

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

国家科学技术学术著作出版基金项目  
电子信息科技专著出版专项资金项目

# 异质结原理与器件

Heterojunction Principles and Devices

江剑平 孙成城 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书简要介绍了异质结的基本概念和基础理论,系统论述了光电子器件的工作原理和模型、异质结构材料及制备工艺方法。全书共 14 章,内容包括:异质结基本概念、异质结电学特性、异质结能带图、异质结光电特性、异质结制备、位错与弹性应变、宽带隙半导体材料、异质结激光器、超晶格与多量子阱、半导体发光二极管、半导体光检测器、IV 族元素合金应变异质结、半导体太阳能电池和梯度带隙半导体。

本书深入浅出,图文并茂,内容翔实,对于从事半导体光电子器件的研究、开发和生产人员有很高的应用价值,同时也可作为高等院校本科生和研究生的教学参考书。

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

异质结原理与器件 / 江剑平, 孙成城编著. —北京: 电子工业出版社, 2010. 6  
ISBN 978-7-121-11136-5

I. ①异… II. ①江… ②孙… III. ①异质结—高等学校—教材 IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 113802 号

责任编辑: 凌 毅

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 25.5 字数: 685 千字

印 次: 2010 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 68.00 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 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010)88258888。

# 前 言

基于异质结构的半导体光电子器件涉及信息、材料、能源领域,有着极强的应用背景,日益受到人们重视并获得快速发展。

早在 1957 年, H. Kroemer 就预言异质结有着比同质结更高的注入效率,同时对异质结在太阳能电池中的应用提出了许多设想。1960 年 R. L. Anderson 第一次制成高质量的异质结,并提出系统的理论模型和能带图。1963 年 Z. I. Alferov 和 H. Kroemer 各自独立地提出基于异质结的激光器的概念,指出利用异质结的超注入特性实现粒子数反转的可行性,并且特别指出同质结激光器不可能在室温下连续工作。经过坚持不懈的努力,1969 年异质结激光器终于实现室温连续工作,这项工作建立了现代光电子学的基础。H. Kroemer 和 Z. I. Alferov 因发明异质结晶体管和激光二极管所作出的奠基性贡献,获得了 2000 年的诺贝尔物理学奖。

作者长期从事半导体异质结光电子器件的理论和实验研究工作,近 20 年来在清华大学电子工程系先后讲授“固体物理”、“半导体物理”、“半导体光电子学”,积累了丰富的原始资料和宝贵经验。本书是作者从事教学和科研工作成果的总结、提高和系统化。本书在编写过程中,参考、借鉴了 B. L. Sharma, R. K. Purohit 的《Semiconductor Heterojunctions》和虞丽生教授的《半导体异质结物理》等有关异质结的专著及相关文献。本书侧重于光电子器件的工作原理、特性、异质结构材料及制备工艺方法。作者在编著本书的过程中,试图反映这一领域的新材料、新技术和新器件的发展趋势和研究成果。在介绍这些内容时,不是简单地罗列取得的最新进展,而是尽量讲述它们的物理内涵,使读者了解这些内容后有能力自己去接受、理解和创造日新月异的新成果,为即将进入该领域的科研人员提供知识平台。本书在内容编排上也利于普通读者概括性地了解该领域的发展历程。

在编著中作者力求深入浅出,图文并茂,内容翔实,在有限篇幅内,为读者铺垫必要的异质结的基础知识,尽量减少繁冗的公式推导。全书共 14 章,其中第 1~6 章、第 8~9 章由孙成城编写,第 7 章、第 10~14 章由江剑平编写,邓颖参与了资料翻译和书稿校对工作,全书由孙成城统稿。内容包括:异质结基本概念、异质结电学特性、异质结能带图、异质结光电特性、异质结制备、位错与弹性应变、宽带隙半导体材料、异质结激光器、超晶格与多量子阱、半导体发光二极管、半导体光检测器、IV 族元素合金应变异质结、半导体太阳能电池和梯度带隙半导体。

本书对于从事半导体光电子器件的研究、开发和生产人员具有应用价值,同时也可作为高等院校本科生和研究生的教学参考书。

由于半导体异质结构光电子器件发展十分迅速,涉及的学科范围相当广泛,加上作者的知识局限和理解水平有限,书中难免存在错误、疏漏和不当之处,恳请各位专家和广大读者不吝指正。

本书的出版,得到了清华大学周炳琨院士、中国科学院半导体研究所陈良惠院士和北京大学虞丽生教授的热情推荐以及电子工业出版社的竭诚协助。本书在编著过程中,得到了谢世钟教授、黄翊东教授、清华大学电子工程系、清华大学图书馆的大力支持,对以上个人和单位,作者一并表示衷心感谢。

作者最后还要感谢国家科学技术学术著作基金委员会对本著作出版的资助。

二〇一〇年二月  
于清华园

## 主要符号参数

|              |                     |              |             |
|--------------|---------------------|--------------|-------------|
| $A$          | 面积                  | $J$          | 电流密度        |
| $A^*$        | 有效里查逊常数             | $J_n$        | 电子电流密度      |
| $a$          | 晶格常数                | $J_p$        | 空穴电流密度      |
| $B$          | 磁感应强度矢量             | $J_s$        | 反向饱和电流密度    |
| $b$          | Burgers(滑移)矢量       | $k$          | 波矢          |
| $b$          | 滑移距离                | $k$          | 波数;玻耳兹曼常数   |
| $C$          | 电容;聚光度(比)           | $\bar{k}$    | 消光系数        |
| $c$          | 光速                  | $L$          | 位错线总长度      |
| $D_n$        | 电子扩散系数              | $L_n$        | 电子扩散长度      |
| $D_p$        | 空穴扩散系数              | $L_p$        | 空穴扩散长度      |
| $d$          | 宽(厚)度;扩展位错宽度        | $l$          | 平均自由程;位错线长度 |
| $E$          | 能量                  | $l_n$        | 电子平均自由程     |
| $E_A$        | 受主能级                | $l_p$        | 空穴平均自由程     |
| $E_C$        | 导带底能量               | $M$          | 雪崩倍增因子(系数)  |
| $\Delta E_C$ | 导带带阶                | $m_0$        | 电子静止质量      |
| $E_D$        | 施主能级                | $m_{dn}$     | 电子态密度有效质量   |
| $E_F$        | 费米能级                | $m_{dp}$     | 空穴态密度有效质量   |
| $E_{Fn}$     | 电子准费米能级             | $m_n$        | 电子有效质量      |
| $E_{Fp}$     | 空穴准费米能级             | $m_p$        | 空穴有效质量      |
| $E_g$        | 禁带宽度                | $m_{ph}$     | 重空穴有效质量     |
| $E_i$        | 本征费米能级              | $m_{pl}$     | 轻空穴有效质量     |
| $E_V$        | 价带顶能量               | $N_A$        | 受主杂质浓度      |
| $\Delta E_V$ | 价带带阶                | $N_C$        | 导带有效态密度     |
| $E_{vp}$     | 空位的生成能              | $N_D$        | 施主杂质浓度      |
| $E_0$        | 真空电子能级              | $N_s$        | 界面的键密度      |
| $E$          | 电场强度矢量              | $\Delta N_s$ | 界面悬挂键密度     |
| $ E $        | 电场强度的模              | $N_V$        | 价带有效态密度     |
| $F$          | 作用力;单位长度的张力         | $n$          | 电子浓度;位错数目   |
| $f$          | 晶格失配度               | $n_i$        | 本征载流子浓度     |
| $G$          | 产生率;切变模量            | $n_0$        | 热平衡电子浓度     |
| $g$          | 增益系数                | $n_e$        | 透明载流子浓度     |
| $h$          | 普朗克常数;层厚            | $\Delta n$   | 非平衡电子浓度     |
| $\hbar$      | 修正普朗克常数( $h/2\pi$ ) | $\tilde{n}$  | 复折射率        |
| $I$          | 电流                  | $\bar{n}$    | 折射率         |

|            |                  |              |               |
|------------|------------------|--------------|---------------|
| $p$        | 空穴浓度             | $w$          | 厚度            |
| $p_0$      | 热平衡空穴浓度          | $Y$          | 弹性模量          |
| $\Delta p$ | 非平衡空穴浓度          | $\alpha$     | 吸收系数;电子离化系数   |
| $Q$        | 电荷面密度            | $\beta$      | 空穴离化系数;传播常数   |
| $q$        | 电子电荷             | $\gamma$     | 应变;单位面积的层错能   |
| $R$        | 复合率;响应度;电阻;光强反射率 | $\delta$     | 体积膨胀率         |
| $r$        | 位移矢量             | $\epsilon$   | 介电常数;应变分量     |
| $r$        | 半径;距离;振幅反射系数     | $\epsilon_0$ | 真空介电常数        |
| $S$        | 表面复合速度           | $\epsilon_r$ | 相对介电常数        |
| $S_0$      | 太阳常数             | $\eta$       | 效率            |
| $s$        | 表面积              | $\lambda$    | 波长            |
| $T$        | 温度;张力            | $\mu_n$      | 电子迁移率         |
| $t$        | 时间               | $\mu_p$      | 空穴迁移率         |
| $U$        | 位能;内能;势垒高度       | $\nu$        | 频率;泊松比        |
| $V$        | 电压;电势;体积         | $\rho$       | 位错的密度;谱密度;电阻率 |
| $V_M$      | 空位浓度             | $\sigma$     | 应力分量;电导率      |
| $v$        | 速度矢量             | $\tau$       | 平均自由时间;寿命;应力  |
| $v$        | 速度               | $\phi$       | 功函数           |
| $W$        | 功函数;功;宽(厚)度      | $\chi$       | 电子亲和能         |

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 异质结基本概念 .....          | 1  |
| 1.1 异质结基本概念 .....            | 1  |
| 1.2 异质结基本关系式 .....           | 2  |
| 1.3 能带带阶的交换性和传递性 .....       | 3  |
| 1.4 反型异质结的主要公式 .....         | 3  |
| 1.5 同型异质结的主要公式 .....         | 4  |
| 第 2 章 异质结电学特性 .....          | 6  |
| 2.1 突变反型异质结 .....            | 6  |
| 2.1.1 影响尖峰势垒高度的因素 .....      | 7  |
| 2.1.2 扩散模型 .....             | 7  |
| 2.1.3 发射模型 .....             | 9  |
| 2.1.4 简单隧道模型 .....           | 9  |
| 2.1.5 界面复合模型 .....           | 10 |
| 2.1.6 隧道复合模型 .....           | 11 |
| 2.2 反型异质结的注入特性 .....         | 12 |
| 2.2.1 高注入特性 .....            | 12 |
| 2.2.2 超注入特性 .....            | 12 |
| 2.3 突变同型异质结 .....            | 13 |
| 2.3.1 发射模型 .....             | 13 |
| 2.3.2 扩散模型 .....             | 14 |
| 2.3.3 双 Schottky 二极管模型 ..... | 14 |
| 2.4 突变异质结电容和电压特性 .....       | 15 |
| 2.4.1 突变反型异质结 .....          | 15 |
| 2.4.2 突变同型异质结 .....          | 16 |
| 第 3 章 异质结能带图 .....           | 17 |
| 3.1 突变反型异质结能带图 .....         | 17 |
| 3.1.1 pN 异质结能带图 .....        | 17 |
| 3.1.2 nP 异质结能带图 .....        | 19 |
| 3.2 突变同型异质结能带图 .....         | 21 |
| 3.2.1 nN 异质结能带图 .....        | 21 |
| 3.2.2 pP 异质结能带图 .....        | 23 |
| 3.3 受界面态影响的能带图 .....         | 25 |
| 3.3.1 pN 异质结能带图 .....        | 25 |
| 3.3.2 nP 异质结能带图 .....        | 26 |
| 3.3.3 nN 异质结能带图 .....        | 27 |
| 3.3.4 pP 异质结能带图 .....        | 28 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.4 缓变异质结能带图 .....            | 28 |
| 3.4.1 pN 异质结能带图 .....         | 28 |
| 3.4.2 nP 异质结能带图 .....         | 29 |
| 3.4.3 nN 异质结能带图 .....         | 29 |
| 3.4.4 pP 异质结能带图 .....         | 29 |
| <b>第4章 异质结光电特性</b> .....      | 31 |
| 4.1 反型异质结光电特性 .....           | 31 |
| 4.1.1 垂直入射异质结 .....           | 31 |
| 4.1.2 平行入射异质结 .....           | 35 |
| 4.2 同型异质结光电特性 .....           | 35 |
| 4.2.1 垂直入射异质结 .....           | 37 |
| 4.2.2 平行入射异质结 .....           | 38 |
| 4.3 发光辐射跃迁 .....              | 39 |
| <b>第5章 异质结制备</b> .....        | 41 |
| 5.1 晶体结构 .....                | 41 |
| 5.1.1 金刚石结构 .....             | 41 |
| 5.1.2 闪锌矿结构 .....             | 42 |
| 5.1.3 纤锌矿结构 .....             | 42 |
| 5.1.4 氯化钠结构 .....             | 44 |
| 5.2 基本考虑 .....                | 45 |
| 5.2.1 晶格失配 .....              | 45 |
| 5.2.2 热失配 .....               | 46 |
| 5.2.3 内扩散 .....               | 47 |
| 5.3 制备方法 .....                | 47 |
| 5.3.1 液相外延(LPE) .....         | 47 |
| 5.3.2 金属有机化学气相淀积(MOCVD) ..... | 54 |
| 5.3.3 分子束外延(MBE) .....        | 57 |
| 5.3.4 化学束外延(CBE) .....        | 60 |
| <b>第6章 位错与弹性应变</b> .....      | 62 |
| 6.1 位错的概念 .....               | 62 |
| 6.1.1 位错概念的提出 .....           | 62 |
| 6.1.2 刃型位错 .....              | 63 |
| 6.1.3 Burgers 矢量 .....        | 64 |
| 6.1.4 螺型位错 .....              | 66 |
| 6.1.5 混合型位错 .....             | 67 |
| 6.1.6 位错密度 .....              | 68 |
| 6.2 位错的运动 .....               | 69 |
| 6.2.1 位错的滑移 .....             | 69 |
| 6.2.2 位错的攀移 .....             | 71 |
| 6.3 位错的弹性应变和应力 .....          | 71 |
| 6.3.1 应力和应变分量 .....           | 72 |

|        |                           |     |
|--------|---------------------------|-----|
| 6.3.2  | 位错的应力场 .....              | 73  |
| 6.3.3  | 位错的弹性应变能 .....            | 75  |
| 6.3.4  | 作用在位错上的力 .....            | 76  |
| 6.3.5  | 位错的线张力 .....              | 77  |
| 6.3.6  | 两平行位错间的相互作用 .....         | 78  |
| 6.4    | 实际晶体结构的位错 .....           | 79  |
| 6.4.1  | 实际晶体结构的单位位错 .....         | 79  |
| 6.4.2  | 堆垛层错 .....                | 81  |
| 6.4.3  | 不全位错 .....                | 81  |
| 6.4.4  | 位错反应及扩展位错 .....           | 83  |
| 6.4.5  | Thompson 四面体及记号 .....     | 84  |
| 6.5    | 位错的实验观测 .....             | 85  |
| 第7章    | 宽带隙半导体材料 .....            | 87  |
| 7.1    | SiC 半导体 .....             | 87  |
| 7.1.1  | SiC 的同质多型结构 .....         | 87  |
| 7.1.2  | SiC 的薄层外延 .....           | 89  |
| 7.1.3  | SiC 的掺杂 .....             | 90  |
| 7.1.4  | SiC 的氧化 .....             | 90  |
| 7.1.5  | SiC 的刻蚀 .....             | 90  |
| 7.1.6  | SiC 的欧姆接触 .....           | 91  |
| 7.2    | Ⅲ族氮化物半导体 .....            | 92  |
| 7.2.1  | GaN、AlN 和 InN 的基本性质 ..... | 92  |
| 7.2.2  | Ⅲ族氮化物的能带结构 .....          | 94  |
| 7.2.3  | Ⅲ族氮化物的三元、四元合金 .....       | 94  |
| 7.2.4  | Ⅲ族氮化物半导体的极化效应 .....       | 97  |
| 7.2.5  | Ⅲ族氮化物薄层的外延生长 .....        | 97  |
| 7.2.6  | 外延生长Ⅲ族氮化物所用的衬底 .....      | 98  |
| 7.2.7  | Ⅲ族氮化物的 MOCVD 生长 .....     | 100 |
| 7.2.8  | Ⅲ族氮化物的 MBE 生长 .....       | 101 |
| 7.2.9  | 缓冲层的生长 .....              | 103 |
| 7.2.10 | Ⅲ族氮化物的缺陷与掺杂 .....         | 104 |
| 7.2.11 | Ⅲ族氮化物的欧姆接触 .....          | 105 |
| 7.2.12 | Ⅲ族氮化物半导体异质结 .....         | 107 |
| 7.3    | Ⅱ-VI族化合物半导体 .....         | 109 |
| 7.3.1  | ZnSe 化合物半导体 .....         | 109 |
| 7.3.2  | Ⅱ-VI族化合物的点缺陷与自补偿现象 .....  | 111 |
| 第8章    | 异质结激光器 .....              | 114 |
| 8.1    | 异质结在激光器中的主要作用 .....       | 114 |
| 8.1.1  | 异质结的超注入效应 .....           | 115 |
| 8.1.2  | 异质结对载流子的限制作用 .....        | 115 |
| 8.1.3  | 异质结对光场的限制作用 .....         | 115 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 8.1.4 | 异质结的布拉格反射作用                          | 115 |
| 8.1.5 | 异质结的窗口效应                             | 116 |
| 8.2   | 激光器的材料                               | 116 |
| 8.2.1 | 化合物半导体的波长范围                          | 116 |
| 8.2.2 | Ⅲ-V族二元化合物                            | 117 |
| 8.2.3 | Ⅲ-V族三元化合物                            | 118 |
| 8.2.4 | Ⅲ-V族四元化合物                            | 122 |
| 8.2.5 | Ⅳ-VI族化合物                             | 126 |
| 8.3   | 激光器的模式和波导                            | 128 |
| 8.3.1 | 对称三层介质平板波导                           | 129 |
| 8.3.2 | 非对称三层介质平板波导                          | 133 |
| 8.3.3 | 光强分布和限制因子                            | 135 |
| 8.3.4 | 波导机理分类                               | 136 |
| 8.3.5 | 在损耗(增益)介质中的传播                        | 138 |
| 8.3.6 | 纵向模式                                 | 140 |
| 8.3.7 | 模式在端面上的反射率                           | 141 |
| 8.4   | 激光器的结构                               | 142 |
| 8.4.1 | 激光器条形结构                              | 143 |
| 8.4.2 | 增益波导激光器                              | 144 |
| 8.4.3 | 折射率波导激光器                             | 145 |
| 8.4.4 | 红光半导体激光器                             | 149 |
| 8.4.5 | 蓝绿光半导体激光器                            | 152 |
| 8.4.6 | 红外半导体激光器                             | 154 |
| 8.4.7 | 垂直腔面发射激光器                            | 158 |
| 8.5   | 激光器的可靠性                              | 161 |
| 8.5.1 | 晶体缺陷的影响                              | 162 |
| 8.5.2 | 腔面损伤退化                               | 162 |
| 8.5.3 | 欧姆接触退化和焊料变质                          | 163 |
| 8.5.4 | InGaAsP/InP 与 GaAlAs/GaAs 激光器退化因素的差别 | 163 |
| 8.5.5 | 可靠性保证和加速寿命试验                         | 163 |
| 第9章   | 超晶格与多量子阱                             | 167 |
| 9.1   | 基本概念                                 | 167 |
| 9.1.1 | 组分超晶格                                | 167 |
| 9.1.2 | 掺杂超晶格                                | 170 |
| 9.1.3 | 应变超晶格                                | 171 |
| 9.2   | 量子阱和超晶格的电子状态                         | 177 |
| 9.2.1 | 单量子阱中的电子状态                           | 177 |
| 9.2.2 | 二维电子气的态密度                            | 179 |
| 9.2.3 | 量子阱中载流子浓度的能量分布                       | 180 |
| 9.2.4 | 超晶格中的电子状态                            | 181 |
| 9.2.5 | 超晶格中电子的态密度                           | 181 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 9.2.6 超晶格中布里渊区的折叠 .....         | 182 |
| 9.3 量子阱和超晶格的光学特性 .....          | 182 |
| 9.3.1 量子阱中的跃迁选择定则 .....         | 182 |
| 9.3.2 量子阱中的激子效应 .....           | 184 |
| 9.3.3 超晶格的吸收光谱特性 .....          | 186 |
| 9.3.4 超晶格结构的折射率谱 .....          | 187 |
| 9.3.5 单原子层超晶格的光学特性 .....        | 188 |
| 9.4 量子阱激光器 .....                | 189 |
| 9.4.1 量子阱激光器的结构 .....           | 189 |
| 9.4.2 量子阱中载流子的收集与复合 .....       | 190 |
| 9.4.3 注入电流与增益 .....             | 191 |
| 9.4.4 增益与量子阱宽度的关系 .....         | 192 |
| 9.4.5 量子阱激光器的基本特性 .....         | 193 |
| 9.5 应变量子阱激光器 .....              | 198 |
| 9.5.1 应变量子阱的能带结构 .....          | 198 |
| 9.5.2 应变量子阱激光器的增益特性 .....       | 202 |
| 9.5.3 应变量子阱激光器 .....            | 203 |
| 9.6 新型量子阱激光器 .....              | 204 |
| 9.6.1 低维超晶格-量子线、量子点激光器 .....    | 204 |
| 9.6.2 量子级联激光器 .....             | 206 |
| 第 10 章 半导体发光二极管 .....           | 210 |
| 10.1 半导体 LED 的工作原理 .....        | 210 |
| 10.1.1 电子-空穴对的辐射复合 .....        | 210 |
| 10.1.2 半导体内的非辐射复合 .....         | 212 |
| 10.1.3 半导体表面的非辐射复合 .....        | 213 |
| 10.2 半导体 LED 的基本结构 .....        | 213 |
| 10.2.1 同质结构 .....               | 214 |
| 10.2.2 异质结构 .....               | 214 |
| 10.3 LED 的电学特性 .....            | 215 |
| 10.3.1 电流-电压特性 .....            | 215 |
| 10.3.2 异质结构对 LED 的电学特性的影响 ..... | 217 |
| 10.3.3 二极管电压及温度对电学特性的影响 .....   | 217 |
| 10.3.4 LED 的调制特性 .....          | 218 |
| 10.4 半导体 LED 的光学性质 .....        | 220 |
| 10.4.1 LED 中的辐射跃迁(复合) .....     | 220 |
| 10.4.2 P-I 特性和不同定义下的光发射效率 ..... | 220 |
| 10.4.3 温度对 P-I 特性的影响 .....      | 222 |
| 10.4.4 LED 的发射光谱 .....          | 223 |
| 10.4.5 LED 发射光的逸出锥 .....        | 225 |
| 10.4.6 朗伯特(Lambertian)发射图 ..... | 226 |
| 10.5 提高 LED 内量子效率的措施 .....      | 227 |

|         |                                          |     |
|---------|------------------------------------------|-----|
| 10.5.1  | 采用晶格匹配的双异质结构 .....                       | 228 |
| 10.5.2  | 选取适当的有源区掺杂浓度 .....                       | 228 |
| 10.5.3  | 选取适当的限制层掺杂浓度 .....                       | 228 |
| 10.5.4  | 控制 pn 结偏移的影响 .....                       | 229 |
| 10.5.5  | 降低非辐射复合的影响 .....                         | 230 |
| 10.6    | 提高 LED 光逸出效率的措施 .....                    | 230 |
| 10.6.1  | 采用双异质结构 .....                            | 230 |
| 10.6.2  | LED 管芯形状的选择 .....                        | 230 |
| 10.6.3  | 采用电流扩展层 .....                            | 231 |
| 10.6.4  | 采用电流阻挡(blocking)层 .....                  | 233 |
| 10.6.5  | 接触电极形状和尺寸的选择 .....                       | 233 |
| 10.6.6  | 采用透明衬底工艺 .....                           | 234 |
| 10.6.7  | 采用抗反射光学膜 .....                           | 234 |
| 10.6.8  | 反射接触和透明接触 .....                          | 235 |
| 10.6.9  | 倒装结构 .....                               | 235 |
| 10.6.10 | 采用环氧树脂圆拱封装 .....                         | 235 |
| 10.6.11 | 采用分布布拉格反射器(DBR) .....                    | 235 |
| 10.7    | 不同材料系的 LED .....                         | 237 |
| 10.7.1  | GaAsP、GaAsP <sub>2</sub> N 材料系 LED ..... | 237 |
| 10.7.2  | AlGaInP/GaAs 材料系 LED .....               | 238 |
| 10.7.3  | GaInN/GaN 材料系 LED .....                  | 239 |
| 10.7.4  | AlGaAs/GaAs 材料系 LED .....                | 241 |
| 10.8    | 高亮度 LED .....                            | 241 |
| 10.8.1  | 高亮度 LED 的光学性能 .....                      | 242 |
| 10.8.2  | 高亮度 LED 的电学性能 .....                      | 242 |
| 10.9    | 白光 LED .....                             | 243 |
| 10.9.1  | 利用 LED 产生白光的方法 .....                     | 244 |
| 10.9.2  | 产生白光用的波长转换材料 .....                       | 244 |
| 10.9.3  | 几种不同材料和结构的白光 LED .....                   | 245 |
| 10.10   | 有谐振腔的发光二极管(RCLED) .....                  | 246 |
| 10.10.1 | 概述 .....                                 | 246 |
| 10.10.2 | RCLED 的设计考虑 .....                        | 247 |
| 10.10.3 | 发射波长为 930nm 的 RCLED .....                | 247 |
| 10.10.4 | 发射波长为 650nm 的 RCLED .....                | 249 |
| 10.10.5 | 大面积光子再利用 LED .....                       | 249 |
| 10.11   | 光通信用的 LED .....                          | 250 |
| 10.11.1 | 自由空间光通信用的 LED .....                      | 250 |
| 10.11.2 | 光纤通信用的 LED .....                         | 250 |
| 10.12   | 边发射超辐射 LED .....                         | 252 |
| 第 11 章  | 半导体光检测器 .....                            | 255 |
| 11.1    | 半导体光检测器的基本参数 .....                       | 255 |

|        |                                                         |     |
|--------|---------------------------------------------------------|-----|
| 11.1.1 | 量子效率 $\eta$ 和响应度 $R$                                    | 256 |
| 11.1.2 | 暗电流和噪声                                                  | 256 |
| 11.1.3 | 响应速度                                                    | 257 |
| 11.2   | 半导体光电导型光检测器                                             | 257 |
| 11.2.1 | 光电导型光检测器的工作原理                                           | 257 |
| 11.2.2 | 光电导型光检测器的内部增益                                           | 258 |
| 11.2.3 | 光电导型光检测器的增益和带宽                                          | 259 |
| 11.2.4 | 光电导型光检测器中的噪声                                            | 260 |
| 11.2.5 | n-i-p-i 超晶格光电导型光检测器                                     | 261 |
| 11.3   | pn 结光电二极管                                               | 262 |
| 11.4   | pin 光电二极管                                               | 263 |
| 11.4.1 | pin 结构和 i 层                                             | 263 |
| 11.4.2 | pin 光电二极管的电流-电压特性                                       | 265 |
| 11.4.3 | 外量子效率和内量子效率                                             | 266 |
| 11.4.4 | 频率响应                                                    | 267 |
| 11.4.5 | 噪声和信噪比                                                  | 269 |
| 11.4.6 | 异质结和波导型 pin 光电二极管                                       | 271 |
| 11.5   | 雪崩光电二极管 (APD)                                           | 272 |
| 11.5.1 | APD 的工作原理与结构                                            | 272 |
| 11.5.2 | 碰撞离化和离化系数                                               | 273 |
| 11.5.3 | 雪崩倍增因子                                                  | 275 |
| 11.5.4 | 雪崩倍增和光电流-电压特性                                           | 277 |
| 11.5.5 | 器件的雪崩击穿                                                 | 277 |
| 11.5.6 | 频率响应                                                    | 279 |
| 11.5.7 | APD 的噪声和信噪比                                             | 280 |
| 11.5.8 | 几种 APD 的实例                                              | 281 |
| 11.5.9 | 新型、高性能 APD                                              | 285 |
| 11.6   | 特殊光电检测器                                                 | 287 |
| 11.6.1 | 光晶体管                                                    | 287 |
| 11.6.2 | 调制势垒光电二极管                                               | 289 |
| 11.6.3 | 具有波长选择性的检测器                                             | 291 |
| 11.6.4 | 谐振腔增强型光探测器                                              | 292 |
| 11.7   | 量子结构红外光探测器                                              | 293 |
| 11.7.1 | Ⅲ-V 族化合物半导体量子阱内的子带间跃迁的长波长红外探测器                          | 293 |
| 11.7.2 | 量子阱光电探测器的性能                                             | 294 |
| 11.7.3 | InAs/Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> Sb 离隙型应变超晶格红外探测器 | 295 |
| 11.7.4 | Si/Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> 量子阱红外探测器           | 296 |
| 11.7.5 | 量子点红外探测器                                                | 296 |
| 第 12 章 | Ⅳ族元素合金应变异质结                                             | 300 |
| 12.1   | 引言                                                      | 300 |
| 12.2   | 应变 Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> /Si 的基本性质          | 300 |

|        |                                                      |     |
|--------|------------------------------------------------------|-----|
| 12.2.1 | 应变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层内的应力                | 300 |
| 12.2.2 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变层的临界厚度                | 302 |
| 12.2.3 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变超晶格的应变特性    | 303 |
| 12.3   | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结的电子学性质     | 304 |
| 12.3.1 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变层的带隙和能带结构             | 304 |
| 12.3.2 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结的能带排列和能带带阶 | 306 |
| 12.3.3 | $\text{SiGe}$ 的散射机制和载流子迁移率                           | 308 |
| 12.4   | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变层的外延生长                | 309 |
| 12.4.1 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 薄层生长                    | 309 |
| 12.4.2 | $\text{Ge}$ 的掺入和陡峭性                                  | 311 |
| 12.4.3 | 含 $\text{C}$ 的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的生长      | 311 |
| 12.5   | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 薄层生长技术                  | 311 |
| 12.5.1 | 分子束外延(MBE)                                           | 311 |
| 12.5.2 | 化学气相沉积(CVD)                                          | 312 |
| 12.5.3 | 固相外延(SPE)                                            | 312 |
| 12.6   | $\text{SiGe}$ 合金层的掺杂                                 | 313 |
| 12.6.1 | MBE 生长中的掺杂                                           | 313 |
| 12.6.2 | CVD 生长时的掺杂                                           | 314 |
| 12.7   | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的金属欧姆接触                 | 314 |
| 12.7.1 | $\text{SiGe}$ 合金的欧姆接触                                | 314 |
| 12.7.2 | $\text{Al-SiGe}$ 、 $\text{Ti-SiGe}$ 欧姆接触             | 315 |
| 12.7.3 | $\text{SiGeC}$ 、 $\text{GeC}$ 和 $\text{SiC}$ 的金属接触   | 315 |
| 12.8   | IV 族元素二元、三元合金的生长                                     | 316 |
| 12.8.1 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的生长                   | 316 |
| 12.8.2 | $\text{Si}_{1-y}\text{C}_y$ 合金层生长                    | 316 |
| 12.8.3 | $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 三元合金的生长     | 317 |
| 12.8.4 | 弛豫 $\text{SiGe}$ 上应变 $\text{Si}$ 的生长                 | 317 |
| 12.8.5 | $\alpha\text{-SiGe}$ 、 $\text{H}$ 的生长                | 318 |
| 12.8.6 | $\text{Ge}_{1-y}\text{C}_y$ 和有关合金生长                  | 318 |
| 12.8.7 | 多晶 $\text{SiGe}$ 薄膜的生长                               | 318 |
| 12.9   | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结的光电子学应用    | 319 |
| 12.9.1 | 基本原理                                                 | 319 |
| 12.9.2 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的折射率                    | 319 |
| 12.9.3 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金光电探测器                 | 320 |
| 12.9.4 | 量子阱光电二极管                                             | 321 |
| 12.9.5 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 发光二极管                   | 322 |
| 12.9.6 | $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的无源光子器件               | 323 |

## 第 13 章 半导体太阳能电池 ..... 327

### 13.1 前言 ..... 327

### 13.2 太阳光谱与太阳常数 ..... 327

#### 13.2.1 太阳光谱 ..... 327

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 13.2.2 太阳常数(大气质量数)             | 328        |
| 13.3 同质结太阳能电池                  | 328        |
| 13.3.1 同质结太阳能电池的基本原理           | 328        |
| 13.3.2 n/p型和p/n型两种结构的比较        | 329        |
| 13.3.3 太阳能电池的伏安特性              | 330        |
| 13.4 太阳能电池的性能参数                | 332        |
| 13.5 太阳能电池的材料选择和设计考虑           | 333        |
| 13.5.1 太阳能电池的材料选择              | 333        |
| 13.5.2 太阳能电池的设计考虑              | 335        |
| 13.5.3 实际效率的损失及补救措施            | 336        |
| 13.6 异质结太阳能电池                  | 339        |
| 13.7 级联(多带隙结)太阳能电池             | 341        |
| 13.7.1 级联太阳能电池的基本原理            | 341        |
| 13.7.2 级联太阳能电池的连接结构            | 342        |
| 13.7.3 级联太阳能电池的效率              | 343        |
| 13.7.4 级联太阳能电池的材料              | 343        |
| 13.8 量子阱太阳能电池                  | 345        |
| 13.8.1 量子阱太阳能电池的设计、材料和工艺       | 346        |
| 13.8.2 量子阱太阳能电池的性能             | 347        |
| 13.8.3 量子阱太阳能电池的电流-电压特性        | 348        |
| 13.9 II-VI族化合物半导体和无定型Si薄膜太阳能电池 | 348        |
| 13.9.1 概述                      | 348        |
| 13.9.2 II-VI族半导体薄膜太阳能电池        | 349        |
| 13.9.3 黄Cu矿半导体薄膜太阳能电池          | 351        |
| 13.9.4 无定型Si薄膜太阳能电池            | 352        |
| 13.10 带聚光器的太阳能电池               | 353        |
| 13.10.1 太阳光聚光器                 | 353        |
| 13.10.2 太阳光聚光器的类型              | 354        |
| <b>第14章 梯度带隙半导体</b>            | <b>357</b> |
| 14.1 引言                        | 357        |
| 14.2 梯度带隙半导体中的准电场和准磁场          | 358        |
| 14.2.1 梯度带隙半导体中的准电场            | 358        |
| 14.2.2 梯度带隙半导体中的准磁场            | 359        |
| 14.3 梯度带隙半导体的物理特征              | 360        |
| 14.3.1 梯度带隙半导体的能带图             | 360        |
| 14.3.2 梯度带隙半导体的等效态密度和载流子浓度     | 360        |
| 14.3.3 梯度带隙半导体中载流子的扩散与漂移       | 362        |
| 14.3.4 梯度带隙半导体中非平衡载流子的输运       | 362        |
| 14.3.5 梯度带隙半导体中的杂质态            | 363        |
| 14.4 梯度带隙半导体的光学性质              | 364        |
| 14.4.1 梯度带隙对吸收光谱的影响            | 364        |

# 第 1 章 异质结基本概念

早在 1951 年 A. I. Gubanov<sup>[1,2]</sup>就对异质结进行了理论分析,但限于异质结生长技术的困难,直到 1960 年才由 Anderson<sup>[3]</sup>第一次制成高质量的异质结,并提出更为详细的理论模型和能带图。1963 年 H. Kroemer 和 Z. I. Alferov 各自独立地提出了异质结激光器的原理<sup>[4,5]</sup>,1969 年异质结激光器实现了室温连续运转<sup>[6~8]</sup>,这项工作建立了现代光电子学的基础,H. Kroemer 和 Z. I. Alferov 因此获得了 2000 年的诺贝尔物理学奖。

## 1.1 异质结基本概念

相对于由同一种半导体材料构成的同质结而言,由两种不同的半导体材料构成的结称为异质结。由于两种半导体材料的禁带宽度(带隙)、导电类型、介电常数、折射率和吸收系数等电学和光学参数的不同,在器件设计时提供了更大的灵活性,因此引起人们更多的兴趣和关注。根据界面的物理厚度,异质结分为突变异质结和缓变异质结。如果界面的物理厚度是几个原子层的量级,则称为突变异质结。如果界面的物理厚度是扩散长度的量级,则称为缓变异质结。根据两种半导体材料的导电类型是相反还是相同,异质结又分为反型异质结和同型异质结。为了醒目,通常用小写字母 n 或 p 表示窄带隙半导体的导电类型,用大写字母 N 或 P 表示宽带隙半导体的导电类型,按惯例先写出窄带隙半导体,这样反型异质结表示为 nP 结或 pN 结,而同型异质结表示为 nN 结或 pP 结。

下面以突变 pN 异质结的理想情况为例,引入有关异质结的基本概念。所谓理想情况是指忽略两种不同的材料形成异质结时产生的界面态。异质结的形成与两种不同的材料的电子亲和能、禁带宽度和功函数有关。

图 1-1 是两种材料形成异质结前、后的能带图。由于存在两种不同的材料,它们体内的电子能量需要一个共同的参考能级进行比较,根据 Anderson 的电子亲和能规则(Electron Affinities Rule, EAR)<sup>[3]</sup>,把这个共同的参考能级规定为体外真空电子能级  $E_0$ ,并且要求在形成异质结时真空电子能级始终是连续的。电子从导带底移到真空电子能级所需能量称为电子亲和能  $\chi$ ,电子从费米能级移到真空电子能级所需要的能量称为功函数  $\phi$ ,材料的禁带宽度表示为  $E_g$ ,下标 1 和下标 2 分别表示带隙较小和较大的半导体材料。在图 1-1(a)中, $E_{F2}$  的位置高于  $E_{F1}$ ,电子将从材料 2 转移到材料 1,从而产生内建电场,以阻止电子的继续转移,直到材料 1 和材料 2 有统一的费米能级  $E_F$  为止,此时 pN 结处于热平衡状态,内建电场由材料 2 指向材料 1。材料 2 靠近界面处形成正空间电荷区(电子耗尽区),能带向上弯曲,材料 1 靠近界面处形成负空间电荷区(空穴耗尽区),能带向下弯曲,如图 1-1(b)所示。因为在形成异质结时真空电子能级始终是连续的,电子亲和能、禁带宽度是材料的固有参数始终是不变的,这就意味着能带边处处与真空电子能级平行,结果导带在材料 2 的界面附近形成了尖峰,在材料 1 的界面附近形成了尖谷,价带在界面处出现了阶跃,总之能带出现了不连续。这个不连续量,简称为带阶,将对异质结的性能产生重要影响。其中导带带阶用  $\Delta E_c$  表示,价带带阶用  $\Delta E_v$  表示。注意由于  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的存在,此时真空电子能级  $E_0$  的弯曲度  $qV_D$  已经不再代表势垒高度。电子由材料 2 到材料 1 的势垒高度变为  $(qV_D - \Delta E_c)$ ,而空穴由材料 1 到材料 2 的势垒高度变为  $(qV_D + \Delta E_v)$ 。

图 1-2 是突变 pN 异质结加正向偏压  $V$  的能带图,可以看出随着正向偏压  $V$  的增加,从材料 2 到材料 1 的电子势垒高度和从材料 1 到材料 2 的空穴势垒高度都在减少,而导带带阶  $\Delta E_c$  和价带带阶  $\Delta E_v$  不随偏压改变。总之,导带和价带在界面处存在着带阶  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  是所有突变异质结的共同特征。

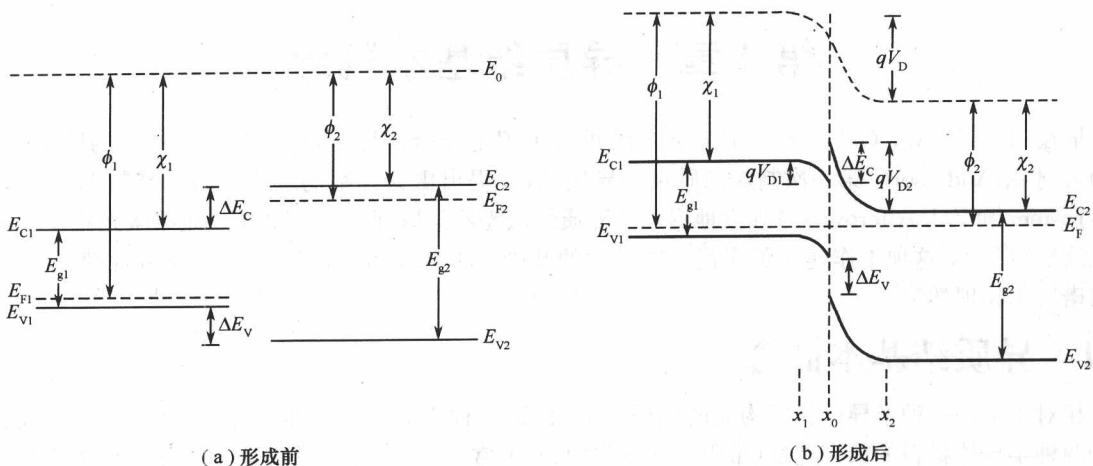


图 1-1 突变 pN 异质结形成前、后的平衡能带图

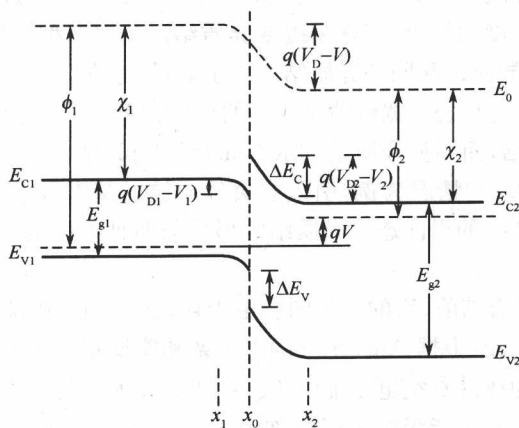


图 1-2 突变 pN 异质结加正向偏压的能带图

## 1.2 异质结基本关系式

两种材料的导带带阶  $\Delta E_C$  和价带带阶  $\Delta E_V$ ，是异质结特有的重要参数，由图 1-1 可以看出，它们和电子亲和能之间的关系为

$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2 \quad (1-1)$$

$$\Delta E_V = (E_{g2} - E_{g1}) - (\chi_1 - \chi_2) \quad (1-2)$$

$\Delta E_C$  与  $\Delta E_V$  之和等于两种材料禁带宽度之差，即

$$\Delta E_C + \Delta E_V = E_{g2} - E_{g1} \quad (1-3)$$

真空电子能级的弯曲度  $qV_D$  等于两种材料功函数之差，即

$$qV_D = \phi_1 - \phi_2 \quad (1-4)$$

其中， $V_D$  是异质结的内建电势差，又称接触电势差或扩散电势。 $V_{D1}$  和  $V_{D2}$  分别是界面两侧两种半导体材料中的内建电势差，它们之间的关系为

$$V_D = V_{D1} + V_{D2} \quad (1-5)$$

因为功函数与费米能级有关，因此内建电势差  $V_D$  是通过费米能级求解的，即

$$V_D = \frac{E_{F2} - E_{F1}}{q} \quad (1-6)$$