.17.2 降压(buck)变换器 .....	59	3.6.3 工作在截止状态的MOS 管电容 .....	92
2.18 二极管的动态开关特性.....	61	3.7 SPICE 所用的MOSFET模型 .....	93
2.19 光二极管、太阳能电池与发光 二极管.....	62	3.8 NMOS场效应管偏置电路 分析 .....	95
2.19.1 光二极管与光探测器.....	62	3.9 PMOS场效应管偏置电路 分析.....	103
2.19.2 太阳能电池发电.....	63	3.10 电流源和MOS电流镜 .....	105
2.19.3 发光二极管(LED).....	64	3.10.1 NMOS电流镜的直流 分析 .....	106
小结.....	64	3.10.2 MOS电流镜比率的 改变 .....	107
习题.....	65	3.10.3 电流镜的输出电阻 .....	108
<b>第3章 场效应管</b> .....	<b>73</b>	3.10.4 电流镜的版图布局 .....	109
3.1 MOS电容的特性.....	73	3.10.5 多电流镜 .....	109
3.1.1 电荷聚集区 .....	74	3.11 MOS管的尺寸.....	111
3.1.2 电荷耗尽区 .....	74	3.11.1 漏极电流 .....	111
3.1.3 电荷反型区 .....	75	3.11.2 栅极电容和延迟时间 .....	111
3.2 NMOS管 .....	75	3.11.3 电路和功率密度 .....	111
3.2.1 NMOS管伏安特性的 定性讨论 .....	76		
3.2.2 NMOS管导通区 .....	77		
3.2.3 导通区电阻 .....	79		
3.2.4 MOSFET压控电阻的应用: 压控衰减器;压控高通 滤波器 .....	80		

3.11.4 功率-时延乘积·····	112	4.6 双极型三极管的工作模式·····	139
3.11.5 截止频率·····	112	4.7 双极型三极管的伏安特性·····	140
3.11.6 场强限制·····	113	4.7.1 输出特性曲线·····	140
3.11.7 亚阈导电·····	113	4.7.2 转移特性曲线·····	141
3.12 结型场效应管·····	114	4.7.3 击穿电压·····	142
3.12.1 JFET 的偏置·····	114	4.8 基区少数载流子的运动·····	142
3.12.2 漏源电压对沟道的影响·····	115	4.8.1 基区暂态时间·····	143
3.12.3 N 沟道 JFET 管的伏安特性·····	116	4.8.2 扩散电容·····	145
3.12.4 P 沟道 JFET·····	118	4.9 传输模型的简化·····	145
3.12.5 电路符号与 JFET 模型总结·····	118	4.9.1 截止模式的简化传输模型·····	145
3.12.6 JFET 管的电容·····	119	4.9.2 正向放大模式(小信号)的简化传输模型·····	147
3.13 JFET 与耗尽型 MOSFET 管的偏置·····	119	4.9.3 共发射极电流增益的频率特性·····	148
小结·····	120	4.9.4 跨导·····	149
习题·····	122	4.9.5 饱和模式的模型·····	150
<b>第 4 章 双极型三极管</b> ·····	<b>130</b>	4.10 厄尔利效应和厄尔利电压·····	151
4.1 双极型三极管的物理结构·····	130	4.10.1 厄尔利效应模型·····	151
4.2 NPN 型三极管的传输模型·····	131	4.10.2 厄尔利效应的成因·····	152
4.2.1 正向特性·····	132	4.11 双极型三极管的 SPICE 模型·····	152
4.2.2 反向特性·····	133	4.11.1 定性的描述·····	152
4.2.3 完整偏置状态的传输模型方程·····	134	4.11.2 SPICE 模型方程·····	153
4.3 PNP 型三极管·····	135	4.12 双极型三极管的实际偏置电路·····	155
4.4 三极管传输模型的等效电路表示法·····	136	4.12.1 四电阻偏置电路·····	156
4.5 埃伯尔斯-莫尔模型·····	137	4.12.2 四电阻偏置电路的设计过程·····	157
4.5.1 NPN 型三极管的正向特性·····	137	4.13 电流源和镜像电流源·····	160
4.5.2 NPN 型三极管的反向特性·····	138	4.13.1 三极管电流镜·····	160
4.5.3 NPN 型三极管的埃伯尔斯-莫尔模型·····	138	4.13.2 电流镜电路的分析·····	160
4.5.4 PNP 型三极管的埃伯尔斯-莫尔模型·····	138	4.13.3 改变三极管电流镜比率·····	161
4.5.5 埃伯尔斯-莫尔模型的等效电路·····	138	4.13.4 电流镜的输出电阻·····	163
		4.14 偏置电路的容差·····	164
		4.14.1 最坏情况(worst-case)分析·····	164
		4.14.2 蒙特卡罗分析法(Monte Carlo Analysis)·····	165

小结 .....	168	5.6.1 共集电极放大器的主要特性 .....	199
习题 .....	169	5.6.2 共漏极放大器的主要特性 .....	201
<b>第 5 章 小信号放大器</b> .....	<b>177</b>	5.7 共基极(Common - Base)与共栅极(Common - Gate)放大器 .....	202
5.1 增益计量 .....	177	5.7.1 共基极放大器的主要参数 .....	202
5.2 共发射极放大器(Common - Emitter Amplifier) .....	183	5.7.2 共栅极放大器的主要参数 .....	204
5.2.1 共发射极放大器基本组成 .....	183	5.8 场效应管体效应对放大器性能的影响 .....	204
5.2.2 共发射极放大器直流工作点分析 .....	183	5.8.1 对共源极放大器的影响 .....	205
5.2.3 共发射极放大器交流工作定性分析 .....	184	5.8.2 对共漏极放大器的影响 .....	206
5.2.4 二极管、三极管的小信号模型 .....	186	5.8.3 对共栅极放大器的影响 .....	206
5.2.5 共发射极小信号放大器的电压增益 .....	188	5.9 耦合与旁路电容设计与下限截止频率 .....	207
5.2.6 共发射极放大器的输入电阻和输出电阻 .....	190	5.9.1 共发射极放大器耦合与旁路电容 .....	207
5.3 共源极放大器(Common - Source Amplifier) .....	191	5.9.2 放大器的直流负载和交流负载 .....	208
5.3.1 共源极放大器的基本组成 .....	191	5.10 多级放大器 .....	209
5.3.2 共源极放大器电路的直流工作点 .....	191	5.10.1 多级电容耦合交流放大器 .....	210
5.3.3 N 沟道 EMOS 管的小信号模型 .....	192	5.10.2 多级直接耦合放大器 .....	213
5.3.4 四端 MOS 管的体效应 .....	193	5.10.3 达林顿管和共射共基组合结构 .....	215
5.3.5 MOS 管放大器的增益与输入、输出电阻 .....	194	5.10.4 变压器耦合放大器 .....	216
5.3.6 结型场效应管(JFET)的小信号模型 .....	195	5.11 电流源电路设计 .....	219
5.4 增益稳定的共发射极放大器 .....	195	5.11.1 电流源的品质因数 .....	219
5.4.1 基本放大器增益 .....	196	5.11.2 高输出电阻电流源 .....	219
5.4.2 输入电压的线性范围 .....	196	5.11.3 多路输出电流源 .....	220
5.4.3 输入电阻与输出电阻 .....	196	5.12 放大器的频率响应 .....	221
5.4.4 电流增益 .....	198	5.12.1 高频时的双极型三极管模型 .....	221
5.5 增益稳定的共源极放大器 .....	198	5.12.2 单位电流增益频率 $f_T$ .....	222
5.6 共集电极(Common - Collector)与共漏极(Common - Drain)放大器 .....	199	5.12.3 场效应管的高频模型 .....	223
		5.12.4 基区电阻的影响与共发射极放大器的高频限制 .....	223

5.12.5 共发射极放大器的增益 带宽积 .....	225	7.4.2 闭环负反馈放大器增益与 带宽的关系 .....	290
5.12.6 发射极接电阻放大器的 增益带宽关系——开路时间 常数法 .....	226	7.5 运算放大器的频率特性与闭环 反馈稳定性 .....	292
5.12.7 共基极放大器的主极点 ...	228	7.6 运算放大器的应用 .....	296
5.12.8 共栅极放大器的主极点 ...	229	7.6.1 加/减运算 .....	296
5.12.9 共集电极放大器的主 极点 .....	229	7.6.2 有源滤波器 .....	297
5.12.10 共漏极放大器的主极点 ...	230	7.6.3 其他应用 .....	300
5.13 放大器的负反馈 .....	231	7.7 比较器 .....	306
小结 .....	237	小结 .....	308
习题 .....	239	习题 .....	309
<b>第 6 章 功率放大器</b> .....	248	<b>第 8 章 振荡器</b> .....	314
6.1 放大器的类型 .....	248	8.1 振荡器的特点 .....	314
6.2 甲类功率放大器 .....	251	8.2 RC 振荡电路 .....	315
6.3 乙类功率放大器 .....	255	8.2.1 文氏电桥振荡器 .....	315
6.4 甲乙类功率放大器 .....	260	8.2.2 移相振荡器 .....	317
6.4.1 甲乙类功率放大器的偏置 ...	260	8.2.3 双 T 网络振荡器 .....	319
6.4.2 互补对称放大器(OTL) ...	261	8.3 LC 振荡电路 .....	320
6.5 丙类功率放大器 .....	264	8.4 晶体振荡电路 .....	323
小结 .....	268	8.5 弛张振荡器 .....	326
习题 .....	268	8.5.1 单结型三极管振荡器 .....	326
<b>第 7 章 运算放大器</b> .....	272	8.5.2 多谐振荡器 .....	328
7.1 差分放大器 .....	272	8.6 不希望的振荡 .....	329
7.1.1 差分放大器的结构 .....	272	8.7 振荡器的检修 .....	332
7.1.2 差分放大器对干扰噪声的 抑制 .....	273	8.8 直接数字合成(DDS)信号源 .....	333
7.2 差分放大器特性分析 .....	275	8.8.1 DDS 的基本原理 .....	333
7.2.1 差分放大器直流偏置 .....	275	8.8.2 控制与信号频率的关系 .....	335
7.2.2 差动增益 .....	276	8.8.3 直接数字合成信号源的 实现方法 .....	337
7.2.3 共模增益与共模抑制比 .....	277	小结 .....	338
7.2.4 差模传输特性 .....	279	习题 .....	338
7.3 运算放大器 .....	283	<b>第 9 章 电子控制器件和电路</b> .....	343
7.3.1 运算放大器的结构 .....	283	9.1 引言 .....	343
7.3.2 转换速率与功率带宽 .....	285	9.2 晶闸管(SCR) .....	345
7.4 运算放大器的闭环增益设定 .....	287	9.3 全波器件 .....	350
7.4.1 闭环负反馈增益 .....	287	9.4 绝缘栅双极型三极管 .....	354
		9.4.1 IGBT 的结构 .....	355
		9.4.2 导电特性 .....	356

9.4.3 开关特性.....	357	10.2.3 集成电路稳压电源 .....	397
9.4.4 自锁.....	358	10.3 限流保护和限压保护 .....	400
9.4.5 安全工作区.....	358	10.3.1 常规限流保护 .....	400
9.4.6 跨导.....	359	10.3.2 折返式限流保护 .....	401
9.4.7 IR 公司器件编号与 参数说明.....	360	10.3.3 限压保护 .....	403
9.5 高压浮动 MOS 栅极集成驱动 电路(MGDs) .....	362	10.3.4 压敏电阻瞬态保护 .....	405
9.5.1 上桥臂器件的栅极驱动 要求.....	362	10.4 开关式稳压电路 .....	407
9.5.2 典型框图.....	364	10.4.1 开关电源的工作原理 .....	407
9.5.3 上桥臂自举电源.....	365	10.4.2 开关电源的隔离 .....	412
9.5.4 如何计算 MGD 的功耗 .....	367	10.4.3 低噪声开关电源 .....	413
9.5.5 MGDs 驱动应用技术介绍 .....	369	10.5 开关电源设计实例 .....	415
9.6 1 kW 功率以下三相逆变器 应用电路分析.....	375	10.5.1 CS3842A 的功能 .....	415
小结 .....	387	10.5.2 200 kHz、500 W 电源原理 .....	417
习题 .....	389	10.5.3 输入滤波级设计 .....	418
<b>第 10 章 直流稳压电源 .....</b>	<b>393</b>	10.5.4 电源变压器设计 .....	419
10.1 开环稳压电源 .....	393	10.5.5 输出滤波器设计 .....	420
10.2 闭环稳压电源 .....	395	10.5.6 电流传感器(互感器) 计算 .....	422
10.2.1 串联稳压电源原理 .....	395	10.5.7 其他考虑 .....	422
10.2.2 分立元件稳压电源 .....	396	小结 .....	424
		习题 .....	425
		索引 .....	429
		主要参考书目 .....	441

# 第 1 章

## 固态电子学

---

固态材料革新和其后集成电路制造技术的开发,使得电子学和现代信息技术发生根本性变化。现在我们使用硅和其他半导体晶体制作集成电路(IC),在  $4\text{ cm}^2$  的基片上可以制作上千万个元件,其中最有用的,如构成个人计算机和 workstation 的高速微处理器和存储器。现在世界上许多公司已在制作 1 G 甚至存储量更大的存储器芯片,在这些芯片上至少有  $10^9$  个三极管和  $10^9$  个电容,总的元件数超过  $2 \times 10^9$  个。

促使电子系统日新月异的基础是对固态物理学的准确理解,以及将必要的基础理论加以发挥并用到实际制造过程,集成电路的制造就是一个将许多基本原理加以深化的例子。集成电路制造所需知识包括:物理、化学、电工程、机械工程、材料工程以及冶金学等。这些就是基本的理论基础。要使基本原理深化须解决多方面问题,但这使得固态电子学成为一个令人神往的专门领域。

我们研究电路时往往将一个电子电路看成一个“黑匣子”,用一组端部方程描述电路性能。同样地我们也将每个器件的特性用一组端部电压电流方程组表示。但是为了理解器件的底层工作性能,设计师必须超出“黑匣子”的简化模型,了解器件内部特性。由器件基本特性构成的模型有助于我们理解存在的限制条件并合理使用一个特殊的模型。特别是在实验结果是违背原有模型时,这种方法很有效。这一章的目的之一是进一步理解半导体器件的基本工作原理,以便使用与课文相配套的模式。

本章的取材为理解后续章节所涉及的半导体器件的工作特性提供必要的基础。我们从研究晶体的工作特性开始,并以最有用的硅晶体为例,通过研究它的电导率与电阻率讨论它的导电机理。根据用途不同,需要控制它的电导率与电阻率,这一章讨论了相应的掺杂技术。

### 1.1 固态电子学材料

总体上看固态电子学材料分成三种:绝缘体、导体和半导体。主要是根据材料的电阻率  $\rho$  划分。 $\rho$  的单位是  $\Omega \cdot \text{cm}$ 。一般来说绝缘体的电阻率大于  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ,导体的电阻率  $\rho < 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ,半导体的电阻率  $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm} < \rho < 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。例如钻石是最优良的绝缘体,电阻率大于  $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ,而纯铜是良导体,电阻率只有  $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 。半导体的电阻率在导体与半导体之间有很宽的范围,但是可以通过将杂质原子掺入半导体晶体控制它的电阻率。

单质半导体由元素周期表的四价元素构成。

化合物半导体可由元素周期表的第三列和第五列元素化合,或由第二列和第六列元素化合组成化合物半导体。表 1.1 提出某些可能最有用的结合。也有三重化合物,如汞镉铟化物、镓铝砷化合物、镓铟砷化合物以及镓铟磷化合物。

表 1.1 元素周期表中最重要半导体元素(阴影部分)

		III A	IV A	V A	VI A
		5 10.811 <b>B</b> Boron	6 12.011 15 <b>C</b> Carbon	7 14.006 7 <b>N</b> Nitrogen	8 15.999 4 <b>O</b> Oxygen
		13 26.981 5 <b>Al</b> Aluminum	14 28.086 <b>Si</b> Silicon	15 30.973 8 <b>P</b> Phosphorus	16 32.064 <b>S</b> Sulfur
II B					
30 65.37 <b>Zn</b> Zinc		31 69.72 <b>Ga</b> Gallium	32 72.59 <b>Ge</b> Germanium	33 74.922 <b>As</b> Arsenic	34 78.96 <b>Se</b> Selenium
48 112.40 <b>Cd</b> Cadmium		49 114.82 <b>In</b> Indium	50 118.69 <b>Sn</b> Tin	51 121.75 <b>Sb</b> Antimony	52 127.60 <b>Te</b> Tellurium
80 200.59 <b>Hg</b> Mercury		81 204.37 <b>Tl</b> Thallium	82 207.19 <b>Pb</b> Lead	83 208.980 <b>Bi</b> Bismuth	84 (210) <b>Po</b> Polonium

历史上锗是第一种使用的半导体材料。但是,现在硅是最重要的半导体材料。硅有较宽的能级带隙,它的工作温度要比锗高。通过氧化在硅的表面可以生成稳定的氧化物,在制造集成电路时硅比锗好。除了硅之外,砷化镓、磷化铟、碳化硅都是现在经常用的半导体材料,锗也仍在某些场合使用。化合物半导体材料中,砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)是光电领域最重要的半导体材料。这些器件包括发光二极管(LED)、激光和光电传感器。

许多实验室在探究合成钻石、氮化硼、碳化硅以及硅锗合金材料。钻石与氮化硼在室温下是优良的绝缘材料,但是,碳化硅可以在更高温度下(600 °C)作为半导体材料。在硅中添加少量的锗(<10%)近来已显示比纯硅制作的器件性能有所提高。因为硅锗合金(SiGe)性能优良,这一技术已迅速用于射频器件制作,尤其在电信领域得到快速应用。

## 1.2 共价键模型

原子的相互结合可以有无定形、多晶或单晶形式。无定形的结构原子结合杂乱无章,而多晶材料的结构由大量的小晶体组成。最有用的半导体材料是高纯度的单晶半导体。硅原子有四个外层电子,单晶材料的硅原子的四个电子与邻近的四个原子构成共价键,图 1.1 显示其很有规

律的三维原子阵列。在讨论它的工作特性时经常用如图 1.2 所示的简化二维图。

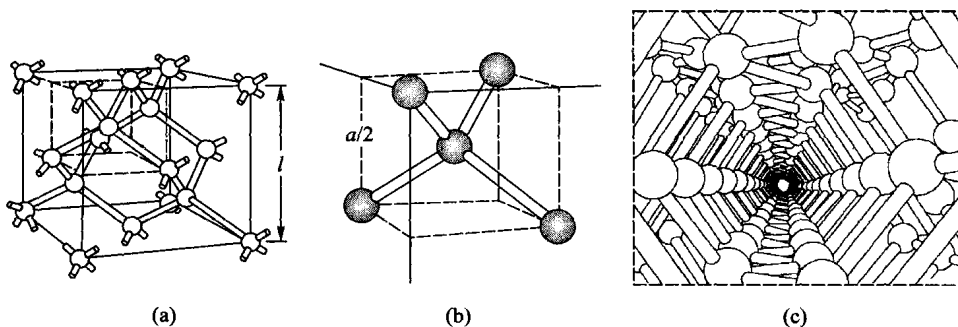


图 1.1 硅晶格结构

(a) 金刚石晶体颗粒, 每边长  $l=0.543 \text{ nm}$  (b) 放大的金刚石晶格, 表明结构中邻近的四个键 (c) 沿结晶轴的图形

在绝对温度 0 K, 所有电子都束缚在晶格的共价键中, 没有可以导电的自由电子, 硅原子的最外层充满电子, 它像绝缘体。随着温度升高, 晶体热能增加, 一些电子从共价键逸出, 成为可导电的自由电子。这种载流子的浓度等于本征载流子浓度 (intrinsic carrier density)  $n_i (\text{cm}^{-3})$ ,  $n_i$  取决于材料与温度:

$$n_i^2 = BT^3 e^{-\frac{E_G}{kT}} \text{ cm}^{-6} \quad (1.1)$$

式中:  $E_G$  为半导体的禁带宽度, 单位 eV;

$k$  为玻耳兹曼常数, 为  $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ;

$T$  为绝对温度, 单位 K;

$B$  为与材料有关的常数, 对硅为  $1.08 \times 10^{31} \text{ K}^{-3} \cdot \text{cm}^{-6}$

禁带宽度  $E_G$  是打破半导体晶格的共价键所需的最小能量, 电子得到该能量就成为可导电的自由电子。表 1.2 列出常见半导体的禁带宽度值。

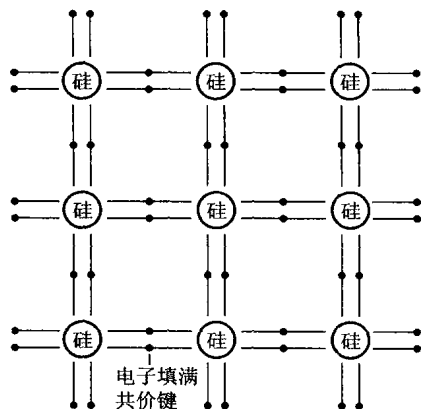


图 1.2 以共价键结合的二维硅晶格, 在 0 K 温度时, 全部共价键与硅原子外层填满电子

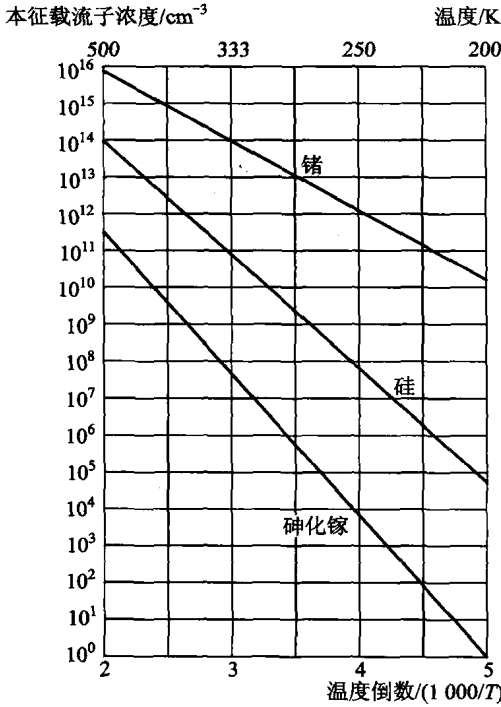
表 1.2 常见半导体材料禁带宽度

半导体	禁带宽度 $E_G/\text{eV}$	半导体	禁带宽度 $E_G/\text{eV}$
碳(金刚石)	5.47	氮化镓	3.49
硅	1.12	磷化铟	1.35
锗	0.66	氮化硼	7.50
锡	0.082	碳化硅	3.26
砷化镓	1.42	硒化镉	1.70

符号  $n$  表示自由电子的浓度, 对本征材料  $n = n_i$ 。本征 (intrinsic) 指纯半导体材料的属性。虽然同一温度下各种半导体有不同的  $n$ , 但是所有材料的  $n$  值都与温度有密切关系。图 1.3 示



出锗、硅和砷化镓几种材料的本征载流子浓度随温度改变的关系。



	$B/(K^{-3} \cdot cm^{-6})$	$E_G/eV$
Si	$1.08 \times 10^{31}$	1.12
Ge	$2.31 \times 10^{30}$	0.66
GaAs	$1.27 \times 10^{29}$	1.42

图 1.3 根据公式 (1.1) 画出的本征载流子浓度与温度的关系

例 1.1 计算常温下硅的本征载流子浓度  $n_i$  的值。

解: 已知由公式 (1.1) 确定  $n_i$ , 从表 1.2 得到  $E_G = 1.12 \text{ eV}$ , 设室温  $T = 300 \text{ K}$ 。

$$n_i^2 = 1.08 \times 10^{31} (K^{-3} \cdot cm^{-6}) (300 \text{ K})^2 e^{\frac{-1.12 \text{ eV}}{(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV}) \times (300 \text{ K})}}$$

$$n_i^2 = 4.52 \times 10^{19} / cm^6 \quad \text{或} \quad n_i = 6.73 \times 10^9 / cm^3$$

检验: 解得的未知量  $n_i^2$  与图 1.3 所示的温度关系曲线相符。

讨论: 为便于计算, 以后我们对室温下的硅材料用  $n_i = 10^{10} / cm^3$ , 硅晶体的原子密度大约是  $5 \times 10^{22} / cm^3$ , 从本例可知, 常温下硅的载流子只占总原子数的  $1/10^{13}$ 。

练习: 计算 300 K 时锗的  $n_i$  值。 [答案:  $n_i = 2.27 \times 10^{13} / cm^3$ ]

图 1.4 中的共价键被打破时, 实际上会产生另一种载流子。由于电子带有的负电荷为  $q = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 当一个电子离开共价键后就会在母原子的外层留下空缺。该空缺带有  $+q$  电荷, 邻近的电子会填补该空缺, 在另一个位置又产生新的空缺。

如前所述, 每个共价键被打破时会产生两个带电粒

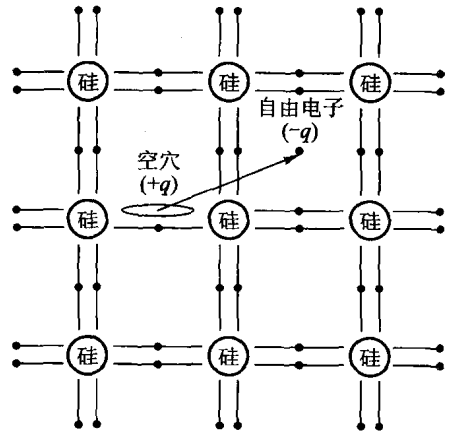


图 1.4 共价键打破后产生电子-空穴对