



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



半导体激光器 计算机辅助分析与设计

陈维友 张冶金 刘式墉



吉林大学出版社



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



半导体激光器 计算机辅助分析与设计

陈维友 张冶金 刘式墉

吉林大学出版社

· 长春 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体激光器计算机辅助分析与设计/陈维友编著. —长春: 吉林大学出版社,
2003.5

ISBN 7-5601-2894-7

I. 半... II. 陈... III. ①半导体激光器—计算机辅助分析②半导体激光器—计算机辅助设计 IV. TN248.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 035387 号

半导体激光器
计算机辅助分析与设计

陈维友 张治金 刘式墉 著

责任编辑、责任校对: 赵洪波

封面设计: 孙 群

吉林大学出版社出版
(长春市明德路 3 号)

吉林大学出版社发行
长春市永恒印务有限公司印刷

开本: 850×1168 毫米 1/32
印张: 6.125 插页:
字数: 143 千字

2003 年 10 月第 1 版
2003 年 10 月第 1 次印刷
印数: 1-1500 册

ISBN 7-5601-2894-7/TN · 16

定价: 11.00 元

前 言

从1962年半导体激光器的问世到1970年激光器室温连续工作的实现,标志着半导体激光器制作工艺技术逐渐走向成熟。此后,出现了DFB(Distributed FeedBack)和DBR(Distributed Bragg Reflector)激光器、量子阱和应变量子阱激光器、垂直腔面发射激光器、半导体激光器阵列、激光放大器等各式各样的创新性器件,使得信息技术从光通信到光交换、光互联,从光存储到光显示、光处理,爆发了一次又一次重大革命。在整个光信息技术的发展历程中,半导体激光器的发展起到了举足轻重的作用。

半导体激光器种类繁多,从材料上分有异质结材料和量子阱材料,从反馈类型来分有F-P(Fabry Perot)腔、DFB结构和DBR结构,从出光部位来分有端面出光结构和面发射结构,从横向电学和光学限制形式来分更是花样百出,如分别限制大光腔结构、脊型波导结构、掩埋新月型结构等等。不管是什么材料和结构的激光器,设计者都面临很大的设计难度,主要困难有两个:一是器件尺寸的微观性和复杂性,半导体激光器有源区横向宽度一般为微米量级(大功率激光器一般为上百微米),厚度一般仅为几纳米到几百纳米,不仅如此,为提高器件性能,还要在如此小的器件上做出更细微的结构,如布拉格光栅。二是工作机理复杂,影响器件性能的因素很多,很难用简单的理论来预测其性能。因此,计算机辅助设计就显得尤为重要。

半导体激光器计算机辅助分析与设计属于器件级模拟,即通过求解描述器件电光性能的器件方程来获取器件的各种特性,如直流特性、瞬态特性和温度特性等,进而可以对器件进行优化设计。与普通微电子器件相比,对半导体激光器进行器件级模拟更要复杂得多,因为激光器不仅涉及电学特性,还涉及光学特性,不仅要求解泊松方程、连续性方程等电学方程,还要同时求解光子速率方程、波动方程等光学方程,甚至还要引入薛定谔方程。此外,激光器是一个正反馈器件,模拟中数值稳定性差,更增加了求解难度。

20世纪80年代初期,日本、加拿大、美国等许多国家已陆续开展了半导体激光器CAD方面的研究工作,主要侧重于器件模型及模拟,近年,国内也有许多这方面的工作报道。作者多年从事这方面的理论模型研究和软件开发工作,本书就是结合作者多年的工作积累写成的,目的是对半导体激光器的模拟设计从器件模型构建到数值计算技术以及软件实现有个较全面系统的阐述,为理论和实验工作者以及软件开发人员提供有益的参考。

本书共分六章。第一章为绪论,介绍半导体激光器材料体系和器件结构及相关理论的进展情况,以及半导体激光器CAD的发展现状;第二章和第三章讨论了半导体激光器物理模型,给出器件电学方程、光学方程和热学方程,纵向模式求解方法以及薛定谔方程的引入方法;第四章重点阐述了能带结构的分析方法;第五章为数值求解技术,给出了各方程的离散格式及自洽求解方法;第六章为软件实现技术,给出器件结构编辑技术、核心模块的设计思路,此外,还给出几个模拟实例。

本书系国家自然科学基金资助项目研究成果,同时还得到国家“863”计划、国家教育部“高等学校博士学科点专项科研

基金”和“高等学校骨干教师资助计划”、吉林省科技发展计划、国防科技重点实验室基金试点项目的支持。

承蒙中国科学院半导体研究所王启明院士和清华大学谢世钟教授对本书的审阅和指正，在此谨向他们表示诚挚的谢意。借此机会感谢对我们的工作给以支持和帮助的老师、同事、家人和朋友们。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2002 年 6 月于吉林大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 半导体激光器材料体系和结构类型	1
1.1.1 半导体激光器的材料体系	1
1.1.2 半导体激光器结构类型	2
1.2 半导体激光器模拟技术的进展	7
1.3 半导体量子阱激光器模拟的复杂性	10
参考文献	11
第二章 半导体激光器物理模型(I)	13
2.1 电学方程	13
2.1.1 泊松方程	14
2.1.2 电子和空穴连续性方程	16
2.1.3 边界条件	19
2.2 光学方程	24
2.2.1 波动方程	24
2.2.2 光子速率方程	26
2.2.3 边界条件	28
2.3 热传导方程	28
2.3.1 热传导方程基本形式	29
2.3.2 热源	31
2.3.3 边界条件	36

2.4 其它与模拟相关的内容	37
2.4.1 几种非平衡载流子复合模型	37
2.4.2 载流子迁移率	41
2.4.3 半导体激光器的光束发散角	42
2.4.4 半导体激光器的效率	43
参考文献	44
第三章 半导体激光器物理模型(II)	47
3.1 半导体激光器纵向模式	47
3.1.1 FP-LD 纵向模式	47
3.1.2 DFB-LD 纵向模式	48
3.1.3 DBR-LD 纵向模式	60
3.2 薛定谔方程在模拟中的引入	65
3.2.1 一般讨论	66
3.2.2 薛定谔方程完全解 在一维和二维模拟中的引入	68
3.2.3 薛定谔方程完全解在准三维模拟中的引入	71
参考文献	72
第四章 能带结构计算	73
4.1 能带结构的计算方法	74
4.2 几种常用哈密顿矩阵形式	78
4.2.1 3×3 Luttinger-Kohn 哈密顿矩阵形式	78
4.2.2 4×4 Luttinger-Kohn 哈密顿矩阵形式	81
4.2.3 6×6 Luttinger-Kohn 哈密顿矩阵形式	83
4.2.4 8×8 Luttinger-Kohn 哈密顿矩阵形式	86
4.3 包络函数近似与变分法	88
4.4 带边不连续性计算方法	93
4.4.1 Model-Solid 模型	95

4.4.2 Harrison 模型	95
4.5 与能带计算相关的一些参数	98
4.5.1 态密度与准费米能级	98
4.5.2 线性增益系数	100
4.5.3 微分增益与线宽增强因子	105
参考文献	107
第五章 数值求解技术	111
5.1 数值计算方法	111
5.1.1 有限差分方法	111
5.1.2 迭代法	115
5.1.3 QR 方法求矩阵的全部特征值	118
5.2 物理方程的有限差分离散	119
5.2.1 电学方程的离散	120
5.2.2 光学方程的离散	128
5.2.3 热学方程的离散	130
5.3 薛定谔方程的求解	134
5.3.1 方程离散形式	134
5.3.2 薛定谔方程的具体引入	135
5.4 方程自洽求解方法	138
参考文献	139
第六章 软件实现技术	140
6.1 器件结构编辑方法	140
6.2 核心计算模块程序设计	146
6.2.1 能带结构分析模块设计	146
6.2.2 横向分析模块设计	151
6.2.3 纵向分析模块设计	157
6.2.4 准三维分析模块设计	160

6.3 模拟实例	162
6.3.1 $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_y\text{Al}_x\text{As}$ 应变量子阱 激光器有源区设计	162
6.3.2 量子阱 PS-DFB 激光器分析	172
6.3.3 $\text{InGaAs}/\text{InGaAsP}$ 量子阱激光器模拟	175
参考文献	178
符号	179
统一符号约定	179
常用符号	180
专用符号	184
名词缩写	185

第一章 绪 论

本章将简要介绍半导体激光器的材料体系和结构类型及相关理论进展情况,同时还介绍半导体激光器计算机辅助分析的发展情况.

1.1 半导体激光器材料体系和结构类型

半导体激光器理论模型的建立及模拟系统的开发涉及到半导体激光器的材料体系及结构类型,下面予以简单介绍.

1.1.1 半导体激光器的材料体系

自1962年出现GaAs半导体激光器以来,人们一直在寻找新的半导体激光器材料,以便扩展激光器的波段范围和改善激光器的发射特性,在一个广阔的波长范围内探索了不少能产生受激发射的材料,其中包括至今仍广泛使用的GaAlAs和GaInAsP. 1967年出现了能在室温下连续工作的GaAlAs/GaAs半导体激光器,峰值波长为850nm. 要实现在室温下连续且高效率地工作,必须具备:有直接带隙跃迁的有源区材料;有源层与衬底材料有相匹配的晶格常数和热膨胀系数,包括在二者晶格常数相差较大时通过超薄层应变量子阱结构来使有源层与衬底材料的晶格常数相容;有对注入的载流子和辐射复合产生的光子有效限制的器件结构.

此后半导体激光器的发展的整个进程可归结到针对以上条

件, 由 850nm 向两侧不断延伸, 以满足不同应用的需要. 图 1.1 给出了各种波长半导体激光器所用的材料体系, 详细内容见参考文献[1.1].

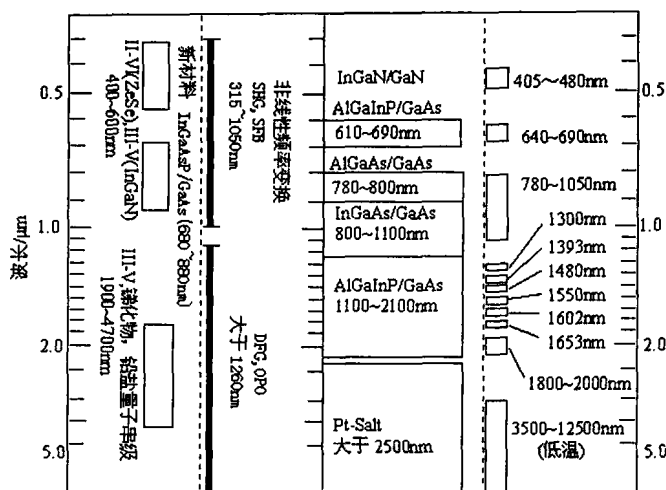
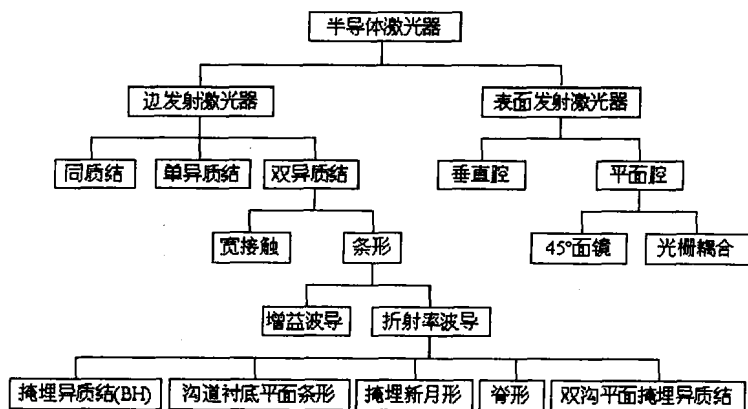


图 1.1 半导体激光器材料体系

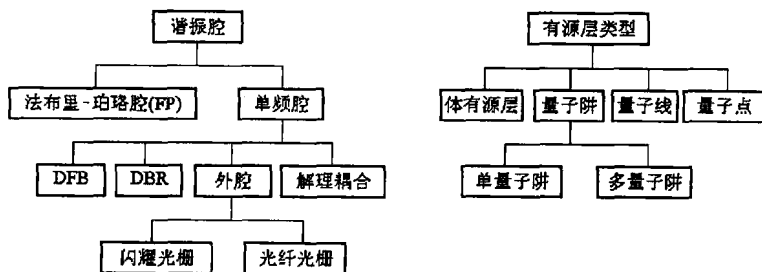
1.1.2 半导体激光器结构类型

围绕不断提高半导体激光器的性能以满足日益增长的应用需求, 已发展了许多半导体激光器的结构, 图 1.2 基本上概括了各种半导体激光器的结构特点. 这些结构主要是考虑将载流子与光子如何有效地限制在有源区内, 如何设计光的反馈结构以实现动态单纵模工作等. 在诸多的结构形式中只有几种是最基本的, 如双异质结激光器(DH-LD)、量子阱激光器(QW-LD)、分布反馈激光器(DFB-LD)和条形激光器, 某些高性能激光器是这些基本结构形式的组合. 对于激光器的一维、二维及

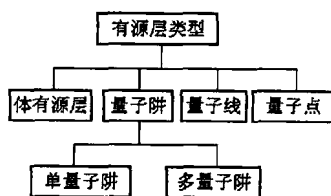
准三维模拟而言,只有在了解这些结构类型的基础上才能确定编辑方法和分析模型,有关这些结构的详细介绍见参考文献[1.1].图1.3给出一些实际激光器及相关应用器件图片.这些激光器应用于不同的领域,如光通信中光发射模块,掺铒光纤放大器(EDFA),掺铒波导光放大器(EDWA)等.



(a) 激光器结构类型

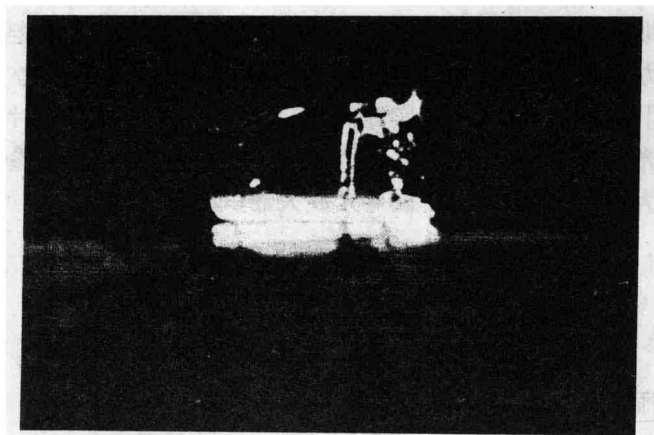


(b) 谐振腔结构

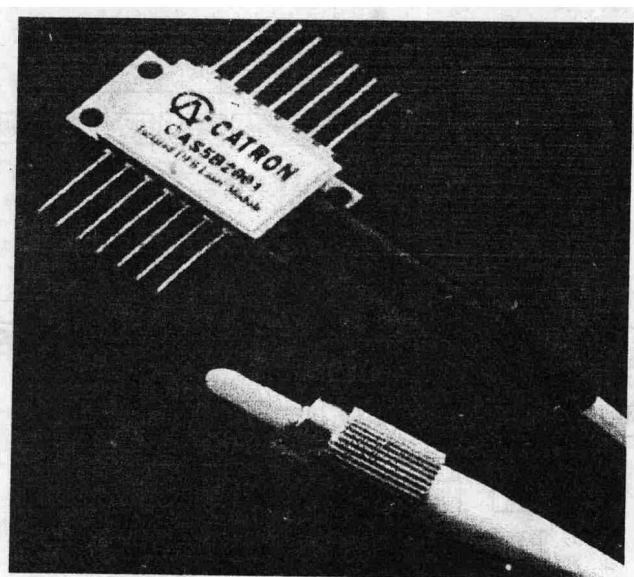


(c) 有源层类型

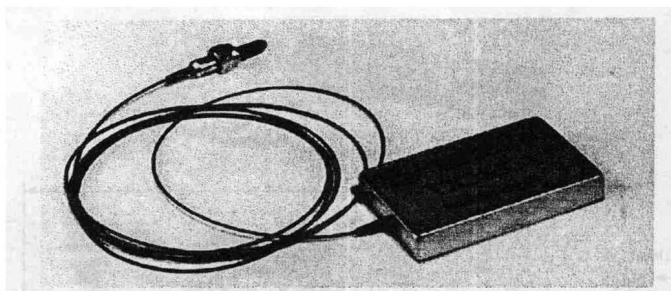
图 1.2 半导体激光器分类



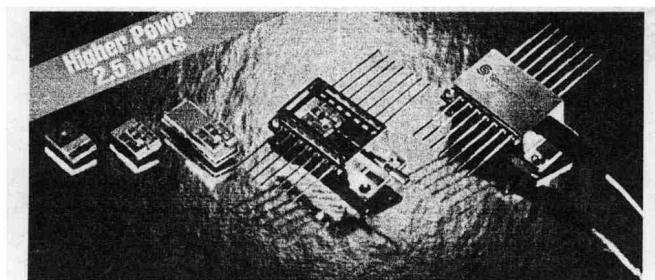
(a) 1970 AT&T Bell 实验室首次报道的 GaAs/AlGaAs 室温连续工作 LD



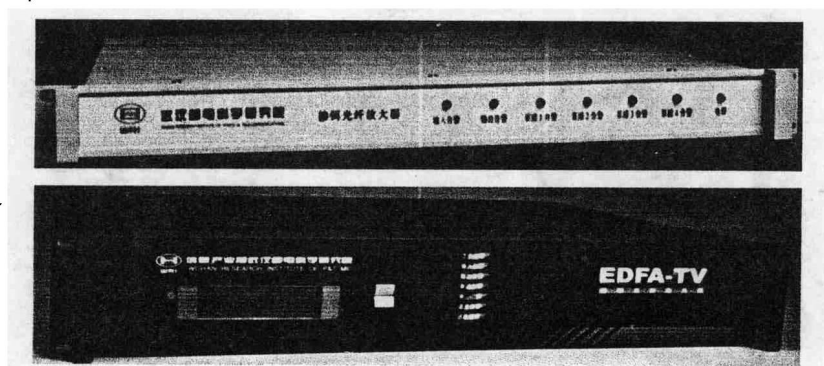
(b) 量子阱 DFB 激光器



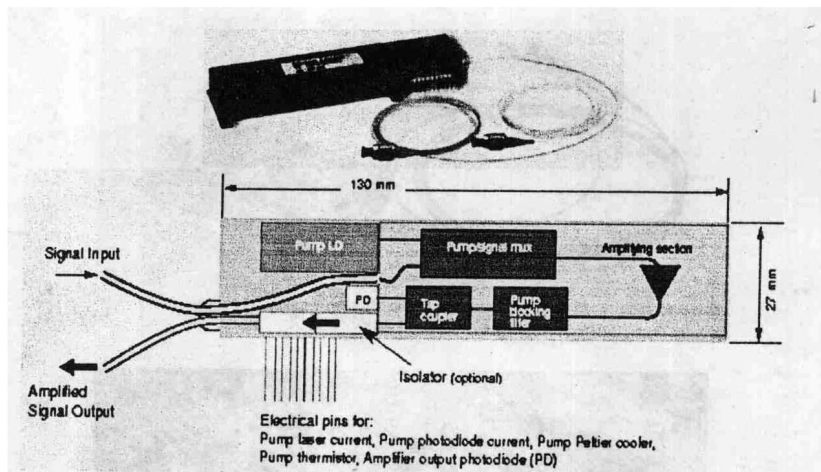
(c) 2.5Gb/s 光收发模块



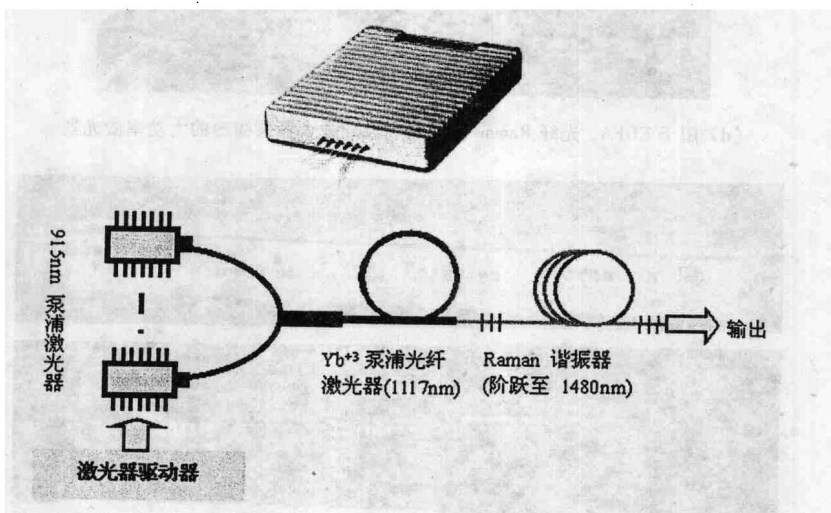
(d) 用于 EDFA、光纤 Raman 激光器和波导放大器泵浦源的大功率激光器



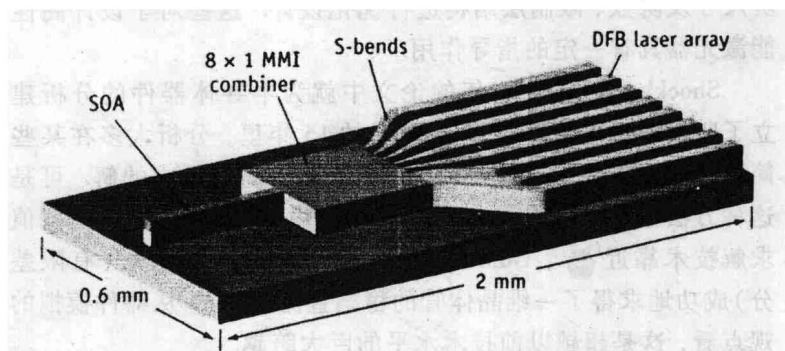
(e) 掺铒光纤放大器(EDFA)



(f) 掺铒波导光放大器(EDWA)及原理图



(g) Raman 光放大器及原理图



包含一个半导体光放大器(SOA)和8个DFB-LD

(h) 光子集成器件(PIC)

图 1.3 几种实际半导体激光器及应用器件

1.2 半导体激光器模拟技术的进展

随着计算机存储容量增大及运算速度的迅猛提高,面向半导体器件的 TCAD(Technology CAD)迅速发展起来,并不断趋于完善和实用化. TCAD 涉及面极为广泛,它包括电路模拟、器件模拟、工艺模拟以及器件集成模拟. TCAD 在微电子器件的设计中得到了广泛应用,并大幅度缩短了新器件的投产时间. 半导体激光器的产生和发展,使针对半导体发光器件的 CAD 也发展起来,它的许多理论模型可借鉴微电子器件的相应模型. 但考虑到光场分布,还必须引入光波方程及光子速率方程. 利用这些模型,采取适当的求解方法,运用从实验上提取的一些参数,就可以对半导体激光器的一些特性进行模拟,如光输出功率-电流($L-I$)、电压-电流($V-I$)、温度分布、载流子分布、光场分布及模式特性等. 还可以对激光器发射波长、量子