



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

# 模拟电子技术基础

王济浩 编著

清华大学出版社

TN710  
225



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

TN710  
225

# 模拟电子技术基础

王济浩 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是山东省精品课程“电子技术基础”系列教材中的一本。它是按照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的模拟电子技术基础课程教学基本要求,融合作者多年的教学经验及教学改革的体会编写而成的。全书包括半导体器件、基本放大电路、运算放大器及其应用、负反馈放大器、正弦波和非正弦波信号发生器、功率放大器、稳压电源等内容。为了便于多媒体教学,本书配有翔实的电子课件。

本书主要作为高等院校电气工程、电子信息、计算机及自动化类专业的教材,也可供从事电子技术工作的人员学习参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/王济浩编著. —北京:清华大学出版社,2009.3  
(新坐标大学本科电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-19136-0

I. 模… II. 王… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 202600 号

责任编辑:陈国新 陈志辉

责任校对:时翠兰

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:19.75 字 数:472 千字

版 次:2009 年 3 月第 1 版 印 次:2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元



本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:021487-01



# 编委会名单

**顾问** (按姓氏音节顺序):

- |     |               |
|-----|---------------|
| 李衍达 | 清华大学信息科学技术学院  |
| 邬贺铨 | 中国工程院         |
| 姚建铨 | 天津大学激光与光电子研究所 |

**主任:**

- |     |           |
|-----|-----------|
| 董在望 | 清华大学电子工程系 |
|-----|-----------|

**编委会委员** (按姓氏音节顺序):

- |     |                   |
|-----|-------------------|
| 鲍长春 | 北京工业大学电子信息与控制工程学院 |
| 陈 怡 | 东南大学高教所           |
| 戴瑜兴 | 湖南大学电气与信息工程学院     |
| 方达伟 | 中国计量学院信息工程学院      |
| 甘良才 | 武汉大学电子信息学院通信工程系   |
| 郭树旭 | 吉林大学电子科学与工程学院     |
| 胡学钢 | 合肥工业大学计算机与信息学院    |
| 金伟其 | 北京理工大学信息科技学院光电工程系 |
| 孔 力 | 华中科技大学控制系         |
| 刘振安 | 中国科学技术大学自动化系      |
| 陆大绘 | 清华大学电子工程系         |
| 马建国 | 西南科技大学信息与控制工程学院   |
| 彭启琮 | 电子科技大学通信与信息工程学院   |
| 仇佩亮 | 浙江大学信电系           |
| 沈伯弘 | 北京大学电子学系          |

- 童家榕 复旦大学信息科学与技术学院微电子研究院
- 汪一鸣(女) 苏州大学电子信息学院
- 王福源 郑州大学信息工程学院
- 王华奎 太原理工大学信息与通信工程系
- 王 瑶(女) 美国纽约 Polytechnic 大学
- 王毓银 北京联合大学
- 王子华 上海大学通信学院
- 吴建华 南昌大学电子信息工程学院
- 徐金平 东南大学无线电系
- 阎鸿森 西安交通大学电子与信息工程学院
- 袁占亭 甘肃工业大学
- 乐光新 北京邮电大学电信工程学院
- 翟建设 解放军理工大学气象学院 4 系
- 赵圣之 山东大学信息科学与工程学院
- 张邦宁 解放军理工大学通信工程学院无线通信系
- 张宏科 北京交通大学电子信息工程学院
- 张 泽 内蒙古大学自动化系
- 郑宝玉 南京邮电学院
- 郑继禹 桂林电子工业学院二系
- 周 杰 清华大学自动化系
- 朱茂镒 北京信息工程学院



# 序言

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”是清华大学出版社“新坐标高等理工教材与教学资源体系创新与服务计划”的一个重要项目。进入 21 世纪以来,信息技术和产业迅速发展,加速了技术进步和市场的拓展,对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这个变化必然反映到高等学校的定位和教学要求中,也必然反映到对适用教材的需求。本项目是针对这种需求,为培养层次化和多样化的电子信息类人才提供系列教材。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”面向全国教学研究和教学主导型普通高等学校电子信息类专业的本科教学,覆盖专业基础课和专业课,体现培养知识面宽、知识结构新、适应性强、动手能力强的人才的需要。编写的基本指导思想可概括为:

1. 教材的类型、选题和大纲的确定尽可能符合教学需要,以提高适用性。教材类型初步确定为专业基础课和专业课,专业基础课拟按电子信息大类编写,以体现宽口径;专业课包括本专业和非本专业两种,以利于兼顾专业能力的培养与扩展知识面的需要。选题首先从目前没有或虽有但不符合教学要求的教材开始,逐步扩大。

2. 重视基础知识和基础知识的提炼与更新,反映技术发展的现状和趋势,让学生既有扎实的基础,又了解科学技术发展的现状。

3. 重视工程性内容的引入,理论和实际相结合,培养学生的工程概念和能力。工程教育是多方面的,从教材的角度,要充分利用计算机的普及和多媒体手段的发展,为学生建立工程概念、进行工程实验和设计训练提供条件。

4. 将分析和设计工具与教材内容有机结合,培养学生使用工具的能力。

5. 教材的结构上要符合学生的认识规律,由浅入深,由特殊到一般。叙述上要易读易懂,适合自学。配合教材出版多种形式的教学辅助资料,包括教师手册、学生手册、习题集和习题解答、电子课件等。

本系列教材已经陆续出版了,希望能被更多的教师和学生使用,并热忱地期望将使用过程中发现的问题和改进的建议告诉我们,通过作者和读者之间的互动,必然会形成一批精品教材,为我国的高等教育作出贡献。欢迎对编委会的工作提出宝贵意见。



# 前言

查 晓

山东大学千禧工程 8000

六年以前,为了适应当时教学改革的需要,山东大学电子技术课程组编写出版了一套电子技术基础系列教材。经过几年使用,反应不错。在此期间,本课程被评为山东省精品课程,并获得了山东省优秀教学成果一等奖。现在,我们进一步总结经验、改进不足,吸收最新的电子技术发展成果与教学改革成果,对该套教材进行了修订与编辑。该套教材具有以下的特点:

1. 系列化。该套教材共 6 本,其中《模拟电子技术基础》和《数字电子技术基础》为主教材,《电子技术学习指南与习题解答》对主教材中的全部习题进行解答及提示,《电子技术实验与课程设计》为实验、课程设计的指导书,《VHDL 与可编程逻辑器件设计》和《大学生电子设计竞赛指导》(暂定名)是为进一步加强学生动手能力与创新能力而编写的。这样,电子技术课程的基本理论、实验与设计、创新提高三个环节都有了配套的教材。

2. 立体化。作者为《模拟电子技术基础》和《数字电子技术基础》两书制作了配套电子课件,课件内容翔实,文字简捷,图文并茂,重要的电路图分解讲评;还为《电子技术实验与课程设计》配套了光盘,光盘中附有电子元器件知识、仪器使用方法、实验题目与课程设计项目的演示讲解以及 EWB、Multisim 等 EDA 软件的使用方法等。

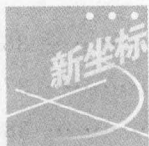
3. 经过教学检验。该套教材是在总结电子技术课程多年教学经验的基础上完成的,并力图反映我们的教学改革成果。在内容安排上由浅入深、循序渐进、层层展开。在实验与课程内容的设计上采用了实际实验与计算机仿真相结合的方式。教材中选编的内容及配套的电子课件都经过了多年教学实践的检验。

4. 反映最新教学要求。在编写时,参考了教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的《电子技术基础课程教学基本要求》。在内容上注重基本概念、基本方法的论述,适当引入新技术。同时,为了满足电子设计自动化教学内容的需要,编写了电子电路的计算机仿真方面的内容。

本书编写过程中,课程组全体教师对编写大纲进行了多次讨论,提出了许多宝贵建议。范爱平老师、高宁老师和姚福安老师对全书进行了审阅并提出了许多修改意见。另外,本书编写过程中还参考了许







# 目 录

<b>第 1 章 半导体器件基础</b> .....	1
1.1 半导体的基础知识 .....	1
1.1.1 本征半导体 .....	2
1.1.2 杂质半导体 .....	3
1.1.3 PN 结及其单向导电性 .....	4
1.1.4 PN 结的击穿特性 .....	7
1.1.5 PN 结的电容效应 .....	8
1.2 半导体二极管 .....	9
1.2.1 半导体二极管的特性曲线 .....	9
1.2.2 二极管的主要参数 .....	10
1.2.3 半导体二极管的模型 .....	11
1.2.4 稳压二极管 .....	14
1.3 半导体三极管 .....	15
1.3.1 BJT 的结构 .....	15
1.3.2 BJT 的内部工作原理 .....	15
1.3.3 BJT 的特性曲线 .....	18
1.3.4 BJT 的主要参数 .....	20
1.3.5 BJT 的模型 .....	23
习题 .....	24
<b>第 2 章 基本放大电路</b> .....	27
2.1 放大电路的一般表示方法及其性能指标 .....	27
2.1.1 放大电路的一般表示方法 .....	28
2.1.2 放大电路的性能指标 .....	29
2.2 单管共射放大电路的工作原理 .....	32
2.2.1 单管共射放大电路中 BJT 的工作状态 .....	32
2.2.2 单管共射放大电路的结构及各元件的作用 .....	33
2.2.3 单管放大电路的工作原理 .....	34
2.2.4 放大电路中常用物理量的表示方法 .....	36

2.3	放大电路的图解分析法	36
2.3.1	放大电路的直流模型分析	37
2.3.2	放大电路的静态分析	38
2.3.3	放大电路的动态分析	39
2.3.4	静态工作点与放大电路的失真	40
2.4	放大电路的动态分析法	42
2.4.1	BJT 的交流小信号模型及放大电路的交流小信号等效电路	42
2.4.2	电路的动态分析	44
2.4.3	静态工作点的稳定	46
2.5	共集和共基放大电路及 BJT 电流源电路	48
2.5.1	共集电极放大电路	48
2.5.2	共基极放大电路	51
2.5.3	BJT 电流源电路	53
2.6	多级放大电路	54
2.6.1	多级放大电路的耦合方式	54
2.6.2	多级放大电路的分析方法	55
2.7	BJT 放大电路的频率响应	57
2.7.1	无源 RC 网络的频率响应	58
2.7.2	BJT 的混合 $\pi$ 模型	62
2.7.3	电容耦合共射放大电路的频率响应	66
	习题	73
<b>第 3 章</b>	<b>场效应管放大器</b>	<b>77</b>
3.1	场效应管	77
3.1.1	绝缘栅型场效应管	77
3.1.2	结型场效应管	81
3.1.3	FET 的主要参数	84
3.1.4	FET 的特点及使用注意事项	85
3.1.5	FET 模型	86
3.2	场效应管放大电路	87
3.2.1	场效应管放大电路的静态偏置	87
3.2.2	场效应管的交流小信号模型	89
3.2.3	场效应管放大电路	90
	习题	93
<b>第 4 章</b>	<b>功率电子电路</b>	<b>95</b>
4.1	概述	95

138	4.1.1	功率放大器的特点	95
139	4.1.2	甲类功率放大器的静态功耗	96
141	4.1.3	甲类功率放大器的动态功耗	96
134	4.1.4	甲类功率放大器的效率	97
139	4.1.5	BJT的工作状态	98
141	4.2	乙类功率放大器	98
141	4.2.1	乙类功率放大器的工作原理	99
140	4.2.2	乙类功率放大器的功率计算	99
140	4.2.3	乙类功率放大器的最大管耗	100
140	4.3	甲乙类功率放大器	101
141	4.3.1	甲乙类功率放大器	101
141	4.3.2	带前置放大级的功率放大器	102
141	4.3.3	BTL电路	105
141	4.4	VMOS管功率放大器	105
141		习题	107
	<b>第5章</b>	<b>集成运算放大器</b>	<b>110</b>
141	5.1	差动放大电路	110
141	5.1.1	集成电路的工艺特点	110
141	5.1.2	直流放大器的零点漂移问题	111
140	5.1.3	差动放大电路的工作原理	112
141	5.1.4	差动放大电路的输入输出方式	115
140	5.1.5	差动放大电路的改进	117
141	5.2	集成运算放大器中的单元电路	117
141	5.2.1	电流源电路	117
141	5.2.2	差动输入级	120
141	5.2.3	输出级	121
141	5.3	集成运放简介	122
141	5.3.1	集成运放的总体结构	122
141	5.3.2	BJT集成运放 F007	122
141	5.3.3	BiCMOS集成运放 F3130	124
141	5.4	集成运算放大器的主要参数	125
141	5.4.1	输入失调参数	126
141	5.4.2	差模特性参数	126
141	5.4.3	共模特性参数	127
141	5.4.4	动态参数	127
141	5.4.5	电源特性参数	127

80	5.4.6 集成运放的封装	128
81	5.5 特殊集成运算放大器	129
82	5.6 集成运算放大器的模型	134
83	5.6.1 集成运算放大器的电压传输特性	134
84	5.6.2 理想运放模型	135
85	5.6.3 实际集成运放的模型	136
86	习题	137
87	<b>第6章 反馈放大电路</b>	140
101	6.1 反馈的基本概念	140
101	6.1.1 反馈的概念	141
102	6.1.2 负反馈放大器的方框图	141
103	6.1.3 负反馈放大器的类型及判别	142
104	6.2 负反馈放大器的四种类型	144
105	6.2.1 电压串联负反馈	145
106	6.2.2 电压并联负反馈	145
107	6.2.3 电流并联负反馈	146
108	6.2.4 电流串联负反馈	147
109	6.3 负反馈对放大器性能的影响	148
110	6.3.1 提高放大倍数的稳定性	148
111	6.3.2 改善放大器的非线性失真	149
112	6.3.3 扩展放大器的通频带	149
113	6.3.4 负反馈对输入电阻和输出电阻的影响	150
114	6.3.5 放大电路中引入负反馈的原则	151
115	6.4 负反馈放大器的计算	152
116	6.4.1 估算的依据	152
117	6.4.2 深度负反馈放大电路的近似估算	153
118	6.5 负反馈放大器的自激振荡及消除方法	158
119	6.5.1 产生自激振荡的原因及条件	158
120	6.5.2 稳定判据及稳定裕度	159
121	6.5.3 放大器的稳定性分析	160
122	6.5.4 自激振荡的消除方法	161
123	习题	164
124	<b>第7章 信号的运算与处理电路</b>	169
125	7.1 比例电路	169
126	7.1.1 集成运放的两个工作区域	169

7.1.2	反相比例电路	170
7.1.3	同相比例电路	171
7.1.4	实际运放比例电路的误差	172
7.2	基本运算电路	175
7.2.1	加法运算电路	175
7.2.2	减法运算电路	176
7.2.3	仪表放大器	178
7.2.4	积分和微分运算电路	178
7.3	对数和反对数运算电路	181
7.3.1	对数运算电路	182
7.3.2	反对数运算电路	182
7.3.3	对数反对数型模拟乘法器	182
7.3.4	精密整流电路	184
7.4	集成模拟乘法器	185
7.4.1	变跨导型模拟乘法器	185
7.4.2	双平衡模拟乘法器	187
7.4.3	模拟乘法器的应用	188
7.5	有源滤波器	189
7.5.1	低通有源滤波器	191
7.5.2	高通有源滤波器	193
7.5.3	带通有源滤波器	194
7.5.4	带阻有源滤波器	196
7.5.5	集成有源滤波器	197
7.6	开关电容滤波器	200
7.6.1	开关电容等效电阻	200
7.6.2	开关电容积分器	201
7.6.3	开关电容滤波器	202
	习题	203
<b>第8章</b>	<b>波形的产生与变换电路</b>	<b>209</b>
8.1	正弦波振荡器的基本原理	209
8.1.1	产生正弦波自激振荡的条件	210
8.1.2	一般正弦波振荡器的工作原理	211
8.1.3	正弦波振荡电路的分析步骤	212
8.2	RC振荡电路	212
8.2.1	RC串并联网络的选频特性	213
8.2.2	RC桥式振荡电路的工作原理	214

8.2.3	RC 移相式振荡电路	216
8.3	LC 振荡电路	217
8.3.1	LC 并联谐振回路的选频特性	217
8.3.2	变压器反馈式 LC 振荡电路	218
8.3.3	三点式 LC 振荡电路	219
8.4	石英晶体振荡电路	222
8.4.1	石英晶体	222
8.4.2	石英晶体振荡电路	224
8.5	比较器	225
8.5.1	单门限比较器	225
8.5.2	迟滞比较器	228
8.5.3	集成电压比较器	230
8.6	方波发生器	231
8.7	三角波及锯齿波信号发生器	233
	习题	234
<b>第 9 章</b>	<b>直流稳压电源</b>	<b>240</b>
9.1	整流与滤波电路	240
9.1.1	单相整流电路	241
9.1.2	电容滤波电路	244
9.1.3	其他滤波电路	246
9.2	串联式稳压电路	246
9.2.1	串联式稳压电路的总体结构	247
9.2.2	稳压电路的性能指标	247
9.2.3	基准电压电路	248
9.3	集成串联式稳压电路	249
9.3.1	三端固定式集成稳压器	250
9.3.2	三端固定式稳压器的使用	252
9.3.3	三端可调式稳压器	253
9.3.4	低压差线性稳压器	254
9.4	集成开关式稳压电路	255
9.4.1	开关稳压电源的工作原理	255
9.4.2	几种常用的开关稳压电源	257
9.4.3	单片集成开关电源	259
	习题	261
<b>第 10 章</b>	<b>电子电路的计算机仿真</b>	<b>265</b>
10.1	Multisim 简介	265

10.1.1	Multisim 的主窗口 .....	266
10.1.2	Multisim 的元器件库 .....	267
10.1.3	Multisim 的仪表工具栏 .....	268
10.1.4	Multisim 的电路分析功能 .....	268
10.2	Multisim 主要仪器的使用 .....	269
10.2.1	数字万用表 .....	270
10.2.2	函数信号发生器 .....	270
10.2.3	示波器 .....	271
10.2.4	逻辑转换仪 .....	273
10.2.5	字信号发生器 .....	273
10.2.6	逻辑分析仪 .....	275
10.3	Multisim 在模拟电路分析中的应用 .....	276
10.3.1	晶体管的输出特性 .....	276
10.3.2	基本放大电路 .....	278
10.3.3	运算放大器 .....	281
10.3.4	有源滤波器 .....	283
10.3.5	正弦信号发生器 .....	286
10.4	Multisim 在数字电路分析中的应用 .....	287
10.4.1	组合逻辑电路分析 .....	287
10.4.2	组合逻辑电路设计 .....	288
10.4.3	组合逻辑器件分析 .....	288
10.4.4	时序逻辑电路分析 .....	290
10.4.5	555 定时器电路分析 .....	291
	习题 .....	292
	参考文献 .....	295



# 半导体器件基础

## 【本章主要内容】

- 半导体材料中有两种载流子,电子和空穴。在纯净的半导体中掺入不同种类的杂质元素,可以分别得到P型半导体和N型半导体。
- 采用一定的工艺措施,在一块半导体材料上制成相邻的P型区和N型区,就形成了PN结。PN结的基本特点是具有单向导电性。
- 半导体二极管是由PN结构成的。二极管的特性和性能用其伏安特性与一系列参数来描述。可以根据不同情况,使用不同的二极管模型来对二极管电路进行分析。
- BJT是由两个PN结构成的三端器件。工作时,有两种载流子参与导电,称为双极型晶体管。BJT是一种电流控制电流型器件,改变基极电流就可以控制集电极电流。在一定条件下,集电极电流与基极电流满足线性放大的关系。这是BJT放大电路的物理基础。
- BJT的特性主要用输入特性曲线和输出特性曲线来描述。其性能可以用一系列参数来表征。在输出特性曲线上可以看出,BJT有三个工作区:饱和区、放大器和截止区。

## 1.1 半导体的基础知识

在物理学中,按照材料导电的能力,可以将它们分为导体和绝缘体两大类。导体中有大量的自由电子,加上电场后,自由电子定向运动,形成电流。因此,导体的电阻率很小,导电能力很强。绝缘体中自由电子很少,加上电场后,几乎没有电流形成。因此,绝缘体的电阻率很大,导电能力很差。还有少数材料的导电能力介于导体和绝缘体之间,称为半导体。半导体具有一些独特的物理特性。正是这些特性使



得半导体材料在电子技术中大放异彩,发挥了极其巨大的作用。

### 1.1.1 本征半导体

常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)和化合物砷化镓(GaAs)等。硅是最常用的一种半导体材料。半导体工业中使用的材料,必须是纯净单一、不含杂质的半导体材料,称为**本征半导体**。这种硅称为本征硅。由于纯净的硅呈现一种晶体结构,所以又称为单晶硅。

本征硅原子的最外层轨道上有四个电子,它们受原子核的束缚力最小,称为**价电子**。元素的许多物理性质和化学性质都是由这些价电子决定的,其导电能力也与价电子有关。研究半导体的特性时,经常用图 1-1 所示的模型表示半导体材料。其中,写着+4的圆圈表示硅原子核和除价电子之外的其余内层电子,称为**惯性核**。大圆圈表示外层电子轨道。上面的四个点表示四个价电子。

本征硅的原子排列有序,呈晶体结构。图 1-2 所示是其晶体结构的示意图。图中画的是二维结构,实际上其晶体结构是三维的。在晶体结构中,硅原子之间靠得很近,每个硅原子的价电子不仅受到自身原子核的吸引,而且还受到相邻原子的吸引,使得它们为相邻两个原子所共有,形成了**共有电子对**,称为**共价键**结构。每个硅原子的四个价电子都通过共价键与周围的四个原子发生作用,相互结合,形成整齐有序的晶体结构。

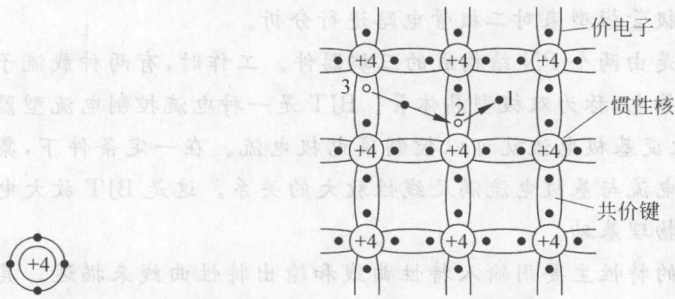


图 1-1 硅原子的简化模型

图 1-2 本征硅的共价键结构

在温度  $T=0K$  时,如果没有外界激发,硅原子的所有价电子都被共价键所束缚,不会形成自由电子,因此,称为**束缚电子**。这时,在硅中不会形成传导电流。但是,与绝缘体材料相比,半导体材料中的价电子受共价键的束缚力较小,只要得到较小的能量,价电子就会摆脱共价键的束缚,成为自由电子。例如,在温度  $T=0K$  时,硅原子中的价电子只要获得  $1.21eV$  的能量,就会变成自由电子。因此,在室温条件下,相当多的价电子都会受到热能激发,变为自由电子。这种物理现象称为**本征激发**。

一个价电子变为自由电子后,在共价键位置上留下了一个空位,这个空位称为**空穴**。空穴是由自由电子本征激发形成的,两者总是成对出现,因此,称为**电子空穴对**。硅原子中,其正负电荷的数量是平衡的。失去一个带负电荷的电子后,它将多出一个正电荷,因此,可以说,空穴是带正电荷的。在半导体材料中,自由电子和空穴的数量是相等的,从宏观上看,它仍然是电中性的。