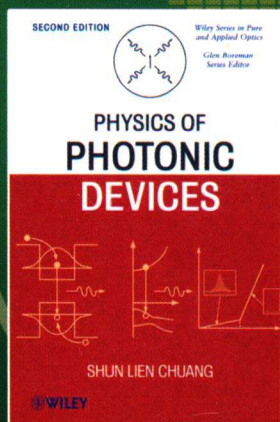


国外电子与通信教材系列



# 光子器件物理 (第二版)

Physics of Photonic Devices  
Second Edition



[美] Shun Lien Chuang (庄顺连) 著

贾东方 王肇颖  
桑梅 杨天新 译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

# 光子器件物理

(第二版)

Physics of Photonic Devices

Second Edition

[美] Shun Lien Chuang(庄顺连) 著

贾东方 王肇颖 桑梅 杨天新 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是美国伊利诺伊大学庄顺连教授的著作。全书共 15 章, 主要内容包括: 光子器件的理论基础, 即量子力学和半导体物理; 光传输的电磁场理论、光在各向异性介质中的传输、光波导理论和耦合模理论; 半导体中的光学过程、半导体激光器基础和先进半导体激光器; 半导体激光器的直接调制、电光调制器、声光调制器和电吸收调制器; 光的探测和太阳能电池。全书着重从物理概念上解释了关键光子器件的工作原理、主要结构以及最新的研究进展, 不但特别强调了光子器件的理论, 给出了严格的理论推导, 而且还给出了理论和实验结果的比较。每一章末尾列出了主要参考资料, 并附有习题。

本书既可作为光学、光电子学、光电集成、光学工程、电子科学与技术、电子工程、物理学和材料学等专业或领域的研究生或高年级本科生的教材, 也可以作为相关科技人员的一本非常有用的参考读物。

Physics of Photonic Devices, Second Edition, Shun Lien Chuang

ISBN: 978-0-470-29319-5

Copyright © 2009, John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, INC.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。未经许可, 不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签, 无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2009-6688

## 图书在版编目(CIP)数据

光子器件物理: 第 2 版/(美)庄顺连著; 贾东方等译. —北京: 电子工业出版社, 2013. 1  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Physics of Photonic Devices, Second Edition

ISBN 978-7-121-19297-5

I. ①光… II. ①庄… ②贾… III. ①光电器件-物理学-高等学校-教材 IV. ①TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 304013 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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 × 1092 1/16 印张: 34.75 字数: 1035 千字

印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

# 中文版序

本书第一版 *Physics of Optoelectronic Devices* 自 1995 年出版以来，一直受到学术界的广泛推崇，被许多知名大学的电机系、物理系和许多科研院所指定为教科书。亦承蒙国际专家学者阅读，并经常引用于科学论文期刊，备感欣慰。多年来，每次参加国际会议，常有朋友或学生询问我的书是否有中文版本。2009 年第二版 *Physics of Photonic Devices* 问世，特此感谢贾东方先生下了极深的功夫，将本书翻译成中文，介绍给中文读者。同时，还要感谢电子工业出版社为此所做的努力和 John Wiley & Sons 出版社对翻译工作的许可。

光子物理学和技术已广为全世界应用，希望本书中文版的发行，对光子物理在中国学术界有激励的效应，同时促进光子科研的进展，造福社会。

庄顺连  
伊利诺伊大学香槟分校  
2012 年 3 月 1 日

## 译 者 序

光子学主要研究光子的产生和运动特性、光子同物质的相互作用及其应用，它是一门新兴的独立学科，也是一门交叉学科和前沿学科。与此同时，建立在光子学基础之上的光子技术，作为信息科学的支撑技术与电子技术相互渗透、补充，并发挥着越来越重要的作用。

光子器件作为光子学和光子技术的重要基础，不但推动了光子技术应用领域的发展，而且使光子学的作用和地位获得了社会的首肯和公认。虽然现已研发的光子器件已能在一定程度上满足很多科技领域发展的需求，但随着信息化社会的发展，不断地对光子器件提出新的要求，继续研发更高性能的光子器件是一项长期的创新性任务。而光子器件的研究必须建立在对固体中的光物理效应的充分掌握与运用的基础上，只有通过深入了解基本的物理学原理，才能发展新的概念并设计具有更高性能的新型光子器件。为此，非常需要一本能够全面介绍光子器件的基本物理原理和发展前沿的书籍，而本书正是这样一部光子学领域的权威著作。

本书作者庄顺连博士现任美国伊利诺伊大学香槟分校电子和计算机工程系 MacClinchie 杰出教授，是国际光电子学和光子学领域的著名学者，长期从事光电子、光子器件的科研和教学工作。本书正是作者多年科研和教学工作的结晶。书中着重从物理概念上解释关键光子器件的工作原理、主要结构以及最新的研究进展，不但特别强调光子器件的理论，给出了严格的理论推导，而且还给出了理论和实验结果的比较。此外，书中还有题材新颖、内容丰富的习题，并列出了一些深入学习的参考文献。这是一本优秀的教材，国外许多知名高校和科研院所采用它作为光电子、光电集成、光学工程、电子科学与技术、通信、材料科学等专业或领域的研究生或高年级本科生的教材<sup>①</sup>，同时对从事光子学和光子技术研究的科技人员来说，本书也是一本非常有价值的参考读物。

我们特此将它翻译出来介绍给中文读者。翻译工作是由天津大学光纤非线性光子学研究室组织完成的，具体分工如下：王肇颖译第1章至第6章；贾东方译第7章至第13章和术语；杨天新译第14章；桑梅译第15章和附录；全书由贾东方审校统稿。葛春风、陈炯、王俊龙参与了翻译工作。

要特别提及的是，在本书的翻译和校对过程中，庄顺连教授给予了细致的指导和无私的帮助，在此向庄教授表示衷心的感谢和崇高的敬意。还要感谢电子工业出版社对翻译工作的大力支持，特别要衷心感谢本书的策划编辑马岚女士和责任编辑周宏敏女士，没有她们的辛勤付出，本书难以顺利出版。

由于译者学识所限，疏漏乃至错误在所难免，恳请广大读者及专家不吝赐教，提出修改意见，我们将不胜感激。

---

<sup>①</sup> 采用本书作为教材的老师可获得本书习题解答，请与电子工业出版社高等教育分社联系。联系电话：010-88254555；E-mail：Te\_service@phei.com.cn。——编者注

# 前 言

自从本书第一版 *Physics of Optoelectronic Devices* 于 1995 年由 John Wiley & Sons 出版社出版以来, 光电子学(或光子学)这一科学领域已有显著进展。这一新版本的目的是加入新的器件概念, 并引入过去发展的新型光子器件。

这一版本包含的新主题包括: 半导体激光器发明简史, 洛伦兹偶极子模型和金属等离子体, 矩阵光学, 表面等离子体波导和光环形谐振器。作为一个新的研究领域, 表面等离子体学和微环谐振器已用于近场成像和生物光子学传感, 因此新版本将它们包括在内。

关于光的产生方面, 在过去 10 年中, 量子点在半导体激光器和纳米光子学中的应用已有相当研究。因此, 本版本包括了量子点和量子线中光吸收的理论, 以及它们在半导体激光器中的应用。DFB 激光器和 VCSEL 部分也做了修正, 进行了更细致的分析, 并提供了数值计算的实例。新型的微腔和光子晶体激光器、量子级联激光器和 GaN 蓝-绿光激光器是令人激动的研究课题, 它们将在第 11 章“先进半导体激光器”中讨论。

量子阱和量子点激光器的高速调制包括电调制和光调制, 相对强度噪声和集成的电吸收调制器-激光器(EML)在光通信中起着重要作用, 它们将在第 IV 部分“光的调制”中介绍。

太阳能电池在清洁能源方面扮演重要角色, 新版本添加了对基于 III-V *pn* 结的太阳能电池的讨论。

## 读者对象

本书的目的是作为光学和光子学专业高年级本科生和研究生的教材。对于光学和电磁学专业的本科生, 第 5 章至第 8 章和第 13 章关于光的传输、电光调制器部分可独立地采用。第 2 章至第 4 章、第 9 章至第 12 章、第 14 章和第 15 章中, 关于半导体能带结构、半导体激光器、电吸收调制器、光电探测器和太阳能电池部分, 对光子学和光电子学领域的研究生和专业人员非常有用。本书对物理、电子工程、机械工程和材料科学的研究者和研究生也非常有用。本书涵盖了应变量子阱和量子点、半导体能带结构和光电子器件物理, 不但具体给出了大部分需要的公式, 而且有选择地包含了一些实验结果。

## 致谢

在此, 我要感谢许多同事和学生, 感谢他们在本书手稿的完成过程中所给予的协作和技术上的讨论。在过去的日子里, 我与许多同事进行过讨论和交流, 特别要感谢小 Nick Nolonyak 教授, 他一直引导并鼓励我。我与许多同事进行过广泛的合作, 他们是 Connie Chang-Hasnain 教授、Paul D. Coleman 教授、K. Y. Cheng 教授、Russell Dupuis 教授、Cun-Zheng Ning 教授、S. H. Park 教授、Hailing Wang 教授、Weng Wang 教授、Ming Wu 教授和 Peidong Yang 教授, 感谢他们就许多研究思想和课题与我进行的技术讨论和对此做出的贡献。我要感谢 Yasuhiko Arakawa 教授、Dieter Bimberg 教授、Peter Blood 教授、Yong-Hee Lee 教授和 Mitsuru Sugawara 博士, 我常与他们探讨一些技术问题。我还要感谢我以前的和现在的学生、博士后和访问学者, 他们对许多论文做出了贡献。

特别要感谢 Doyeol Ahn、Wei-chiao Fang、Matt Fisher、Alan Hsu、X. Jin、Tom Keating、Jungho Kim、Piotr Kondrako、Donghan Lee、Maytee Letteramb、Guobin Liu、Jeff Minch 和 Jean-Francois Seurin，感谢他们对最近的研究工作所做的贡献。

在准备修订版时，Shu-Wei Chang 校对了全部手稿。我的研究小组成员 Guoen Chang、Adrian C. Y. Ni、T. R. Lin、Jian Li、Akira Matsudaira、Shin Mou、David Nielsen 和 Adam Petschke 对书中采用的图进行了技术处理和校对，在此表示感谢。我还要感谢 Kelly C. Voyles 输入了大部分章节内容。我还要感谢许多学生，他们的热情响应和反馈使我在对有关概念的表述方面受益良多。

我要衷心感谢我的母亲和弟弟，感谢他们无条件的支持。感谢妻子淑容，感谢她给予我的爱、奉献和鼓励，没有她一贯的支持，本书不可能完成。还要感谢我的孩子康道、康玲和康伟，感谢他们为我们的生活带来了乐趣。

庄顺连

2008 年 5 月

于伊利诺伊大学

# 第一版前言

本书的目的是作为电子工程、物理学和材料科学专业的研究生和高年级本科生的教材。还为光电子工业的研究人员和研究组织提供了理论背景的概述。书中介绍了半导体电子学、物理学和电磁学的基本原理，然后系统介绍了实用的光电子器件，包括半导体激光器、光波导、定向耦合器、光调制器和光电探测器。本书对体半导体器件和量子阱半导体器件均给出了讨论。书中还给出了严格的理论推导，而且作者努力保持了理论的完备性。

光电子器件的研究进展是如此迅速，因此为跟上这方面的进展，重要的是抓住基本的物理原理。只有通过深入了解基本的物理原理，才能发展新概念并设计具有更高性能的新型器件。光电子器件物理是一个很广的研究领域，它以电磁学、半导体物理和量子力学为基础，有许多有趣的应用。

过去十年中，本书作为我在伊利诺伊大学讲授的“光电子器件”这门课程的教材使用。量子力学在半导体光电子器件中的实际应用给我的学生们许多启发，因为很多量子现象能通过人工材料(如量子阱异质结，它们的吸收和辐射波长由量子化的能级确定)来直接观察。

## 本书范围

本书强调半导体光电子器件的理论，另外还给出了理论和实验结果的比较。本书从基本原理出发，包括麦克斯韦方程、连续性方程和固态电子学的基本半导体方程。这些方程对学习应用于光电子学的半导体物理是必需的。然后，讨论了光的传输、产生、调制和探测，这些对理解光电子器件工作的物理原理很关键。例如，光的产生与传输的知识对理解半导体激光器是如何工作的非常关键。半导体激光器增益系数的理论表明光是如何被放大的，波导理论解释光是如何被限制到激光腔中的波导内的。理解光的调制对设计光开关和光调制器非常有用。体半导体和量子阱半导体的吸收系数说明光是如何被探测的，并引入了对光电探测器工作原理的讨论。

## 本书特色

- (1) 提供了像半导体异质结、体半导体和量子阱半导体带边附近的能带结构计算等重要课题，同时给出了量子阱的 Kane 模型(假设抛物型能带)和 Luttinger-Kohn 模型(考虑价带混合效应)。
- (2) 讨论了光介质波导理论，并应用到半导体激光器、定向耦合器和电光调制器。
- (3) 利用时间相关微扰理论，讨论了基本的光跃迁、吸收和增益，然后用增益和吸收的一般理论去研究体半导体和量子阱半导体中的带间跃迁和子带间跃迁。
- (4) 详细介绍了重要的半导体激光器，如双异质结半导体激光器，条形增益导引半导体激光器，量子阱激光器，分布反馈激光器，耦合激光器阵列，以及面发射激光器。
- (5) 系统地探讨了利用线性和非线性增益对半导体激光器的高速调制，并推导了激光频谱线宽增强因子的解析理论。
- (6) 研究了一些新课题，如应变半导体和应变量子阱激光器能带结构的理论。



(7)系统讨论了包含激子效应的体半导体(Franz-Keldysh 效应)和量子阱半导体(量子限制 Stark 效应)中的电吸收效应;利用氢原子模型讨论了激子束缚态和连续态。

(8)讨论了量子中的子带间跃迁,以及应用于远红外光电探测器的传统带间吸收。

## 致谢

我在麻省理工学院攻读博士学位期间,从事电磁学方面的研究,在此方面受到严格的训练。后来因为量子阱器件的新进展,我对半导体光电子学产生了兴趣。在此,我要衷心感谢 J. A. Kong(孔金瓿)教授(博士论文的指导教师)和许多其他教授,感谢他们给予我的鼓励。

因为文献中列出的研究成果众多,很难列出本领域所有重要的贡献。作为教材,仅强调基本原理。我要感谢允许我引用其图表的那些同事,并向其重要文献未被引用的所有同事致歉。我要感谢本领域的许多同事和朋友,特别是 D. A. B. Miller、W. H. Knox、M. C. Nuss、A. F. J. Levi、J. O'Gorman、D. S. Chemla 和已故的 S. Schmitt-Rink,在 AT&T 贝尔实验室工作期间和离开后,我与他们就量子阱物理问题进行了热烈的讨论。我还要感谢我的许多学生,他们提供了有价值的意见或建议,尤其是校对了手稿的 C. S. Chang 和 W. Wang。我要感谢许多研究助手,特别是 D. Ahn、C. Y. P. Chao 和 S. P. Wu,他们参与了与本书有关的研究。我的量子阱光电子器件的研究在过去受到美国海军研究局的支持,在此深表感谢。还要感谢 L. Beck 阅读了全部手稿,感谢 Kelly C. Voyles 完成了手稿的输入工作。

在此还要衷心感谢我的妻子淑容,感谢她一贯的支持和鼓励。教学和做研究是撰写本书的动机和知识来源,这是一个令人愉快的学习过程。

庄顺连  
1995 年 3 月  
于伊利诺伊大学

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 半导体能带的基本概念和键合图 .....	1
1.2 半导体激光器的发明 .....	3
1.3 光电子学领域 .....	5
1.4 本书概述 .....	10
习题 .....	12
参考文献 .....	12
参考书目 .....	13

## 第I部分 基础理论

第2章 半导体电子学基础 .....	18
2.1 麦克斯韦方程组和边界条件 .....	18
2.1.1 MKS单位的麦克斯韦方程组 .....	18
2.1.2 边界条件 .....	19
2.1.3 准静电场 .....	20
2.2 半导体电子学方程组 .....	20
2.2.1 泊松方程 .....	20
2.2.2 连续性方程组 .....	20
2.2.3 载流子输运方程 .....	21
2.2.4 辅助关系 .....	22
2.2.5 边界条件 .....	25
2.3 半导体中的产生和复合 .....	26
2.3.1 辐射跃迁的带间产生-复合过程 .....	26
2.3.2 非辐射跃迁的产生-复合过程 .....	27
2.3.3 本征量子效率 .....	30
2.3.4 受激辐射过程引起的复合 .....	30
2.3.5 碰撞电离产生-复合过程 .....	31
2.4 产生-复合在光电子器件中的应用及举例 .....	31
2.4.1 均匀光注入 .....	31
2.4.2 非均匀载流子产生 .....	33
2.5 半导体 $p$ - $N$ 和 $n$ - $P$ 异质结 .....	34
2.5.1 无偏置 $p$ - $N$ 结的耗尽近似 .....	36
2.5.2 偏置 $p$ - $N$ 结 .....	39
2.5.3 准费米能级和少数载流子注入 .....	40
2.5.4 电流密度和 $I$ - $V$ 特性 .....	43

2.5.5 半导体 $n$ - $P$ 异质结 .....	44
2.6 半导体 $n$ - $N$ 异质结和金属-半导体结 .....	45
2.6.1 半导体 $n$ - $N$ 异质结 .....	45
2.6.2 金属-半导体结 .....	47
习题 .....	48
参考文献 .....	48
<b>第3章 量子力学基础</b> .....	<b>50</b>
3.1 薛定谔方程 .....	50
3.2 方势阱 .....	52
3.2.1 无限高势垒模型 .....	52
3.2.2 有限高势垒模型 .....	55
3.3 谐振子 .....	58
3.4 氢原子及二维和三维空间中的激子 .....	61
3.4.1 三维解 .....	61
3.4.2 二维解 .....	62
3.5 与时间无关的微扰理论 .....	63
3.5.1 微扰法 .....	63
3.5.2 矩阵表述 .....	67
3.6 与时间有关的微扰理论 .....	68
附录3A Löwdin 再归一化(renormalization)方法 .....	70
习题 .....	71
参考文献 .....	72
<b>第4章 半导体中的电子能带结构理论</b> .....	<b>74</b>
4.1 布洛赫定理和简单能带的 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 方法 .....	74
4.1.1 单一能带的 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 理论 .....	75
4.1.2 二能带(或非简并多能带)模型的 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 理论 .....	76
4.2 能带结构的 Kane 模型:考虑自旋-轨道相互作用的 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 方法 .....	77
4.2.1 函数 $u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ 的薛定谔方程 .....	77
4.2.2 基函数和哈密顿矩阵 .....	78
4.2.3 哈密顿矩阵的本征值和本征函数的解 .....	79
4.2.4 本征能量和对应带边基函数总结 .....	81
4.2.5 一般坐标方向 .....	82
4.3 Luttinger-Kohn 模型:简并能带的 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 方法 .....	83
4.3.1 哈密顿量和基函数 .....	83
4.3.2 利用 Löwdin 微扰法的哈密顿量的解 .....	84
4.3.3 总结 .....	85
4.4 单一能带和简并能带的有效质量理论 .....	86
4.4.1 单一能带的有效质量理论 .....	86
4.4.2 简并能带的有效质量理论 .....	87
4.5 应变对能带结构的影响 .....	87

4.5.1	应变半导体的 Pikus-Bir 哈密顿量	87
4.5.2	无自旋-轨道分裂带耦合的能带结构	89
4.5.3	具有自旋-轨道分裂带耦合的应变半导体的能带结构	94
4.6	任意一维势中的电子态	95
4.6.1	传输矩阵方程的推导及其本征值求解	95
4.6.2	调制掺杂量子阱的自洽解	96
4.6.3	$n$ 型调制掺杂量子阱	98
4.6.4	$p$ 型调制掺杂量子阱	99
4.6.5	电子和空穴布居数	100
4.7	超晶格的 Kronig-Penney 模型	100
4.7.1	传输矩阵的推导	101
4.7.2	本征值和本征矢的解	102
4.8	半导体量子阱的能带结构	104
4.8.1	导带	104
4.8.2	价带	105
4.8.3	子带色散的直接实验测量	107
4.8.4	Luttinger-Kohn 哈密顿量的块对角化 (Block Diagonalization)	107
4.8.5	Luttinger-Kohn 哈密顿量的轴向近似	109
4.8.6	$2 \times 2$ 上哈密顿量解的数值方法	110
4.8.7	$2 \times 2$ 下哈密顿量解的数值方法	110
4.9	应变半导体量子阱的能带结构	111
4.9.1	应变量子阱的子带能量	112
4.9.2	应变量子阱的价带子带能量色散	113
	习题	114
	参考文献	115

## 第 II 部分 光的传输

第 5 章	电磁学和光的传输	120
5.1	时谐场和对偶原理	120
5.1.1	时谐场	120
5.1.2	电磁学中的对偶原理	121
5.2	坡印廷定理和倒易关系	121
5.2.1	坡印廷定理	121
5.2.2	倒易关系	122
5.3	均匀介质中麦克斯韦方程组的平面波解	123
5.4	光在各向同性介质中的传输	123
5.5	有损耗介质中的波传输:洛伦兹振子模型和金属等离子体	125
5.5.1	半导体中的传输常数和折射率	125
5.5.2	洛伦兹偶极子模型	126
5.5.3	导电介质	128
5.6	平面波在界面的反射	130

5.6.1	TE 偏振	130
5.6.2	TM 偏振	132
5.6.3	平面波传输的阻抗概念	133
5.7	矩阵光学	134
5.8	平面波在多层介质反射的传输矩阵法	136
5.9	周期介质中的波传输	139
5.9.1	色散图和阻带	139
5.9.2	平面波在分布布拉格反射器上的反射	141
附录 5A	Kramers-Kronig 关系	146
	习题	148
	参考文献	148
<b>第 6 章</b>	<b>光在各向异性介质中的传输和辐射</b>	<b>150</b>
6.1	光在单轴介质中的传输	150
6.1.1	场解	150
6.1.2	$k$ 波面	153
6.1.3	折射率椭球	154
6.1.4	应用	155
6.2	旋光介质中的波传输:磁光效应	157
6.3	麦克斯韦方程组的通解和规范变换	162
6.4	辐射场和远场图样	164
6.4.1	辐射场的一般表达式	164
6.4.2	远场近似	165
	习题	167
	参考文献	168
<b>第 7 章</b>	<b>光波导理论</b>	<b>169</b>
7.1	对称介质平板波导	169
7.1.1	TE 偏振的电场和导波条件的推导	169
7.1.2	图解导波条件	171
7.1.3	截止条件	171
7.1.4	低频极限和低频极限	172
7.1.5	传输常数 $k_z$ 和有效折射率 $n_{\text{eff}}$	173
7.1.6	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 体系的折射率	173
7.1.7	光学模式的归一化常数	175
7.1.8	光限制因子 $\Gamma$	175
7.1.9	TM 模 $\mathbf{H} = \hat{y}H_y$	175
7.2	非对称介质平板波导	176
7.2.1	TE 偏振, $\mathbf{E} = \hat{y}\mathbf{E}_y$	176
7.2.2	TM 偏振, $\mathbf{H} = \hat{y}\mathbf{H}_y$	178
7.3	波导问题的射线光学方法	178
7.4	矩形介质波导	179

7.4.1	$HE_{pq}$ 模(或 $E_{(p+1)(q+1)}^y$ 模)	180
7.4.2	$EH_{pq}$ 模(或 $E_{(p+1)(q+1)}^x$ 模)	181
7.5	有效折射率法	183
7.6	损耗或增益介质中的波传导	184
7.7	表面等离子体波导	186
7.7.1	单一界面的表面等离子体模式	187
7.7.2	金属平板中的表面等离子体模式	188
	习题	190
	参考文献	191
<b>第 8 章</b>	<b>耦合模理论</b>	193
8.1	波导耦合器	193
8.1.1	横向耦合器	193
8.1.2	棱镜耦合器	193
8.1.3	光栅耦合器	194
8.2	耦合光波导	196
8.2.1	耦合模理论的一般公式表述	196
8.2.2	本征解	198
8.2.3	耦合波导的通解	199
8.3	光波导耦合器的应用	201
8.3.1	光波导开关	201
8.3.2	$\Delta\beta$ 耦合器	202
8.4	光环形谐振器和分插滤波器	203
8.4.1	波导环形谐振器系统的公式表述	203
8.4.2	光分插滤波器	204
8.4.3	耦合环光波导(CROW)结构	206
8.5	分布反馈(DFB)结构	209
8.5.1	耦合模方程的推导	210
8.5.2	耦合模方程的本征解	212
8.5.3	DFB 结构的反射和透射	214
附录 8A	平行波导的耦合系数	216
附录 8B	改进的耦合模理论	216
	习题	217
	参考文献	220

### 第 III 部分 光的产生

<b>第 9 章</b>	<b>半导体中的光学过程</b>	226
9.1	利用费米黄金定则的光跃迁	226
9.1.1	电子-光子相互作用哈密顿量	226
9.1.2	由电子-光子相互作用引起的跃迁率	227
9.1.3	光吸收系数	228

9.1.4	介电常数的实部和虚部 .....	229
9.2	自发辐射和受激辐射 .....	229
9.2.1	光子的态密度 .....	230
9.2.2	受激辐射和自发辐射:爱因斯坦 $A$ 系数和 $B$ 系数 .....	231
9.2.3	光增益和自发辐射谱的推导 .....	232
9.3	体半导体的带间吸收和增益 .....	234
9.3.1	带间光学矩阵元的计算和 $\mathbf{k}$ 选择定则 .....	234
9.3.2	光吸收谱 .....	235
9.3.3	光增益谱 .....	236
9.4	量子阱中的带间吸收和增益 .....	237
9.4.1	量子阱的带间光学矩阵元 .....	237
9.4.2	联合态密度和光吸收谱 .....	238
9.4.3	准费米能级的确定 .....	239
9.4.4	增益谱总结 .....	240
9.4.5	理论增益谱及其和实验的比较 .....	240
9.5	体半导体和量子阱半导体的带间动量矩阵元 .....	241
9.5.1	体半导体的动量矩阵元 .....	242
9.5.2	量子阱的动量矩阵元 .....	242
9.6	量子点和量子线 .....	244
9.6.1	量子点 .....	245
9.6.2	量子线 .....	248
9.7	子带间吸收 .....	250
9.7.1	子带间偶极矩 .....	250
9.7.2	子带间吸收谱 .....	251
9.7.3	实验结果 .....	253
9.7.4	子带间量子级联激光器 .....	254
9.8	考虑价带混合效应的量子阱激光器的增益谱 .....	255
9.8.1	考虑价带混合效应的增益谱的一般公式表述 .....	255
9.8.2	动量矩阵元的计算 .....	256
9.8.3	增益谱的最终表达式和数值例子 .....	258
9.8.4	自发辐射谱和辐射电流密度 .....	259
附录 9A	基函数的坐标变换和动量矩阵元 .....	259
习题	.....	261
参考文献	.....	264
<b>第 10 章</b>	<b>半导体激光器基础</b> .....	<b>268</b>
10.1	双异质结半导体激光器 .....	268
10.1.1	能带图和载流子注入 .....	268
10.1.2	阈值条件 .....	271
10.1.3	光功率输出:粗略推导 .....	271
10.1.4	发光二极管和激光二极管:自发辐射和放大自发辐射所扮演的角色 .....	273

10.1.5	放大自发辐射和光增益测量	275
10.2	增益导引和折射率导引半导体激光器	278
10.2.1	条形结构增益导引半导体激光器	278
10.2.2	折射率导引半导体激光器	280
10.3	量子阱激光器	281
10.3.1	一个简化的增益模型	282
10.3.2	电子和空穴准费米能级的确定	282
10.3.3	零温度增益谱	283
10.3.4	有限温度增益谱	285
10.3.5	峰值增益系数与载流子浓度的关系	286
10.3.6	多量子阱激光器的标度率	287
10.4	应变量子阱激光器	290
10.4.1	有效质量对增益和透明载流子浓度的影响	291
10.4.2	应变对带边能量的影响	291
10.4.3	应变量子阱的能带结构	294
10.4.4	增益-电流密度( $G$ - $J$ )关系	296
10.5	应变量子点激光器	297
10.5.1	量子点结构	298
10.5.2	自发辐射、增益和激射谱	299
10.5.3	高速调制: $p$ 型掺杂和隧穿注入	301
10.5.4	量子点半导体光放大器	305
	习题	306
	参考文献	306
<b>第 11 章</b>	<b>先进半导体激光器</b>	<b>316</b>
11.1	分布反馈激光器	316
11.1.1	DFB 激光器的基本公式表述	316
11.1.2	通过 DFB 结构的反射和透射	318
11.1.3	带有两个端面的 DFB 结构	319
11.1.4	增益耦合 DFB 激光器	322
11.1.5	相移 DFB 激光器	323
11.1.6	分布布拉格反射(DBR)半导体激光器	324
11.2	垂直腔表面发射激光器	326
11.2.1	激射条件	327
11.2.2	载流子注入和光分布:增益导引	330
11.2.3	氧化型 VCSEL:折射率限制	331
11.2.4	温度相关性和结发热	331
11.2.5	光输出和微分子效率	332
11.3	微腔和光子晶体激光器	333
11.3.1	微腔激光器的结构	334
11.3.2	Purcell 因子和自发辐射因子	336



11.3.3	二维光子晶体激光器	339
11.3.4	速率方程和 $L-I$ 曲线	341
11.4	量子级联激光器	342
11.4.1	I 类中红外量子级联激光器结构	344
11.4.2	速率方程、光增益和阈值电流	346
11.4.3	量子级联激光器的光波导和光学模式	348
11.4.4	量子级联激光器的性能	349
11.4.5	THz 量子级联激光器	350
11.4.6	II 类量子级联激光器	354
11.5	GaN 基蓝-绿光激光器和发光二极管	355
11.5.1	纤锌矿晶体的能带结构	356
11.5.2	应变纤锌矿晶体	358
11.5.3	纤锌矿量子阱和极化场	360
11.5.4	应变纤锌矿量子阱激光器的光增益	363
11.5.5	蓝-绿光激光器和 LED	364
11.5.6	非极性(m 平面和 a 平面)和半极性(r 平面)器件	366
11.6	耦合激光器阵列	369
11.6.1	耦合模方程的解	369
11.6.2	远场辐射图样	371
附录 11A	应变纤锌矿晶体的哈密顿量	373
附录 11B	带边光学跃迁矩阵元	375
	习题	377
	参考文献	377

## 第 IV 部分 光的调制

第 12 章	半导体激光器的直接调制	394
12.1	速率方程和线性增益分析	394
12.1.1	线性增益理论	395
12.1.2	小信号调制响应	396
12.2	考虑非线性增益饱和的高速调制响应	397
12.2.1	非线性增益饱和	397
12.2.2	小信号方程的正弦稳态解	398
12.3	输运对量子阱激光器的影响:电调制和光调制	400
12.4	半导体激光器的频谱线宽和线宽增强因子	404
12.4.1	存在自发辐射时光强和相位的基本方程	405
12.4.2	功率谱和半导体激光器频谱线宽	407
12.4.3	半导体激光器的线宽增强因子	408
12.5	相对强度噪声谱	409
	习题	411
	参考文献	411