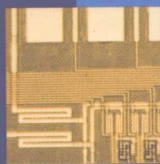




普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

半导体器件物理 学习与考研指导

孟庆巨 孙彦峰 编著



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

半导体器件物理学习与 考研指导

孟庆巨 孙彦峰 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《半导体器件物理(第二版)》(孟庆巨、刘海波、孟庆辉等编著)的配套教学辅导资料. 全书共分为 11 章, 内容包括: 半导体物理基础、PN 结、双极结型晶体管、金属-半导体结、结型场效应晶体管和金属-半导体场效应晶体管、金属-氧化物-半导体场效应晶体管、电荷转移器件、半导体太阳电池和光电二极管、发光二极管和半导体激光器. 书末还给出了近几年吉林大学“微电子学与固体电子学”国家重点学科研究生入学考试试题及参考答案.

本书可供电子科学与技术、微电子学、光电子技术等专业师生在半导体器件物理课程的教学中使用, 也可供有关工程技术人员和科研工作者参考.

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件物理学习与考研指导/孟庆巨, 孙彦峰编著. —北京: 科学出版社, 2010. 2

(普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-026739-9

I. 半… II. ①孟… ②孙… III. ①半导体器件-半导体物理-高等学校-教学参考资料 IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 019599 号

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 2 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 2 月 第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—2 000 字数: 270 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》

编 委 会

顾 问：姚建铨 中国科学院院士 天津大学
蔡惟铮 国家级教学名师 哈尔滨工业大学

主 任：吕志伟 教授 哈尔滨工业大学

副主任：金亚秋 教授 复旦大学
郝 跃 教授 西安电子科技大学
严晓浪 教授 浙江大学
胡华强 编审 科学出版社

委 员：(按姓氏笔画排序)

王卫东	教授	中国科学技术大学	张 兴	教授	北京大学
王志华	教授	清华大学	张怀武	教授	电子科技大学
毛军发	教授	上海交通大学	张贵忠	教授	天津大学
文玉梅	教授	重庆大学	张雪英	教授	太原理工大学
匡 敏	副编审	科学出版社	陈弟虎	教授	中山大学
仲顺安	教授	北京理工大学	陈徐宗	教授	北京大学
任晓敏	教授	北京邮电大学	陈鹤鸣	教授	南京邮电大学
刘纯亮	教授	西安交通大学	欧阳征标	教授	深圳大学
杨冬晓	教授	浙江大学	都思丹	教授	南京大学
杨瑞霞	教授	河北工业大学	高 勇	教授	西安理工大学
时龙兴	教授	东南大学	郭树旭	教授	吉林大学
何伟明	教授	哈尔滨工业大学	黄卡玛	教授	四川大学
余 江	教授	云南大学	崔一平	教授	东南大学
邸 旭	教授	长春理工大学	逯贵祯	教授	中国传媒大学
邹雪城	教授	华中科技大学	曾 云	教授	湖南大学
应质峰	教授	复旦大学	谢 泉	教授	贵州大学
宋 梅	教授	北京邮电大学	蔡 敏	教授	华南理工大学



材料、能源和信息是 21 世纪的三大支柱产业,电子科学与技术是电子工程和电子信息技术发展的基础学科。目前,许多发达国家,如美国、德国、日本、英国、法国等,都竞相将电子科学与技术相关领域纳入了国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术等方向的研究也给予了高度重视,在多项国家级战略性科技计划中,如“863 计划”、“973 计划”、国家科技攻关计划、国家重大科技专项等,都有大量立项。在近几年发布的国务院《2006—2020 年国家信息化发展战略》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,对我国的集成电路(特别是中央处理器芯片)、新一代信息功能材料及器件、高清晰度大屏幕平板显示、激光技术等关键领域都提出了明确目标。

电子科学与技术主要研究制造电子、光电子的各种材料及元器件,以及集成电路、集成电子系统和光电子系统,并研究开发相应的设计和制造技术。它涵盖的学科范围很广,是多学科交叉的综合性学科。现在,教育部本科专业目录中,电子科学与技术专业涵盖了微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件及电磁场与微波等专业方向。随着学科的交叉发展和产业的整合,各专业方向已彼此渗透交融。如何拓宽专业方向?如何体现专业特色?是当前我国高校电子科学与技术专业在办学方面所迫切需要探讨的问题。教育部电子科学与技术专业教学指导分委员会起草的《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范》,对本专业的核心知识领域和知识单元的覆盖范围作了规定,旨在引导高等学校电子科学与技术专业在办学方向与人才培养方面探索新的模式,不断提高教学质量,增强高校教学的创新能力,更好地培养知识、能力、素质全面协调发展的,适合我国电子科学与技术各领域不同层次发展需求的有用人才。

教育部为了推进“质量工程”,自 2007 年 10 月开始,先后三批遴选了国家级特色专业建设点。目前,有三十余个院系被批准为电子科学与技术国家级特色专业建设点。在教材建设方面,2008 年 10 月,教育部高教司在《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》中指示:“教材建设要反映教学内容改革的成果,积极推进教材、教学参考资料和教学课件三位一体的立体化教材建设,选用高质量教材,编写新教材。”为了适应新形势下对电子科学与技术领域人才培养的需求,本届电子科学与技术教学指导分委员会经过广泛深入调研,依托电子科学与技术专业国家级、省级特色专业建设点,与科学出版社共同组织出版本套《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》,旨在贯彻专业规范和教学基本要求,总结和推广各特色专业建设点的教学经验和教学成果,以提高我国电子科学与技术专

业本科教学的整体水平。

本套丛书在组织编写中,重点考虑了以下几方面的特色:

1. **体现专业特色,贯彻专业规范和教学基本要求.** 依托“国家级、省级特色专业建设点”,汇总优秀教学成果,将特色专业建设的内容、国内外科研教学的成果、电子科学与技术方向的专业规范与教学基本要求结合起来,教材内容安排围绕专业规范,体现核心知识单元与知识点。

2. **按照分类指导原则,满足多层面的需求.** 针对同一类课程,根据不同的教学层次(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学)和学时要求(多学时、少学时),涵盖不同范围的拓展知识单元,编写适合不同层次需求的教材。注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

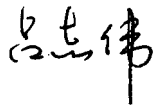
3. **传承精品,吐故纳新.** 本套丛书吸纳了科学出版社2004年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新一版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

4. **拓宽专业基础,面向工程应用,加强实践环节.** 适当拓宽专业基础知识的范围,以增强学生的适应性;面向工程应用,突出工科特色,反映新技术、新工艺;注重实践环节的设置,以促进学生的实际动手能力和创新能力的培养。

5. **注重立体化建设.** 本套丛书除了主教材外,还将逐步配套学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等,为任课教师提供丰富的配套教学资源,方便教师教学,同时帮助学生复习与自学,使教材更加易教易学。

本套丛书的编写汇聚了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关高校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对本套丛书不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议!



教育部高等学校电子科学与技术专业
教学指导分委员会主任
哈尔滨工业大学教授

在应对期末考试和研究生入学考试过程中,很多学生反映半导体器件物理概念多、公式多、图表多,涉及基础知识面广,物理现象纷纭复杂,应对考试困难.为了帮助学生_{学习}半导体器件物理课程,有效地应对考试,我们编写了本书,作为与普通高等教育“十一五”国家级规划教材《半导体器件物理(第二版)》(孟庆巨、刘海波、孟庆辉编著,科学出版社2009年11月第六次印刷)配套使用的教学辅导资料.

全书共分为11章,包括:半导体物理基础、PN结、双极型晶体管、金属-半导体结、结型场效应晶体管和金属-半导体场效应晶体管、金属-氧化物-半导体场效应晶体管、电荷转移器件、半导体太阳能电池和光电二极管、发光二极管和半导体激光器.教材中标有*号的阅读或选讲章节未予包括.

本书将《半导体器件物理(第二版)》的基本内容分解为**知识点归纳、基本概念与问题、理论推导与命题证明、图表解析与应用和习题解答**五个知识模块做了详细的解读,以期达到帮助学生掌握半导体器件的基本结构、基本工作原理、基本性能参数和基本制造工艺进而培养学生举一反三、触类旁通、发现问题、提出问题、分析问题和解决问题的能力_{的教学要求}.其中**基本概念与问题、理论推导与命题证明、图表解析与应用**几乎包括《半导体器件物理(第二版)》中出现的全部概念、理论推导和图表(器件结构示意图、能带图、载流子分布示意图、等效电路图和特性曲线图等).因此,本书是对《半导体器件物理(第二版)》的详细解读.建议读者将本书与《半导体器件物理(第二版)》同时使用.

考虑到学生已经学习过半导体物理课程,因此,第1章(两个课时)仅对半导体物理的主要知识作了简要的复习,对于半导体器件物理需要而在半导体物理课中介绍很少或没有介绍的知识作了补充,对半导体器件物理所使用的与半导体物理中使用的不一致的物理量符号作了介绍.

解答习题是一个重要的学习环节.解答习题是复习和巩固所学知识的过程,是自我检查学习质量的过程,是一个学而致用的过程.有些习题是基础知识的扩展和延伸,对于培养学生发现问题、分析问题和解决问题的能力很有帮助.习题解答可能有几种解答方法,这里给出的不一定是唯一的和最好的方法,仅供参考.

“半导体器件物理”是微电子学与固体电子学国家重点学科考取硕士研究生和博士研究生入学考试课程.本书出版之前,其电子版本已经在网上流行并为许多院校师生所用,对他们考取研究生起到一定的帮助作用,使得近年来其他院校学生考取吉林大学微电子学与固体电子学国家重点学科的研究生不断增多.本书末给出了吉林大学有关专业几年来硕士研究生入学考试“半导体器件物理”部分真题及其

参考答案以供参考.

在本书编写和出版过程中, 科学出版社编辑张濮同志给予了热情的支持并提出了许多宝贵意见. 作者在此对张濮同志表示感谢.

由于作者水平所限, 加之编写时间仓促, 错误与疏漏之处在所难免, 恳请读者指正.

孟庆巨 孙彦峰

2009年12月于吉林大学

丛书序

前言

第 1 章 半导体物理基础	1
1.1 知识点归纳	1
1. 载流子的统计分布	1
2. 电荷输运现象	3
3. 非均匀半导体中的内建场	4
4. 准费米能级	5
5. 复合机制	6
6. 表面复合和表面复合速度	6
7. 半导体中的基本控制方程	7
1.2 习题解答	8
第 2 章 PN 结	19
2.1 知识点归纳	19
1. 热平衡 PN 结	19
2. 偏压的 PN 结	19
3. 理想 PN 结二极管的直流电流-电压特性	20
4. 空间电荷区复合电流和产生电流	21
5. 隧道电流	21
6. 温度对 PN 结 $I-V$ 特性的影响	22
7. 耗尽层电容、求杂质分布和变容二极管	22
8. PN 结二极管的频率特性	23
9. PN 结二极管的开关特性	24
10. PN 结击穿	25
2.2 基本概念与问题	26
2.3 理论推导与命题证明	28
2.4 图表解析与应用	38
2.5 习题解答	40
第 3 章 双极结型晶体管	61
3.1 知识点归纳	61
1. 基本工作原理 (以 NPN 型为例)	61

2. 理想双极结型晶体管中的电流传输	62
3. 埃伯斯-莫尔 (Ebers-Moll) 方程	64
4. 缓变基区晶体管 (Gummel-Poon 模型)	66
5. 基区扩展电阻和电流集聚效应	67
6. 基区宽度调变效应	67
7. 晶体管的频率响应	67
8. 混接 π 模型等效电路	68
9. 晶体管的开关特性	69
10. 反向电流和击穿电压	69
3.2 基本概念与问题	69
3.3 理论推导与命题证明	71
3.4 图表解析与应用	74
3.5 习题解答	77
第 4 章 金属-半导体结	91
4.1 知识点归纳	91
1. 肖特基势垒	91
2. 界面态对势垒高度的影响	92
3. 镜像力对势垒高度的影响	92
4. 肖特基势垒二极管的电流-电压特性	92
5. 金属-绝缘体-半导体肖特基二极管	93
6. 肖特基势垒二极管和 PN 结二极管之间的比较	93
7. 欧姆接触——非整流的 M-S 结	94
4.2 基本概念与问题	94
4.3 理论推导与命题证明	95
4.4 图表解析与应用	98
4.5 习题解答	100
第 5 章 结型场效应晶体管和金属-半导体场效应晶体管	107
5.1 知识点归纳	107
1. 理想 JFET 的 $I-V$ 特性	107
2. 静态特性	108
3. 小信号参数和等效电路	109
4. JFET 的最高工作频率	110
5. 沟道长度调制效应	110
6. 金属-半导体场效应晶体管	110
7. JFET 和 MESFET 的类型	110

5.2	基本概念与问题	111
5.3	理论推导与命题证明	112
5.4	图表解析与应用	113
5.5	习题解答	114
第 6 章	金属-氧化物-半导体场效应晶体管	121
6.1	知识点归纳	121
1.	理想 MOS 结构的表面空间电荷区	121
2.	理想 MOS 电容器	122
3.	沟道电导与阈值电压	123
4.	实际 MOS 的电容-电压特性和阈值电压	123
5.	MOS 场效应晶体管的 $I-V$ 特性	124
6.	等效电路和频率响应	125
7.	MOS 场效应晶体管的类型	126
8.	亚阈值区	126
9.	影响阈值电压的其余因素	126
10.	器件的小型化	127
6.2	基本概念与问题	127
6.3	理论推导与命题证明	129
6.4	图表解析与应用	132
6.5	习题解答	133
第 7 章	电荷转移器件	143
7.1	知识点归纳	143
1.	深耗尽状态和表面势阱	143
2.	MOS 电容的瞬态特性	143
3.	信息电荷的输运、传输效率	144
4.	埋沟 CCD(BCCD)	144
5.	信息电荷的注入和检测	145
6.	集成斗链器件	145
7.	电荷耦合图像器	145
7.2	基本概念与问题	146
7.3	理论推导与命题证明	147
7.4	图表解析与应用	150
7.5	习题解答	150
第 8 章	半导体太阳电池和光电二极管	157
8.1	知识点归纳	157

1. PN 结的光生伏打效应	157
2. 太阳电池的 I - V 特性	157
3. 太阳电池的效率	158
4. 光产生电流与收集效率	158
5. 提高太阳电池效率的措施	159
6. 肖特基势垒和 MIS 太阳电池	159
7. 光电二极管	159
8. PIN 光电二极管	159
9. 光电二极管的特性参数	160
8.2 基本概念与问题	160
8.3 理论推导与命题证明	164
8.4 图表解析与应用	165
8.5 习题解答	165
第 9 章 发光二极管和半导体激光器	175
9.1 知识点归纳	175
1. 辐射复合与非辐射复合	175
2. LED 的基本结构和工作原理	175
3. LED 的特性参数	176
4. 几类重要的 LED	176
9.2 基本概念与问题	179
9.3 理论推导与命题证明	182
9.4 图表解析与应用	183
9.5 习题解答	183
第 10 章 吉林大学硕士研究生入学考试“半导体器件物理”试题	187
2006 年试题	187
2007 年试题	188
2008 年试题	189
2009 年试题	190
第 11 章 吉林大学硕士研究生入学考试“半导体器件物理”试题参考答案	193
2006 年试题参考答案	193
2007 年试题参考答案	197
2008 年试题参考答案	200
2009 年试题参考答案	204

1.1 知识点归纳

1. 载流子的统计分布

1) 导带电子浓度

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{KT}\right) \quad (1-7-14)$$

式中

$$N_c = \frac{2(2\pi m_{dn}KT)^{3/2}}{h^3} \quad (1-7-15)$$

称为导带有效状态密度.

2) 价带空穴浓度

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{KT}\right) \quad (1-7-17)$$

式中

$$N_v = \frac{2(2\pi m_{dp}KT)^{3/2}}{h^3} \quad (1-7-18)$$

称为价带有效状态密度.

3) 导带电子浓度和价带空穴浓度之积

$$np = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{KT}\right) \quad (1-7-21)$$

式中, E_g 为禁带宽度. E_g 与温度有关, 可以把它写成经验关系式

$$E_g = E_{g0} - \beta T \quad (1-7-22)$$

于是

$$np = K_1 T^3 \exp\left(-\frac{E_{g0}}{KT}\right) \quad (1-7-23)$$

式中, K_1 为常数.

4) 本征半导体

电中性方程

$$n = p \quad (1-7-24)$$

本征费米能级

$$E_F = E_i = \frac{1}{2}(E_c - E_v) + \frac{1}{2}KT \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (1-7-25)$$

本征载流子浓度

$$n_i = p_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (1-7-26)$$

5) 质量作用定律

$$np = n_i^2 \quad (1-7-27)$$

利用 n_i 和 E_i , 也可以把电子和空穴浓度写成以下形式:

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{KT}\right) \quad (1-7-28)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{KT}\right) \quad (1-7-29)$$

6) 只有一种杂质的半导体

(1) N 型半导体

在杂质饱和电离的温度范围内, 导带电子浓度等于施主浓度

$$n = N_d \quad (1-7-30)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1-7-31)$$

费米能级

$$E_F = E_c - KT \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (1-7-32)$$

或

$$E_F = E_i + KT \ln \frac{N_d}{n_i} \quad (1-7-33)$$

N 型半导体费米能级位于导带底之下, 本征费米能级之上. 而且施主浓度越高, 费米能级越靠近导带底. 随着温度升高, 费米能级逐渐远离导带底.

(2) P 型半导体

杂质饱和电离的温度范围内

$$p = N_a \quad (1-7-34)$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (1-7-35)$$

费米能级

$$E_F = E_v + KT \ln \frac{N_v}{N_a} \quad (1-7-36)$$

$$E_F = E_i - KT \ln \frac{N_a}{n_i} \quad (1-7-37)$$

费米能级位于价带顶之上, 本征费米能级之下, 受主浓度越高, 费米能级越靠近价带顶, 温度越高, 费米能级越远离价带顶。

7) 杂质补偿半导体

在 $N_d > N_a$ 的半导体中

$$n = N_d - N_a \quad (1-7-38)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_d - N_a} \quad (1-7-39)$$

相应的费米能级为

$$E_F = E_c - KT \ln \frac{N_c}{N_d - N_a} \quad (1-7-40)$$

$$E_F = E_i + KT \ln \frac{N_d - N_a}{n_i} \quad (1-7-41)$$

在 $N_a > N_d$ 的半导体中

$$p = N_a - N_d \quad (1-7-42)$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_a - N_d} \quad (1-7-43)$$

相应的费米能级为

$$E_F = E_v + KT \ln \frac{N_v}{N_a - N_d} \quad (1-7-44)$$

$$E_F = E_i - KT \ln \frac{N_a - N_d}{n_i} \quad (1-7-45)$$

2. 电荷输运现象

在漂移和扩散同时存在的情况下, 空穴和电子的流密度分别为

$$S_p = p\mu_p \mathcal{E} - D_p \nabla p \quad (1-9-22)$$

$$S_n = -n\mu_n \mathcal{E} - D_n \nabla n \quad (1-9-23)$$

电流密度分别为

$$j_p = pq\mu_p \mathcal{E} - qD_p \nabla p \quad (1-9-24)$$

$$j_n = nq\mu_n \mathcal{E} + qD_n \nabla n \quad (1-9-25)$$

在一维情况下, 空穴和电子的电流分别为

$$I_p = qA \left(p\mu_p \mathcal{E} - D_p \frac{dp}{dx} \right) \quad (1-9-26)$$

$$I_n = qA \left(n\mu_n \mathcal{E} + D_n \frac{dn}{dx} \right) \quad (1-9-27)$$

式中 A 为电流垂直流过的面积.

3. 非均匀半导体中的内建场

电场 \mathcal{E} 定义为电势 ψ 的负梯度

$$\mathcal{E} = -\nabla\psi \quad (1-10-1)$$

电势与电子势能的关系为

$$E = -q\psi \quad (1-10-2)$$

一维情况下可以把电场表示为

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} = -\frac{d\psi}{dx} \quad (1-10-3)$$

取

$$\psi = -\frac{E_i}{q} \quad (1-10-4)$$

表示静电势.

与此类似, 定义

$$\phi = -\frac{E_F}{q} \quad (1-10-5)$$

为费米势.

于是

$$n = n_i e^{(\psi-\phi)/V_T} \quad (1-10-6)$$

$$p = n_i e^{(\phi-\psi)/V_T} \quad (1-10-7)$$

式中

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (1-10-8)$$

称为半导体的热电势. 在热平衡情况下, 费米势为常数, 可以把它取为零基准, 于是

$$n = n_i e^{\psi/V_T} \quad (1-10-9)$$

$$p = n_i e^{-\psi/V_T} \quad (1-10-10)$$

非均匀的杂质分布会在半导体中形成电场, 称为内建电场 (自建电场). 在热平衡情况下, 有

$$n = n_i e^{\psi/V_T}$$

$$p = n_i e^{-\psi/V_T}$$

对于 N 型半导体, 有

$$\psi = V_T \ln \frac{N_d}{n_i} \quad (1-10-14)$$

$$\mathcal{E} = -\frac{V_T}{N_d} \frac{dN_d}{dx} \quad (1-10-15)$$

对于 P 型半导体, 有

$$\psi = -V_T \ln \frac{N_a}{n_i} \quad (1-10-16)$$

$$\mathcal{E} = \frac{V_T}{N_a} \frac{dN_a}{dx} \quad (1-10-17)$$

4. 准费米能级

1) 费米能级的定义

在非平衡状态下可以定义 E_{Fn} 和 E_{Fp} 两个量以代替 E_F , 使得

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{KT}\right) = n_i e^{(\psi - \phi_n)/V_T} \quad (1-12-1)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{KT}\right) = n_i e^{(\phi_p - \psi)/V_T} \quad (1-12-2)$$

式中, E_{Fn} 和 E_{Fp} 分别称为电子和空穴的准费米能级, ϕ_n 和 ϕ_p 分别为相应的准费米势, 表示为

$$\phi_n = -\frac{E_{Fn}}{q}, \quad \phi_p = -\frac{E_{Fp}}{q}$$

2) 修正的欧姆定律

$$J_n = \frac{I_n}{A} = -qn\mu_n \frac{d\phi_n}{dx} = -\sigma_n(x) \frac{d\phi_n}{dx} \quad (1-12-5)$$

$$J_p = \frac{I_p}{A} = -qp\mu_p \frac{d\phi_p}{dx} = -\sigma_p(x) \frac{d\phi_p}{dx} \quad (1-12-6)$$

式 (1-12-5) 和式 (1-12-6) 称为修正的欧姆定律, 其中

$$\sigma_n(x) = qn\mu_n \quad (1-12-7)$$

和

$$\sigma_p(x) = qp\mu_p \quad (1-12-8)$$