

先进



电子技术丛书

2

〔日〕伊贺健一 池上彻彦 荒川泰彦 主编

# 半导体激光器 基础

〔日〕栖原敏明 著

科学出版社

共立出版

**图字:01-2001-3719 号**

Original Japanese language edition

Sentan Hikari Electronics Series② Handotai Laser no Kiso

by Toshiaki Suhara

Copyright ©1998

Published by Kyoritsu Shuppan Co.,Ltd.

This Chinese language edition is co-published by

Kyoritsu Shuppan Co.,Ltd. and Science Press

Copyright © 2002

All rights reserved

本书中文版权为科学出版社和共立出版(株)所共有

**先端光エレクトロニクス シリーズ 2**

**半導体レーザの基礎**

**栖原敏明 共立出版(株) 1998**

**图书在版编目(CIP)数据**

半导体激光器基础/(日)栖原敏明著;周南生译;—北京:科学出版社,2002

(先进光电子技术丛书 2)

ISBN 7-03-010187-1

I. 半… II. ①栖… ②周… III. 半导体激光器-基础知识 IV. TN248.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 010453 号

**北京东方科龙图文有限公司 制作**

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

**科学出版社 共立出版 出版**

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂 印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 7 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2002 年 7 月第一次印刷 印张: 8 1/8

印数: 1—5 000 字数: 222 000

**定 价: 23.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 《先进光电子技术丛书》序

1970年,半导体激光器室温连续振荡的成功和低损耗光纤的实现拉开了光电子时代的序幕。现在主干信息通信网几乎全部都实现了光通信,今后光纤也将进入每个家庭。另外,在存储和显示领域对新的光技术的期望也越来越高,而且期望光技术对计算机技术的发展也有所贡献。在21世纪这个高度信息化的社会中,光技术将起十分重要的作用,对它的发展,人们寄予厚望。

为使希望变成现实,光技术必须要不断地创新和发展。因而,从事光技术的人必须具备两种素质:一是具有在任何时候都能从物理学的角度对光的本质有深入的理解能力;二是具有敢于开辟新领域的开拓精神。为此,就要不断地提高基础知识和基本能力水平,而这种水平要建立在从学术性的基础研究到开发研究,直至应用实践的较宽领域的知识积累之上。

策划编撰本丛书的目的是使那些立志承担21世纪光电子技术发展重任的大学生、企业中的研究人员以及技术工作者,充分掌握要实现光电子最新技术的基础知识及应用知识,并把所掌握的知识有效利用到实际工作中。光电子技术人员往往需要较扎实的基础理论知识与器件技术及系统技术有机结合的广泛知识。本丛书系统地归纳了这些知识,因此通过本丛书的学习可以掌握光电子最前沿的技术。本丛书的另一特点是力求叙述简明,以使非光电子专业的学生或科技工作者也能容易理解;编者在编写本丛书时尽量做到使本丛书系统、完整,自成体系,使之达到不依赖其他参考书也能理解的水平;本丛书中各册的执笔者都是其相应领域中的知名学者。

如果能对飞速发展的光电子的最前沿技术有深刻的了解,那

么就能担负起下一次技术创新的使命。本丛书若能对作为 21 世纪信息通信技术支柱的光电子技术的发展有所贡献,编者将不胜荣幸。

编 委

# 前 言

半导体激光器由于能在室温下获得连续振荡而实用化以来,已经过了1/4世纪。20多年来,半导体激光器得到了飞速的发展,现已广泛用作光纤通信和光盘系统的光源并已作为最重要的光电子器件之一。由最初的法布里-珀罗型激光器到分布反馈型激光器及量子阱激光器的开发,逐步实现了高性能、高功能的激光器。并由此扩大了应用范围,进入了一些其它类型激光器难以进入的新的应用领域,进而取代了其它激光器。半导体激光器的重要性越来越大。另外,以半导体激光器为主要器件的光-电集成电路、光集成电路的研究也取得了显著的成果。

在半导体激光器的制作和应用中,需要具有材料、晶体生长、器件设计、制作工艺、特性分析等广泛的知识和技术,现在正在形成被称为半导体激光工程学的学术领域。在这个领域内,已出版了如第1章末的文献中所列的许多优秀专著。基于上述背景,本书把重点放在半导体激光器件的基础理论上。书中从基本概念到最新技术连贯起来构成一个体系,这是本书的一个特点。本书的读者对象范围较宽,从欲了解激光技术的初学者到想从事半导体激光器的开发和应用的研究人员和技术工作者,通过阅读本书均会有相应收获,只要具备大学水平的电磁场理论、量子力学、半导体物理的预备知识就能完全理解本书的内容。所以本书适于作为大学本科生及研究生的有关半导体激光器的教科书和教学参考书。另外,对于正从事研究开发的技术工作者,本书亦可作为有关基础知识的参考书供其阅读参考。

本书采用的结构是,首先对与激光原理有关的量子论基础进行归纳,然后对半导体及量子结构中受激发射的原理与特性,以及半导体光波导的原理与特性进行说明,接着对具体的半导体激光器件进行分析以阐明其特性。各章主要内容如下:

第1章 作为本书内容的导引,叙述半导体激光器的概况。

第2章 对与电子与光子相互作用有关的量子论基础知识进行整理,并归纳成简便形式,其目的是便于理解和分析半导体激光器原理。

第3章 论述半导体中的受激发射,这是半导体激光器最重要的原理,同时对光放大的基本理论和特性也进行说明。

第4章 量子阱结构对提高半导体激光器的功能与性能的重要性越来越大。本章对量子阱结构的光电子特性与受激发射及光放大进行叙述。

第5章 异质结结构是制作半导体激光器的重要元件,本章将对异质结结构光波导的无源光学特性及用此结构实现的激光谐振器进行解说。

第6章 求解以法布里-珀罗型半导体激光器为中心的半导体激光器的速率方程式,并对由此得出的各种工作特性进行说明。

第7章 介绍动态单模激光器的分布反馈型激光器及分布布拉格反射型激光器。

第8章 介绍半导体激光放大器。

本书注意了各章之间内容的连续性。对于公式,不只是为了结果而引用,也对公式的推导过程作了详细说明。为便于读者理解本书从基本原理开始,不是飞跃式的而是连贯的介绍。本书若对在半导体激光器方面有兴趣的研究人员和技术工作者,能有所帮助,作者将非常高兴。最后对给予本书撰写机会的编辑委员会的各位先生致以谢意,并对经常给予指导和鼓励的大阪大学西原浩先生表示感谢。也对在本书出版过程中给予多方帮助的共立出版株式会社の各位表示感谢。

# 目 录

<b>第 1 章 概 述</b> .....	1
1.1 半导体激光器的基本原理与器件结构	1
1.2 半导体激光器材料	8
1.3 注入型半导体激光器的特点	10
1.4 半导体激光器的应用	11
<b>第 2 章 电子与光子的相互作用</b> .....	15
2.1 光波的量子化与光子	15
2.1.1 光模展开表示	15
2.1.2 模密度	16
2.1.3 光波的量子化	17
2.1.4 能量本征态与光子	18
2.1.5 相干状态	20
2.2 电子与光子的相互作用	21
2.2.1 光子-电子系统的哈密顿算符与运动方程式	21
2.2.2 跃迁概率与费米黄金律	23
2.3 光子的吸收与发射	25
2.3.1 光跃迁与矩阵元	25
2.3.2 光吸收	27

- 2.3.3 光的自然发射与受激发射 27
- 2.3.4 爱因斯坦关系式 28
- 2.4 反转分布与光放大 29

### 第 3 章 半导体中的受激发射与光放大增益 ..... 31

- 3.1 半导体的能带结构与受激发射 31
  - 3.1.1 直接跃迁型半导体能带结构 31
  - 3.1.2 受激发射条件 33
  - 3.1.3 光吸收、光发射与吸收系数、增益系数 34
- 3.2 直接跃迁模型 35
- 3.3 GHLBT-SME 模型 38
  - 3.3.1 放大增益和由自然发射的能量积分的表示 38
  - 3.3.2 掺杂半导体中的电子状态密度 40
  - 3.3.3 跃迁矩阵元 42
- 3.4 增益频谱与增益系数 45
  - 3.4.1 准费米能级的确定 45
  - 3.4.2 带隙收缩 46
  - 3.4.3 增益频谱 47
  - 3.4.4 最大增益与载流子密度的关系 48
- 3.5 自然发射与注入电流密度 49
  - 3.5.1 自然发射频谱 49
  - 3.5.2 载流子密度与注入电流密度 50
  - 3.5.3 最大增益与注入电流密度的关系 51



3.5.4	非辐射复合与载流子泄漏电流	51
3.6	密度矩阵分析	53
3.6.1	极化与增益系数	53
3.6.2	极化的密度矩阵表示	54
3.6.3	弛豫效应的处理	56
3.6.4	密度矩阵方程式	56
3.6.5	线性增益与折射率变化	58
3.6.6	饱和效应	61
3.6.7	向多模情况推广	62
<b>第 4 章</b>	<b>量子阱结构中的受激发射</b>	<b>65</b>
4.1	量子阱结构中的电子状态	65
4.1.1	量子阱结构的形成	65
4.1.2	量子限制效应	66
4.1.3	二维电子气	70
4.1.4	量子阱内的孔穴	71
4.1.5	状态密度	72
4.2	直接跃迁模型	74
4.2.1	放大增益与自然发射的表达式	74
4.2.2	跃迁矩阵元	74
4.2.3	换算状态密度	76
4.3	增益频谱与增益系数	76
4.3.1	量子阱激光器的结构	76
4.3.2	准费米能级的确定	77

4.3.3	量子阱增益频谱的特点	78
4.3.4	偏振关系	80
4.3.5	激子效应	80
4.3.6	带尾与弛豫效应	80
4.3.7	最大增益与载流子密度的关系	82
4.3.8	吸收频谱与最大增益波长	83
4.4	自然发射与注入电流密度	84
4.5	应变量子阱	85

## 第 5 章 半导体异质结构光波导 ..... 89

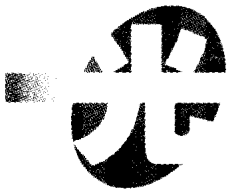
5.1	半导体激光器中光波导的概况	89
5.2	光波的基本方程式	91
5.2.1	麦克斯韦方程式与波动方程式	91
5.2.2	描述注入载流子的半导体	92
5.3	波导内的光波	93
5.3.1	波导内光的电磁场模	93
5.3.2	模间正交性与功率流	94
5.4	平面波导	95
5.4.1	波动方程式	95
5.4.2	阶跃形折射率波导	96
5.4.3	渐变折射率波导	102
5.5	扰动的处理与光波限制系数	106
5.5.1	波导变化引起的传播常数的变化	106
5.5.2	载流子注入效应与损耗的处理	108

5.5.3	波导模限制系数	108
5.6	沟道形波导	110
5.6.1	马卡特利方法	110
5.6.2	等价折射率法	112
5.6.3	增益波导	113
5.6.4	折射率波导	115
5.7	波导端面反射	116
5.7.1	平面波的反射	117
5.7.2	波导模的反射率	118
5.8	波导型法布里-珀罗谐振器	120
5.8.1	透射特性	121
5.8.2	光波功率积蓄	122
5.8.3	纵谐振模与光子寿命	123
5.9	远场图	126
<b>第 6 章</b>	<b>半导体激光器的特性</b>	<b>129</b>
6.1	半导体激光器的结构与激射概要	129
6.1.1	法布里-珀罗型半导体激光器的结构	129
6.1.2	激射条件	130
6.1.3	注入电流与输出光功率	132
6.2	速率方程式	133
6.2.1	速率方程式分析概要	133
6.2.2	载流子密度的速率方程式	144
6.2.3	光子密度	135

6.2.4	光子密度的速率方程式	136
6.2.5	光波相位的速率方程式	137
6.2.6	速率方程式的图示与扩展	138
6.3	稳态激射特性	139
6.3.1	单模模型与速率方程式的近似解	139
6.3.2	阈值电流与输出光功率	140
6.3.3	自然发射效应	141
6.3.4	横模特性	143
6.3.5	纵模频谱	144
6.3.6	模间竞争	147
6.4	调制特性	148
6.4.1	小信号调制的速率方程式	148
6.4.2	瞬态特性与弛豫振动	150
6.4.3	正弦波调制与频率响应	152
6.4.4	频率啁啾	153
6.4.5	大信号过渡响应	155
6.4.6	振荡延迟	157
6.5	噪声特性	158
6.5.1	威纳-肯钦定理与散粒噪声	158
6.5.2	朗之万噪声源与起伏方程式	160
6.5.3	朗之万噪声源的相关函数与功率频谱	161
6.5.4	强度噪声	163
6.5.5	频率噪声	166
6.5.6	多模噪声	168

6.5.7	返回光感应噪声	170
6.6	单模频谱与频谱线宽	174
6.6.1	夏劳-汤斯线宽	174
6.6.2	半导体激光器的线宽	175
6.7	超短光脉冲的发生	178
6.7.1	自脉冲振荡	178
6.7.2	增益开关	178
6.7.3	锁模	179
<b>第 7 章</b>	<b>分布反馈型激光器</b>	<b>183</b>
7.1	动态单模激光器	183
7.2	耦合模方程式	185
7.2.1	波矢图和布拉格条件	185
7.2.2	光栅的描述	186
7.2.3	模耦合方程式	186
7.2.4	模耦合方程式与标准模	188
7.2.5	耦合系数和发射损耗系数	190
7.3	分布反馈型(DFB)激光器	191
7.3.1	DFB 激光器的激射条件	191
7.3.2	折射率耦合 DFB 激光器	192
7.3.3	相位移动折射率耦合 DFB 激光器	194
7.3.4	增益耦合 DFB 激光器	196
7.3.5	光子寿命和速率方程式	197
7.3.6	工作特性	200

7.4	分布布拉格反射型(DBR)激光器	203
7.4.1	分布布拉格反射器	203
7.4.2	DBR 激光器的激射条件	207
7.4.3	DBR 激光器的组成与工作特性	208
7.4.4	可变波长的 DBR 激光器	209
<b>第 8 章</b>	<b>半导体激光放大器</b>	<b>211</b>
8.1	增益频谱与增益饱和	211
8.2	谐振型激光放大器	213
8.3	行波型激光放大器	214
8.3.1	放大率和放大器频带	215
8.3.2	饱和输出	216
8.3.3	噪声特性	217
8.4	锥形激光放大器	219
8.4.1	结 构	219
8.4.2	光束传播法的分析	220
8.4.3	特 性	221
8.5	MOPA 激光器	222
<b>附 录</b>		<b>225</b>
<b>索 引</b>		<b>233</b>



## 概 述

作为其它各章详述内容的导引,本章首先对半导体激光器进行概括介绍。

### 1.1 半导体激光器的基本原理与器件结构

半导体激光器(semiconductor laser)是利用半导体中的电子光跃迁引起光子受激发射而产生的光振荡器和光放大器的总称。这个想法早在1957年就被提出来了<sup>[1]</sup>。1958年Schawlow-Townes建立了激光器的基本理论<sup>[2]</sup>,1960年证实蓝宝石激光器和He-Ne激光器能产生激射,不久就对半导体激光器进行了初期的研讨<sup>[3~5]</sup>。1962年在最早的半导体激光器——GaAs激光器中观察到了低温脉冲激射<sup>[6~8]</sup>。1970年完成了室温连续激射<sup>[9~11]</sup>。其后由于各方面的努力,半导体激光器取得了显著的发展。现在作为典型的光电子器件之一,已经应用于许多领域<sup>[a~]</sup>。

原子或分子中的电子能量以分立值的形式构成能级。如图1.1(a)所示,能量差为 $E$ 的两个能级,上能级被电子占据,下能级未被电子占据, $h$ 为普朗克常量, $\hbar = h/2\pi$ ,如果角频率为 $\omega$ 的入射光满足下式:

$$E = \hbar\omega \quad (1.1)$$

则电子按与光强成正比的概率向下能级跃迁,发射出光子,此光子与入射光状态相同,即频率相同、传播方向相同。半导体中的电子能级不是分立的而是形成能带。如图1.1(b)所示,当导带中有大量的电子、价带中有大量的空穴时,如果入射光的能量 $E$ 稍大于带隙能量 $E_g$ 且满足式(1.1),则发生电子跃迁和光子发射,这就是受激发射(stimulated emission)。

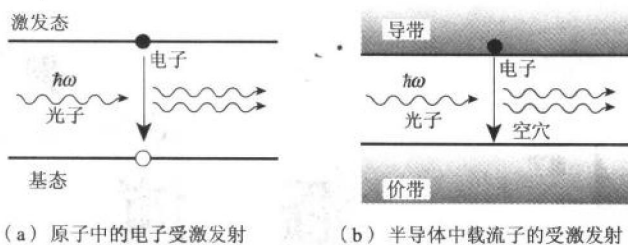


图 1.1 电子光跃迁产生的受激发射的示意图

另外,没有入射光时的光子发射称为自然发射(spontaneous emission)。相反,下能级占有电子、上能级未占有电子时,入射光引起电子跃迁而发生光吸收。依照量子理论,这个受激发射与吸收的概率是相同的。如果考虑含有大量电子的系统,在热平衡状态下电子按能量分布是遵从费米-狄拉克分布,高能级占有的电子数比低能级的电子数少,因此总的来说光被吸收。但是若给系统供给能量实现分布反转则产生净的光发射而获得光放大。这就是激光作用的基本原理。

半导体中的反转分布是由价带的电子激发到导带形成大量的电子-空穴对而实现的,也可以由光照射或电子束照射来实现。实现有实用价值激光器最有效的方法是在半导体中形成 PN 结,在 PN 结上流过正向电流,在结附近的耗尽层内注入能量很高的少数载流子。在 P 型区,少数载流子电子是由 N 型区注入的,为满足电中性条件,多数载流子空穴也增加,成为激励状态。由电流注入而激励的半导体激光器称为注入型激光器(injection laser),也称为激光二极管(laser diode, LD)。从载流子统计考虑,为了获得反转分布,正向偏压必须满足

$$eV > \hbar\omega \quad (1.2)$$

例如,把波长 830nm 的光进行放大的激光器,  $V > 1.5(\text{V})$ 。

下面,以半导体激光器中历史最长的、具有代表性的 GaAs 半导体激光器为例来说明半导体激光器的基本原理与构造。最初实现激射的注入型激光器是由单一-结晶材料 GaAs 制成的 PN 结,即同质结构二极管。为了满足激射条件需要非常大的注入电流密度( $>50\text{kA}/\text{cm}^2$ ),因此只限于低温脉冲振荡。为了获得室温连续激射等实用性能,随后开发的是双异质结结



构(double heterostructure, DH)激光器。其结构概略如图 1.2 所示。DH 结构是在 GaAs 衬底上用多层结晶生长法制成, 激光活性材料 GaAs 的厚度约为  $0.1\mu\text{m}$ , 两侧被 AlGaAs 层夹着, 形成了两个不同材料间的结, 而 AlGaAs 的带隙能量比 GaAs 的大, GaAs 层称为有源层, AlGaAs 层称为包覆层, 两侧的包覆层分别掺杂形成 P 型与 N 型。

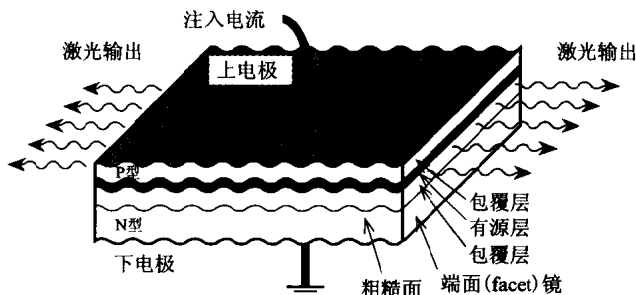


图 1.2 双异质结构注入型半导体激光器的结构

这种 DH 结构具有两种极有效的功能, 能够降低激光器的必要工作电流。第一种功能是限制载流子, 如图 1.3(a) 所示, 由于带隙能量的不同而形成电子势垒, 所以注入的载流子不会从结处散开, 而是以很高的密度被限制在有源区内, 因此以比较小的注入电流密度 ( $\sim 1\text{kA}/\text{cm}^2$ ) 就能够得到光放大所必须的反转分布。第二种功能是光波导功能。因为包覆层的带隙能量大, 对于在有源区被放大的光几乎是透明的。如图 1.3(b) 那样, 包覆层的折射率比有源层的折射率小。因此如图 1.3(c) 所示那样, 由于在有源区与包覆层的边界处光波被全反射, 所以光波被限制在折射率大的有源层内, 沿着有源层面的方向传播。此光波的传播形态称为波导模。在折射率相同的块状半导体内光波由于折射而发散, 而 DH 结构的波导模却产生非常有效的放大, 这是因为光是在产生放大的  $1\mu\text{m}$  以下的薄有源层内和其附近数百微米以上的距离内传播的缘故。假设光波完全是在有源层内传播。令放大增益系数为  $g$ 、波导模向包覆层渗出的减低系数为  $\Gamma$ 、缺陷引起光散射的衰减系数为  $\alpha_{\text{int}}$ , 则实际 DH 结构的有效增益系数为  $\Gamma g - \alpha_{\text{int}}$ 。