全国普通高校
电子信息与
电气学科
基础规划教材

半导体物理基础教程

郭子政 编著



清华大学出版社

www.ertongbook.com

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

半导体物理基础教程

郭子政 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面介绍半导体物理学的基本理论，以物理科学、材料科学与工程、电子技术的眼光全面审视半导体物理的发展过程和进展情况。

本书内容包括半导体的晶体结构、常见半导体的能带结构、半导体中杂质和缺陷效应、载流子的统计计算方法、半导体导电特性、光电导效应、光伏效应、金属-半导体的接触特性、半导体同质 PN 结、半导体异质结构、MOS 结构的特性及应用、半导体发光特性、半导体量子限域效应、半导体磁效应、半导体隧穿效应等，以及建立在此基础之上的各种半导体器件的原理和应用问题。

本书可作为高等院校电子信息类本科专业的半导体物理课程教材，也可供相关科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。
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

半导体物理基础教程/郭子政编著. —北京：清华大学出版社，2017
(全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材)
ISBN 978-7-302-45904-0

Ⅰ. ①半… Ⅱ. ①郭… Ⅲ. ①半导体物理－高等学校－教材 Ⅳ. ①O47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 302436 号

责任编辑：曾　珊
封面设计：傅瑞学
责任校对：焦丽丽
责任印制：杨　艳

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　　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
课 件 下 载：http://www.tup.com.cn，010-62795954
印 刷 者：北京富博印刷有限公司
装 订 者：北京市密云县京文制本装订厂
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×260mm　　**印　　张**：10.25　　**字　　数**：251 千字
版　　次：2017 年 2 月第 1 版　　**印　　次**：2017 年 2 月第1 次印刷
印　　数：1～1500
定　　价：29.00 元

产品编号：070728-01

前言

20世纪是发明的世纪。半导体科学和技术在这个发明的世纪中无疑是主角。关于这一点可以从诺贝尔奖的历史中窥见一斑。

1909年，布劳恩(Carl Braun)因为无线电报的发明而与马可尼一道获得了诺贝尔奖，布劳恩的贡献包括半导体整流效应的发现，这对于信号检测非常重要。

1956年，Bell实验室的肖克莱(W. B. Shockley)、巴丁(J. Bardeen)和布拉顿(W. H. Brattain)因为发明半导体晶体管(1948年)获得诺贝尔物理学奖。

肖克莱后来被称作“硅谷之父”，他在1958—1960年任肖克莱晶体管公司经理，管理着硅谷的第一家半导体企业。他手下曾出现过诺伊斯、摩尔这样的IT精英人物，他们曾创办仙童公司和英特尔公司。而巴丁是历史上唯一一个两次获得诺贝尔物理学奖的人，他将低温超导的BCS理论这样的财富留给了后人。

1973年，IBM公司的江崎玲玉奈(L. Easki)因为发现半导体量子隧道效应获得诺贝尔物理学奖。

1978年，当时还在Bell实验室，后来在普林斯顿大学的安德森(P. W. Anderson)和英国剑桥大学卡文迪许教授和物理系主任的莫特(N. F. Mott)因为发现金属和半导体中的无序效应及量子输运获得诺贝尔物理学奖。

1985年，德国马普固体物理研究所所长克林青(K. von Klitzing)因为发现半导体二维结构中的整数量子霍尔效应获得诺贝尔物理学奖。

1998年，当时还在Bell实验室，后来分别在哥伦比亚大学、普林斯顿大学和斯坦福大学的斯托默(H. L. Störmer)、崔琦(D. C. Tsui)、劳克林(R. B. Laughlin)因为发现半导体二维结构中的分数量子霍尔效应获得诺贝尔物理学奖。

2000年，苏联科学院物理问题研究所阿尔弗雷夫(Z. I. Alferov)、美国加州大学克罗默(H. Kroemer)和德州仪器公司的基尔比(J. S. Kilby)共同获得诺贝尔物理学奖。前两位因为发明了半导体异质结构，从而奠定了半导体微电子和光电子技术基础而获奖，而基尔比则是因为于1958年发明硅集成电路，即成功地实现了把电子器件集成在一块半导体材料上的构想。

2009年，高锟因为光纤而获奖，Bell实验室的博伊尔(Willard S. Boyle)和史密斯(George E. Smith)因发明电荷耦合器件(CCD)图像传感器而获奖。

2010年，诺贝尔物理学奖授予英国曼彻斯特大学科学家安德烈·海姆(Andre Geim)和康斯坦丁·诺沃肖洛夫(Konstantin Novoselov)，以表彰他们在石墨烯材料方面的卓越研究。

2014年，诺贝尔物理奖授予发明有效蓝色发光二极管(Light-emitting diode，LED)的赤崎勇(Isamu Akasaki)、天野浩(Hiroshi Amano)和中村修二(Shuji Nakamura)。赤崎勇于1929年出生在日本知览町(Chiran，Japan)，1964年于日本名古屋大学获得博士学位。现为日本名城大学教授、日本名古屋大学特聘教授。天野浩于1960年出生于日本滨松，

1989年于日本名古屋大学获得博士学位，现为日本名古屋大学教授。中村修二，美国国籍，1954年出生于日本伊方町(Ikata, Japan)。1994年于日本德岛大学获得博士学位。现为美国加州大学圣巴巴拉分校教授。

从上述诺贝尔物理奖获奖情况可以看出：半导体物理的研究不但可以揭示崭新的物理现象，而且为人类社会特别是信息社会的发展奠定了几乎全部的基础和支柱(从信息的接受、处理、发射到传输，无一不是基于半导体器件)。

人类使用材料的历史就是人类的进步史。到目前为止，人类历史经历了石器时代-铜器时代-铁器时代-硅器时代。硅器时代即半导体时代，我们现在处于半导体时代。可以预期的是，今后很长一段时间内，仍将处于半导体时代。

为什么历史选择了半导体？半导体材料为何能够担此重任？主要是因为其特性。实际上，半导体确实具有一些重要特性，主要包括：(1)温度升高使半导体导电能力增强，电阻率下降。例如，室温附近的纯硅(Si)，温度每增加8℃，电阻率ρ相应地降低50%左右；(2)微量杂质含量可以显著改变半导体的导电能力，以纯硅中每100万个硅原子掺进一个Ⅴ族杂质(比如磷)为例，这时硅的纯度仍高达99.9999%，但电阻率ρ在室温下却由大约214 000Ωcm降至0.2Ωcm以下；(3)适当波长的光照可以改变半导体的导电能力，例如在绝缘衬底上制备的硫化镉(CdS)薄膜，无光照时的暗电阻为几十兆欧，当受光照后电阻值可以下降为几十千欧。此外，半导体的导电能力还随电场、磁场等的作用而改变。

概括起来，半导体的性质容易受到温度、光照、磁场、电场和微量杂质含量等因素的影响而发生改变，而正是半导体的这些特性使其获得了广泛的应用。除此之外，半导体在与半导体以及与其他材料接触而形成界面(结)时，也会表现出与众不同的效应来，这些效应成为各种半导体器件的基础。

为什么半导体会有这些出众的表现？材料的性能主要决定于什么？实际上，关于这个问题的困惑久已有之。例如，在化学元素周期表上，铜和金在一族，但它们的性质有天壤之别。铜很容易生锈，而金则可以永葆青春。由不同元素组成的材料，它们的差别究竟是如何造成的呢？即使是同一种材料，当尺度减小时性质也会剧变，例如纳米级别的金会失去其富贵之色而呈现黑色。这其中的缘由又是怎样的呢？

对这些问题的回答不是简单几句话就可以完成的。一般而言，材料的性质决定于材料的结构，性质是结构的外在反映，对材料的使用性能有决定性影响，而使用性能又与材料的使用环境密切相关。材料的结构取决于其组成、形成条件(包括制备工艺及加工过程)等因素。

材料结构包括三个层次：第一个层次是原子的空间排列，第二个层次是原子及电子结构，第三个层次是组织结构或相结构。如果材料中的原子排列非常规则且具有严格的周期性，就形成晶态结构；反之则为非晶态结构。不同的结晶状态具有不同的性能，如玻璃态的聚乙烯是透明的，而结晶聚乙烯是半透明的。原子中电子的排列在很大程度上决定了原子间的结合方式，决定了材料类型(金属、非金属、聚合物等)，决定了材料的热学、力学、光学、电学、磁学等性质。晶粒之间的原子排列变化改变了它们之间的取向，从而影响材料的性能。其中晶粒的大小和形状起关键作用。另外，大多数材料属于多相材料，其中每一相都有自己独特的原子排列和性能，因而控制材料结构中相的种类、大小、分布和数量就成为控制性能的有效方法。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

作为材料结构第一个层次，本书将首先介绍半导体的晶体结构。在此基础之上讨论半导体中的电子状态与能带结构(材料结构第二个层次)。为什么材料会有导体、半导体、绝缘体之分呢？或者换句话说，什么样的材料可能是导体、半导体或绝缘体呢？固体能带理论很好地回答了这个问题。能带理论告诉我们，导体、半导体或绝缘体的差别在于它们的能带结构，材料导电的条件是存在部分填充的能带和小的禁带。这一点会在第 2 章详述。

如前所述，半导体对掺杂十分敏感，其原因还需要从量子力学能带理论来理解，本书第 3 章介绍了杂质半导体及其杂质能级。半导体工艺就是控制掺杂的工艺。从而控制电流，即控制载流子的流动。在本书的第 4、5 章介绍电流的计算方法。首先在第 4 章介绍载流子浓度的计算方法，在第 5 章则具体讨论半导体中漂移电流、扩散电流等各种电流的计算和影响因素。其中温度对迁移率和电子浓度等的影响非常巨大，正如前文所述，这是半导体的一个重要性质。第 6 章介绍光照对半导体的影响。讨论了非平衡载流子的产生与复合。

半导体 pn 结结构、半导体-金属结构、MOS 结构、半导体异质结构是搭建半导体器件的 4 种基本结构。本书将在第 7～10 章分别介绍。

目前，硅(Si)和砷化镓(GaAs)是半导体器件和集成电路生产中使用最多的半导体材料。本书的讨论也主要以这两种半导体材料为主。

半导体科学与技术经过半个多世纪的发展，仍然充满活力。2014 年蓝光 LED 获得诺贝尔奖就是实例。关于 LED 以及白光照明等现状及原理肯定是读者所关心的。这部分内容将在第 11 章介绍。半导体另一个活跃的领域是所谓低维系统。量子限域效应带来的新效应正逐渐获得应用。关于半导体低维结构将在第 12 章简介。另一方面，从前面关于诺贝尔物理学奖的介绍似乎还可以总结出一个结论，那就是：诺贝尔物理学奖越来越接近“电子奖”。应用问题始终是物理发现的原动力，这一点对后摩尔时代的人们也是如此。目前，传统电子学理论面临发展的瓶颈，发展新型器件是解决问题的关键。自旋电子器件是近年研究的热点之一。另一种新型器件是隧穿场效应管。关于这方面的内容将在第 13、14 章做简要介绍。

作者 30 年前毕业于半导体专业，与半导体物理渊源深厚。30 年前的半导体物理教学与今天的半导体教学应该有什么样的差别？首先是课时减少了，目前，很多学校进行了教学改革，减少课时量，提倡学生自主学习。另外，学生对象和学习目的不同了。随着学分制改革的不断深入，要求课程适应性更强，对象更广。当然，还有学生兴趣的差别，学生对实践应用内容的要求。所有这些，都对应了教学上的改革，首先应从教材入手。目前，相比于慕课、视频公开课等方面，高校教材改革相对滞后。尽管目前已经出版了不少新教材，但主要是为了满足新专业的需求。传统领域(如半导体物理)的教材改革步伐不大，除强调内容的更新、概念的准确、体系的严密之外，乏善可陈。实际上，教材改革还有一个经常被人忽略的方面，就是教材的科普化。这也是本书编写的初衷之一。

教材的科普化就是尽量从科普的角度、用科普的语言对相关内容进行介绍，力求通俗易懂。这对于教材写作还是有一定难度的，所以本书的科普还只限于部分内容。例如第 1、2 章，本书的科普重点侧重于以下内容。材料的性质究竟是由什么决定的？是晶体结构还是电子结构？第 3 章讲述杂质和缺陷的作用：从青铜到铸铁，都是杂质掺杂的结果，半导体工艺就是控制掺杂的工艺。半导体器件多是电流控制型器件，如何计算电流是一个关键问题。实际上，电流就是载流子的运动，载流子浓度的计算其实就是加权平均。这一点成为第 4 章

的科普重点。1833 年,英国科学家法拉第(Michal Faraday)发现了半导体的温度效应,即本征半导体电阻率随温度下降,半导体理论如何解释这一古老的发现成为第 5 章的科普重点。第 6 章是关于非平衡载流子的理论,并以光导材料为例进行说明。实际上史密斯(W. Smith)于 1873 年发现的硒的性质是现代激光打印机和复印机的基础。第 7 章介绍 pn 结,我们科普的重点是广义欧姆定理。利用广义欧姆定理可以很好地解释平衡时能带平直的现象。第 8 章的内容是金属和半导体的接触现象,科普重点有两个,首先 1874 年德国的布劳恩(K. F. Braun)发现硫化物的电导率与所加电压的方向有关的现象就是肖特基结的整流特性;另外,费米能级是表征掺杂水平的,如果费米能级发生钉扎(不随掺杂改变)会发生什么效应。第 9 章介绍 MOS 结构和利用浮栅场效应管的闪存的基本原理,我们看到 MOS 场效应管类似于水龙头。第 10 章在半导体异质结构理论中,我们指出钢筋水泥蕴含的材料生长原则对半导体同样适用,另外强调超晶格(人工晶格)和超晶体(人工晶体)是有区别的。第 11 章的科普重点包括光是如何产生的,另外,目前荧光灯正被白光 LED 取代、液晶显示正被 OLED 显示取代,这种变化是如何发生的。第 12 章半导体低维结构中特别指出电子运动受限是其能量量子化的根源。第 13 章介绍基于半导体的传统电子学的发展遇到了哪些瓶颈。第 14 章介绍隧道型量子器件。随着半导体工艺由微米发展到纳米,隧穿原理的应用已经日益广泛。在量子器件中有一类共振隧穿器件,这里的共振技术早有高端应用,例如微波炉等。

教材科普化是当前教学改革和形势发展的需要,本书的尝试还只是初步的,希望能得到广大读者的认可。

作　者

主要参数和符号表

k_0 玻尔兹曼常数 $k_0=1.381\times10^{-23}\text{J/K}$

k 波矢量

K 开尔文，热力学温度单位

ε_0 真空介电常数 $\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\text{F/m}$

ε 电场强度

T 温度，热能 k_0T，室温下 $k_0T=0.026\text{eV}$

h 普朗克常数 $h=6.625\times10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$，约化普朗克常数 $\hbar=h/(2\pi)$

q 电子电荷量 $q=1.6\times10^{-19}\text{C}$

Q 总电荷量

V_t 电子热电压 $V_t=k_0T/q$，室温下 $V_t=0.026\text{V}$

m_0 自由电子质量 $m_0=9.1\times10^{-31}\text{kg}$

m_n^* 电子有效质量

m_p^* 空穴有效质量

E_c 导带底

E_v 价带顶

E_g 禁带宽度（能隙），$E_g=E_c-E_v$

E_D 施主能级

E_A 受主能级

ΔE_D 施主杂质电离能 $\Delta E_D=E_c-E_D$

ΔE_A 受主杂质电离能 $\Delta E_A=E_A-E_v$

μ 迁移率

μ_n 电子迁移率

μ_p 空穴迁移率

ρ 电阻率

σ 电导率，$\sigma=1/\rho$

$\rho_n(\sigma_n)$ 电子电阻率（电导率）

$\rho_p(\sigma_p)$ 空穴电阻率（电导率）

P 散射几率

Pi 电离杂质散射的散射几率

Ps 声学波散射几率

P_o 离子晶体中光学波对载流子的散射几率

τ 平均自由时间

τ_n 电子的平均自由时间

τ_p 空穴的平均自由时间

τ_i 电离杂质散射的平均自由时间

τ_s 声学波散射的平均自由时间

τ_o 离子晶体中光学波对载流子的散射的平均自由时间

$f(E)$ 电子的费米分布函数

$1-f(E)$ 空穴的费米分布函数

$f_B(E)$ 电子的玻尔兹曼分布函数

$f_D(E)$ 电子占据施主能级 E_D 的几率

$g(E)$ 单位体积、单位能量间隔态密度

$g_C(E)$ 导带底附近态密度

$g_V(E)$ 价带顶附近态密度

τ 非平衡载流子寿命（非子寿命）

E_F 平衡费米能级

E_F^n 非平衡电子费米能级

E_F^p 非平衡空穴费米能级

E_i 本征费米能级

n_i 本征载流子浓度

n_0 平衡电子浓度

p_0 平衡态空穴浓度

Δn 非平衡电子浓度

Δp 非平衡空穴浓度

S 扩散流密度

S_n 电子的扩散流密度

S_p 空穴的扩散流密度

D_n 电子扩散系数

D_p 空穴扩散系数

L_n 电子扩散长度

$L_n=\sqrt{D_n\tau_n}$

L_p 空穴扩散长度

$L_p=\sqrt{D_p\tau_p}$

n_p p型半导体电子浓度

n_n　n 型半导体电子浓度

p_p　p 型半导体空穴浓度

p_n　n 型半导体空穴浓度

n_{p0}　平衡态 p 型半导体电子浓度

n_{n0}　平衡态 n 型半导体电子浓度

p_{p0}　平衡态 p 型半导体空穴浓度

p_{n0}　平衡态 n 型半导体空穴浓度

N_i　杂质浓度

N_D　施主浓度

N_A　受主浓度

n_D　未电离的施主杂质浓度

p_A　未电离的受主杂质浓度

n_D^+　离化施主浓度

p_A^-　离化受主浓度

$N_D=n_D+n_D^+$

$N_A=p_A+p_A^-$

N_c　导带有效状态密度

N_v　价带有效状态密度

W　功函数

E_0　真空能级

$W=E_0-E_F$

χ　半导体亲和能，$\chi=E_0-E_c$

$q\phi_{ns}$　金属-n 型半导体接触的金属势垒高度

$q\phi_{ns}=E_c$(表面)$-E_F$

$q\phi_{ps}$　金属-p 型半导体接触的金属势垒高度

$q\phi_{ps}=F_F-E_v$(表面)

E_n　n 型半导体中导带底与费米能级之差

$E_n=E_c$(体内)$-E_F$(体内)

E_p　p 型半导体中费米能级与价带顶之差

$E_p=E_F$(体内)$-E_c$(体内)

qV_D　pn 结自建势，$qV_D=E_F^n-E_F^p$

X_D　pn 结空间电荷区宽度，$X_D=x_n+x_p$

x_n　pn 结空间电荷区 n 区一边的宽度

x_p　pn 结空间电荷区 p 区一边的宽度

C_T　势垒电容

C_D　扩散电容

qV_B　半导体中本征费米能级与费米能级之差，$qV_B=E_i-E_F$

V_s　空间电荷区两端的电势差(表面势)

l、w、d　长、宽、厚等长度变量

教学建议

1. 本书定位

本书不只面向电子技术专业的学生，本书面向的是学分制下对电子技术、微电子学感兴趣、并希望了解一些这个领域专业知识的所有年轻人。因此，教学中应尽量减少数学内容，特别是公式推导。另外，尽量理论联系实际，从应用出发。

2. 建议授课学时

32～48 学时。

3. 教学内容、重点和难点提示、课时分配

序号	教学内容	教学重点	教学难点	课时分配
绪论	半导体简史	与半导体有关的诺贝尔物理学奖		1 学时
第 1 章	半导体晶体结构	晶体的特点和数学描述	宝石和晶体的关系	1 学时
第 2 章	半导体的能带	能带的形成、有效质量、空穴	利用能带理论解释材料的导电性	3～4 学时
第 3 章	杂质半导体和杂质能级	掺杂的重要性、施主杂质、受主杂质、杂质补偿	杂质补偿及应用	2 学时
第 4 章	半导体中的平衡载流子	态密度和电子浓度的计算、费米能级、本征半导体和杂质半导体	态密度和简并度的区别、统计方法计算电子浓度的基本思想	2～3 学时
第 5 章	半导体中载流子的输运现象	欧姆定律的微分形式、散射、迁移率、强电场效应、耿氏效应、负微分电导现象	双谷模型理论	2 学时
第 6 章	非平衡载流子	平衡载流子和非平衡载流子、光导材料、准费米能级、漂移和扩散电流、爱因斯坦关系	光导材料应用、如何用平衡统计理论处理非平衡情况	2 学时
第 7 章	pn 结	pn 结的性质、广义欧姆定律、隧道效应	隧穿发生的条件	4 学时
第 8 章	金属-半导体接触	肖特基接触、欧姆接触、费米能级钉扎效应、肖特基整流二极管理论	费米能级钉扎效应、欧姆接触条件	2～4 学时
第 9 章	MOS 结构	MOS 结构、耗尽、反型、二维电子气、MOS 电容、MOSFET 原理、半导体存储器、浮栅 MOS 管、鳍式晶体管	栅压如何控制 MOS 结构的耗尽和反型、浮栅场效应管作为存储单元的原理、鳍式晶体管的特点	3～4 学时

续表

序号	教学内容	教学重点	教学难点	课时分配
第 10 章	半导体异质结构	异质结、量子阱和超晶格、半导体激光器、晶格匹配和热匹配	Lattice 和 crystal 的区别、光纤传输窗口	2～3 学时
第 11 章	半导体的电光和光电转换效应	LED 原理、白光 LED、OLED、光伏效应	pn 结光伏效应的光电转换机制	2～4 学时
第 12 章	半导体低维结构	量子阱、量子线、量子点、量子限域效应、态密度	低维体系态密度计算	2～3 学时
第 13 章	半导体磁效应	自旋、自旋电子学、半导体的磁效应、霍尔效应、量子霍尔效应、自旋霍尔效应	各种霍尔效应的区别	2～4 学时
第 14 章	隧穿型量子器件原理	共振隧穿二极管、隧穿场效应晶体管、WKB 近似、传输矩阵方法、隧穿电流计算、齐纳隧穿、Fowler-Nordheim 隧穿、Simmons 公式	隧穿电流的计算方法	2～3 学时

4. 网上资源利用

如果课时宽裕，教师可选取一些专家讲座或公开课视频在课堂上播放，以扩大学生的眼界。在今天“互联网＋”的时代，某门课程的师资水平已经不是很重要，我们的年轻人很幸运，他们可以跨越时间、跨越空间、跨越语言，聆听世界范围内大师的声音。

网上资源包括很多种，各个学校的精品课程、慕课、网上可下载的教学课件、可网上观看的教学视频、讲座等等。与本课程相关的视频有很多，例如：

(1)《材料科学是一门科学》，见科学网的科学大讲堂，链接为 http://video.sciencenet.cn/20150127/player/，主讲人为中国科学院物理所的曹则贤研究员。

(2)《半导体元件物理》，见好大学在线 2014 年慕课视频，链接为 http://www.cnmooc.org/portal/course/30/34.mooc，主讲人为台湾交通大学施敏教授。

(3)《藏在 LED 灯里的秘密》见半导体所科学传播中的科普视频，链接为 www.semi.ac.cn/kxcb/kpsp/201408/P020140818518167466788.mp4，主讲人为中国科学院半导体所陈雄武博士。

(4)《通信革命——LED 灯》，见半导体所科学传播中的科普视频，链接为 www.semi.ac.cn/kxcb/kpsp/201408/P020140818518173387475.mp4，主讲人为中国科学院半导体所段靖远博士。

(5)《诺贝尔物理学奖解读：蓝光“LED”照亮世界》，见物理所公开课，链接为 http://www.iop.cas.cn/xwzx/jcspjj/201410/t20141014_4223565.html，主讲人为物理所陈弘研究员。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目 录

第 1 章　半导体晶体结构 …… 1

1.1　晶体与非晶体 …… 1

1.2　晶体结构 …… 2

1.3　半导体的晶体结构 …… 3

习题 …… 5

第 2 章　半导体的能带 …… 6

2.1　能带的形成 …… 6

2.2　半导体中电子共有化运动与能带的量子力学描述 …… 7

2.3　半导体中的 $E(k)\sim k$ 关系及有效质量 …… 10

2.4　硅、锗和砷化镓的能带结构 …… 13

2.5　本征半导体、本征激发和空穴 …… 14

2.6　能带理论应用举例 …… 15

习题 …… 17

第 3 章　杂质半导体和杂质能级 …… 18

3.1　间隙式杂质和替位式杂质 …… 19

3.2　施主和受主 …… 20

3.3　杂质补偿 …… 22

3.4　深能级杂质 …… 23

习题 …… 24

第 4 章　半导体中的平衡载流子 …… 25

4.1　加权求和和加权平均 …… 25

4.2　理想气体分子按速率的分布 …… 25

4.3　导带电子浓度与价带空穴浓度 …… 26

4.4　本征载流子浓度与本征费米能级 …… 29

4.5　杂质半导体的载流子浓度 …… 31

习题 …… 35

第 5 章　半导体中载流子的输运现象 …… 36

5.1　半导体中载流子的运动形式 …… 36

5.1.1　无规则运动——热运动 …… 36

5.1.2　有规则运动 …… 37

5.2　主要散射机构以及迁移率与平均自由时间的关系 …… 38

5.3　迁移率、电阻率与杂质浓度和温度的关系 …… 42

5.4 强电场效应 …… 44
5.5 耿氏效应 …… 44
5.5.1 伏安特性 …… 45
5.5.2 $\overline{v_d}\sim\varepsilon$ 特性 …… 45
5.5.3 双谷模型理论 …… 46
习题 …… 47
第 6 章 非平衡载流子 …… 48
6.1 过剩载流子及其产生与复合 …… 48
6.2 非平衡载流子的寿命 …… 50
6.3 准费米能级 …… 52
6.4 载流子的扩散运动、爱因斯坦关系 …… 55
6.5 连续性方程 …… 58
习题 …… 59
第 7 章 pn 结 …… 61
7.1 pn 结的单向导电性 …… 62
7.1.1 平衡 pn 结 …… 62
7.1.2 pn 结的伏安特性 …… 64
7.2 pn 结电容 …… 67
7.2.1 势垒电容 …… 68
7.2.2 扩散电容 …… 69
7.3 pn 结击穿 …… 69
7.4 pn 结隧道效应 …… 71
习题 …… 74
第 8 章 金属-半导体接触 …… 75
8.1 两类接触 …… 75
8.2 肖特基势垒 …… 76
8.3 金属-半导体整流接触的电流电压关系 …… 79
8.4 欧姆接触 …… 80
习题 …… 82
第 9 章 MOS 结构 …… 83
9.1 MOS 电容 …… 83
9.2 能带图 …… 84
9.3 MOS 结构的 *C-V* 特性 …… 86
9.4 MOSFET 基本工作原理 …… 87
9.5 MOS 存储器结构 …… 88
9.6 鳍式晶体管 …… 90
习题 …… 92

第 10 章 半导体异质结构 …… 93
10.1 异质结 …… 94
10.2 异质结的能带图 …… 95
10.3 量子阱和超晶格 …… 97
10.4 异质结激光器 …… 98
10.5 晶格匹配和热匹配 …… 102
习题 …… 104
第 11 章 半导体电光和光电转换效应 …… 105
11.1 光是怎么产生的 …… 105
11.2 电致发光和 LED …… 106
11.3 白光 LED …… 108
11.4 OLED …… 110
11.5 半导体光电效应 …… 111
11.5.1 光电效应 …… 111
11.5.2 半导体的内光电效应 …… 112
11.6 半导体光伏效应的应用 …… 113
习题 …… 114
第 12 章 半导体低维结构 …… 115
12.1 量子受限系统 …… 115
12.2 量子限域效应 …… 117
12.2.1 量子阱 …… 117
12.2.2 量子线 …… 119
12.2.3 量子点 …… 119
12.2.4 态密度 …… 120
习题 …… 123
第 13 章 半导体磁效应 …… 124
13.1 到了重新发明晶体管的时候了 …… 124
13.2 自旋和自旋电子学 …… 125
13.3 半导体的磁效应 …… 126
13.4 自旋霍尔效应 …… 128
习题 …… 131
第 14 章 隧道型量子器件基础 …… 132
14.1 半导体隧道效应 …… 132
14.1.1 共振隧穿二极管 RTD …… 132
14.1.2 隧穿场效应管 …… 133
14.2 透射系数 …… 134
14.2.1 WKB 近似 …… 134

14.2.2 传输矩阵方法 …… 137
14.3 隧穿电流 …… 139
14.4 半导体中的隧穿 …… 141
14.4.1 p^+n^+结隧穿：齐纳隧穿 …… 142
14.4.2 MIS(MOS)隧穿：Fowler-Nordheim 隧穿 …… 142
14.4.3 MIM 隧穿：Simmons 公式 …… 143
习题 …… 144
习题参考答案 …… 145
参考文献 …… 147

第1章　半导体晶体结构

阅读提示：什么决定了材料性质？晶体结构吗？

1.1　晶体与非晶体

固体可以分成两种：晶体(crystal)和非晶体(non-crystal)。晶体具有一定的外形、固定的熔点，更重要的是，组成晶体的原子(或离子)在至少是微米量级的较大范围内都是按一定的方式规则排列而成，称为长程有序。晶体又分为单晶与多晶，单晶是指整个晶体主要由原子(或离子)的一种规则排列方式所贯穿，多晶则是由很多小晶粒杂乱地堆积而成。非晶没有规则的外形，也没有固定熔点，内部结构不存在长程有序，只是在若干原子间距内的较小范围内存在结构上的有序排列，称作短程有序。二维情形下的非晶、多晶和单晶如图1.1所示。

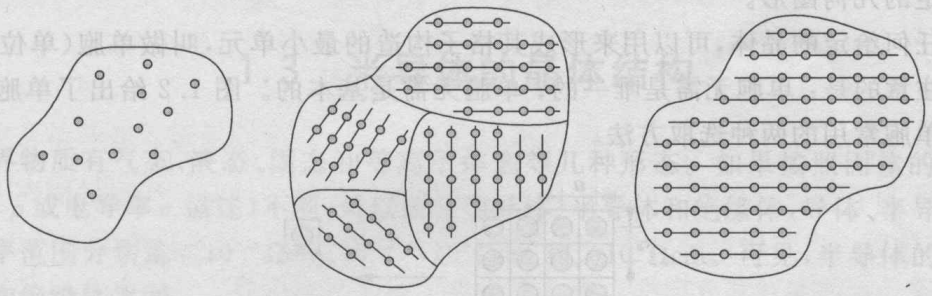


图1.1　非晶、多晶和单晶示意图

晶体的世界是一个晶莹绚丽、色彩斑斓的世界。人们常见的晶体有水晶、石盐、蔗糖等，当然，还有宝石。蓝宝石常用作材料生长的衬底，红宝石是最早的激光器材料；而提到硅，就不能不说到金刚石结构。

宝石就是典型的单晶体，除了上述的红宝石、蓝宝石，祖母绿、海蓝宝石、碧玺、黄玉、橄榄石、金绿宝石、透辉石、拉长石、月光石等也是名闻海外的。除了宝石，在中国比较流行的还有玉石，不同于宝石，玉石是多晶体，包括翡翠、软玉、岫玉等。

宝石并不只是“中看不中用”的摆设。很多宝石具有许多优良的性质，从而在广泛的领域获得应用。例如，上面提到的蓝宝石。蓝宝石单晶的透光范围为0.14～6.0μm，覆盖紫外、可见、近红外到中红外波段，且在3～5μm波段具有很高的光学透过率；具有高硬度(仅次于金刚石)、高强度、高热导率、高抗热冲击品质因子的力学及热学性能；具有耐雨水、沙尘、盐雾等腐蚀的稳定化学性能；具有高表面平滑度、高电阻率及高介电性能。这些优良的光学、力学、热学、化学及电学性能决定了它在军事及民用领域中的重要地位和作用。在电子学领域，蓝宝石以其综合性能最好，成为使用最广泛的氧化物衬底材料(substrate materials)，主要用作半导体薄膜衬底材料、大规模集成电路衬底等。

天然的蓝宝石十分稀少，因此价格昂贵。使用天然宝石加工制作电子产品是不现实的。因此，人工制作的宝石晶体有较高的需求。要想制作人工宝石，首先要知道其化学组成。蓝

宝石的组成为氧化铝(Al_2O_3),是由三个氧原子和两个铝原子以共价键形式结合而成。就颜色而言,单纯的氧化铝结晶是呈现透明无色的,而不同颜色元素离子渗透于生长中的蓝宝石,可使蓝宝石显现出不同的颜色。在自然界中,蓝宝石晶体内含有钛离子(Ti^{3+})与铁离子(Fe^{3+})时,会使晶体呈现蓝色而成为蓝色蓝宝石(Blue Sapphire)。当晶体内含有铬离子(Cr^{3+})时,会使晶体呈现红色,而成为红宝石(ruby)。当晶体内含有镍离子(Ni^{3+})时,晶体会呈现黄色,而成为黄色蓝宝石。目前蓝宝石晶体的生长技术已经十分成熟。

1.2 晶体结构

一般人认为晶体就像水晶和石盐那样,具有规则的几何多面体形状。在矿物学、岩石学等许多学科中,习惯上将具有几何多面体外形的结晶质固体称为晶体;不具有几何多面体外形的固体称为结晶质/晶质体。

严格地说,晶体是内部质点在三维空间呈周期性重复排列的固体;或者说,晶体是具有格子(lattice)构造的固体。所谓格子构造,是指内部质点(原子、离子或分子)作规律排列,并构成一定的几何图形。

对于任何给定的晶体,可以用来形成其格子构造的最小单元,叫做单胞(单位晶胞,unit cell)。应注意的是:单胞无需是唯一的;单胞无需是基本的。图 1.2 给出了单胞的示意图以及这种单胞常用的两种选取方法。

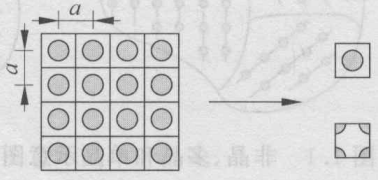
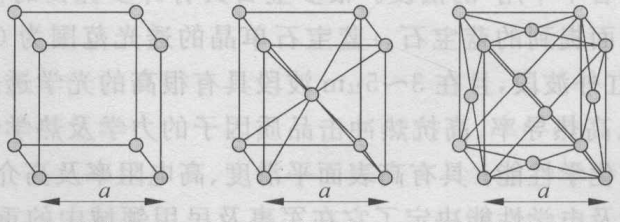


图 1.2 单胞

例如,常见的三维立方单胞有:简立方(cubic)、体心立方(Body-Centered Cubic,BCC)、面心立方(Face-Centered Cubic,FCC)。所谓简立方就是一个有 8 个顶角的正立方体,体心立方是指一个正立方体的 8 个顶角和中心(对角线交点处)各有一个原子的结构,面心立方是指一个正立方体的 8 个顶角和 6 个面心各有一个原子的结构,它们的示意图如图 1.3 所示。



(a) 简立方 (b) BCC (c) FCC

图 1.3 三维立方单胞

晶体的最大特点是具有对称性。所谓对称性,就是借助某一要素,可使相同部分完全重复的性质。这种对称要素可以是对称面(P)、对称轴(L),也可以是对称中心(C)。根据对称

需要全本请访问 www.ertongbook.com