



SEMICONDUCTOR LASER

半导体激光器

清华大学 江剑平 编著



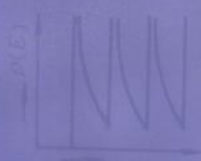
量子阱



能量



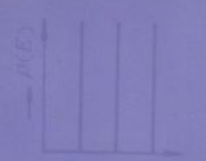
量子线



能量



量子点



能量

激光器顶接触

激光器层

列单元

绝缘槽

电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

78.771
179

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

半导体激光器

SEMICONDUCTOR LASER

清华大学 江剑平 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

2001034

内 容 简 介

本书以半导体激光器在信息光电子技术中的应用为背景,比较全面地介绍了半导体激光器的基本工作原理、器件结构、工作特性、主要材料与工艺技术及若干应用实例。绪论中简要回顾了半导体激光器的发展历史,介绍了它的主要应用及展望。全书共分12章,第1、2、3章讲述半导体激光器的物理基础、电子与光子的相互作用及半导体激光器的工作原理;第4、5章介绍F-P腔半导体激光器的基本结构、工作性能及动态特性;第6章讨论动态单模工作的分布反馈式(DFB)和分布布拉格反射式(DBR)半导体激光器;第7章介绍可见光、蓝绿光、中远红外半导体激光器及垂直腔面发射激光器(VCSEL);第8章讲述量子阱及应变量子阱激光器;第9章论述半导体激光放大器及其应用;第10章讨论半导体激光器阵列及光电子集成;第11章介绍半导体激光器的材料、工艺及可靠性;第12章简要介绍了半导体激光器的几个应用实例。

本书可供光电子技术,激光与红外,光学仪器与工程,光纤通信等专业的高年级大学生、研究生作为教学参考书。对上述领域内从事研究、开发、生产的工程技术及研究人员也很有参考价值。

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,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

半导体激光器/江剑平编著. - 北京:电子工业出版社,2000.2

ISBN 7-5053-5535-X

I. 半… II. 江… III. 半导体激光器 IV. TN248.4

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第39161号

书 名: 半导体激光器
著 者: 江剑平
责任编辑: 吴金生
排版制作: 电子工业出版社计算机排版室
印 刷 者: 北京大中印刷厂
出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>
北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036
经 销: 各地新华书店
开 本: 787×1092 1/16 印张: 23.75 字数: 608千字
版 次: 2000年2月第1版 2000年2月第1次印刷
书 号: ISBN 7-5053-5535-X
TN·1316
印 数: 2000册 定价: 48.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。
若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

序

随着信息化社会的来临,信息技术将由电子时代迈向光子时代,T 比特(10^{12} 位/秒)的超高传输容量)和 ps(10^{-12} 秒)的超快处理速率将成为未来时代的标志。以电子作为信息载体的电子技术受到传输通道中瓶颈堵塞的限制已呈现出局限性,难以突破 ns(10^{-9} 秒)的门槛。光子由于其不荷电性、互不干扰性,以她为信息载体无论在自由空间或在介质波导中传输,面对时代的要求,都不存在瓶颈效应的限制。因此一门基于以光子为信息载体的信息光子学应运而生,正在迅速发展。

尽管如此,未来的信息系统,电子技术仍将具有重要的、不可替代的地位,并将继续发展她的集成化的巨大优势。光子技术则将在核心和前沿的部位发挥她独有的关键的作用。光子学的发展趋向也必然是固体化、集成化并能与微电子技术兼容。因此,半导体光子学将是人们关注的最重要的发展方向。

半导体相干光子源器件和光逻辑器件是信息光子学的两个关键器件。犹如微电子学中的双极晶体管和 MOS 晶体管。

半导体激光二极管是一类电流运作的理想的光子源器件。自 1962 年问世,历经卅多年的发展,就器件类型、结构和增益介质而言,也由早期的同质结,经历了单异质结、双异质结、量子阱、应变量子阱、法布里-珀洛腔结构、无腔的分布反馈式结构、水平腔结构、垂直腔结构,直到今天正在发展的自组装量子点和量子级连的单极性结构的重要发展阶段。激光器的阈值电流密度从 10^5 A/cm² 下降到今天的 10^2 A/cm² 量级。器件的可靠性寿命从几分钟增加到百万小时连续运作。波长覆盖区从中红外至近紫外。输出功率从若干毫瓦直至百瓦水平。上述种种可见,她日新月异地取得了惊人的辉煌进展。而其应用领域也涉及诸多方面,光纤通信、光盘存储、全色显示、激光传感、激光印刷,以及军事方面如激光测距、制导、窃听等。甚至在激光加工和激光医疗等方面,半导体激光器都不失其高效率、小型化、可集成等佼佼者的角色而受到充分的重视。

半导体激光器的发展尚处于青年期的阶段,新的构想和新的应用不断涌现,而“能带工程”、“掺杂工程”和“纳米工程”、“微腔工程”将对其进一步发展产生重大的推进作用。

面向未来的发展,很需要有一本著作既对半导体激光器的基本物理内涵有系统的、连贯的、深刻的、清晰的论述,又能介绍前沿发展的方向,并适度引出自己的见解,能使读者既能获得基础知识,又能把握未来,活跃创新思想。

本书作者多年来一直在清华大学电子工程系讲授“半导体物理”和“半导体光电子学”方面的课程,并从事半导体激光器和集成光电子学的研究工作。实践中积累的教学、科研经验有助于作者较深入地理解半导体激光器的原理、结构与性能。本书着重对半导体激光器的基础理论、概念和器件原理进行讲述,且条理清楚、层次分明、深入浅出。对这一领域内的最新发展,如蓝绿光、中远红外激光器、应变量子阱激光器、垂直腔面发射激光器、激光器列阵等也都有所包含,而且不是简单介绍具体进展成果,而是着重阐述基本原理及需要解决的问题,这是至今相关内容的中文论著中尚少见到的。此外,本书还对半导体激光器的材料、制造技术及若干应用作了简要但又比较实际的介绍。这对于从事半导体激光器研究、开发及应用的专业技术人员

员将会从中有所得益。

相信本书的出版将有益于高等院校、科研院所的科研、教学和人才培养工作,对于推进半导体激光器的研究以及发挥其在光子技术和光电子技术中的应用起到应有的促进作用。

中国科学院半导体研究所

院士 王启明

1998年6月于北京

前 言

当前人类正进入信息和智能化的时代,这是微电子技术、光电子技术、通信技术、计算机科学与技术以及自动化、精密机械等科学技术综合发展的结果。其中光电子技术起着十分重要的作用,并已成为世界各发达国家竞相发展的高新技术的重要组成部分。20世纪50年代以来,随着激光的问世、人们对光与物质相互作用过程的研究空前活跃,逐步形成了激光物理学、半导体光电子学、导波光学、非线性光学等一系列新学科分支。70年代以来,由于光导纤维技术和半导体激光器的重要突破,导致以光纤通信、光纤传感、光信息存储、光信息处理与显示等为代表的光信息技术的蓬勃发展,并取得日益广泛的应用。同时各学科间的相互渗透及交叉又形成了一些新的边缘学科,促进了对半导体激光器工作原理的深入理解,并推动它取得进一步的发展。

20世纪70年代初实现了半导体激光器的室温、连续激射后,开创了半导体激光器发展的新时期。目前它已经是光纤通信、光纤传感、光盘记录存储、光互连、激光打印和印刷、激光分子光谱学以及固体激光器泵浦、光纤放大器泵浦中不可替代的重要光源。此外,在光学测量、机器人与自动控制、医疗、原子和分子物理的基础研究等方面也有广泛应用。它已经是需要高效单色光源的光电子系统中不可缺少的光学器件。与其他种类的激光器相比,半导体激光器具有十分突出的优点,除了体积小、重量轻、转换效率高、省电等优点外,半导体激光器的制造工艺与半导体电子器件和集成电路的生产工艺兼容,因此便于与其他器件实现单片光电子集成。半导体激光器的激射频率可在较宽的范围内调谐,激射功率和频率可以方便、高效地进行直接调制,且调制带宽范围大。而且随着半导体激光器激射波长范围的扩展(目前已有 λ 为450nm附近的蓝绿光激光器,直到 λ 为几微米的中红外激光器),光谱特性的改善,阈值电流的降低,量子转换效率的提高,输出光功率的增加,可靠性及使用寿命的提高等,半导体激光器的优越性更加明显,应用领域越来越广。可以毫不夸张地说,目前半导体激光器在光电子技术领域中的位置、应用和发展趋势,正像电子技术领域中,当年由电子管向晶体管和集成电路发展转化那样,已经起着其他激光器不可替代的作用。它将是具有划时代意义的重要光源。

尽管半导体激光器问世至今只有三十多年的历史。但由于其涉及学科领域多,发展迅速,因此虽然涉及这一内容的中、英文著作出版发行过不少,各类研究论文、综论的数量更是浩如烟海。但是中文版的此类内容图书显得远不能适应目前我国光电子技术发展的需要。高等学校内各相关专业(如光电子技术、光学仪器及工程、激光与红外、应用物理等)的本科生和研究生也需要一本合适的教材。为此作者编写了这本比较系统介绍半导体激光器的工作原理、结构和工作特性、材料、工艺及主要应用等方面内容的著作。

本书是作者多年来在清华大学讲授“半导体光电子学”课程的基础上结合从事半导体激光器和集成光电子学研究工作中积累的资料,并参考近年来国外有关专著后整理编写的。全书除绪论外共分12章。绪论中简要回顾了半导体激光器的发展历史,在信息光电子学中的应用及发展趋势;第1、2、3章讲述半导体激光器的物理基础及工作原理;第4、5章介绍F-P腔半导体激光器的基本结构、工作性能及动态特性;第6章讨论动态单模工作的分布反馈式(DFB)和

分布布拉格反射式(DBR)半导体激光器;第7章介绍可见光、蓝绿光、中远红外半导体激光器及垂直腔面发射激光器(VCSEL);第8章讲述量子阱及应变量子阱激光器;第9章论述半导体激光放大器及其应用;第10章讨论半导体激光器列阵及光电子集成;第11章介绍半导体激光器的材料、工艺及可靠性;第12章简要介绍了半导体激光器的几个应用实例。书中第6章由罗毅教授提供原稿,经作者改写后他又作了审核。作者在此表示感谢。

在编写中,作者力图在有限篇幅内,为读者理解半导体激光器的工作原理铺垫必要的物理基础知识,力图从物理概念上讲清楚半导体激光器的工作原理、特性及应用中的基本问题,尽量减少些繁冗的公式推导。力争在本书中能反映本领域内新的研究成果和发展趋势,而在介绍这些内容时又不是去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和自己去接受理解日新月异的新成果。但是,由于半导体激光器及集成光电子学发展十分迅速,涉及的学科范围很宽,加上作者的知识局限和理解水平有限,难免在书中存在错漏,请各位不吝指正。

在本书出版中,王启明、周炳琨院士和王舒民教授给予热情推荐,并得到了电子工业出版社、清华大学教务处和电子工程系的大力支持,也得到了作者的同仁霍玉晶、何淑芳的支持与帮助,夏丰年、李婷同志在校对工作中给予了很大帮助。对以上单位和个人,作者一并表示衷心感谢。

作者最后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。

作 者

一九九八年六月

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 半导体激光器的物理基础	(8)
1.1 晶体结构、能带和杂质能级	(8)
1.1.1 晶体结构	(8)
1.1.2 能带的形成	(9)
1.1.3 直接带隙与间接带隙	(10)
1.1.4 杂质能级	(11)
1.1.5 能带尾态	(14)
1.2 半导体中载流子的统计分布及输运	(15)
1.2.1 热平衡状态下半导体中的载流子	(15)
1.2.2 非平衡状态下半导体中的载流子	(17)
1.2.3 非平衡载流子的输运	(18)
1.3 半导体异质结	(19)
1.3.1 突变 p-N 异质结	(19)
1.3.2 突变同型异质结	(23)
1.3.3 异质结的主要性质	(25)
第 2 章 光子与半导体中载流子的相互作用	(31)
2.1 半导体内的量子跃迁	(31)
2.1.1 半导体内量子跃迁的过程	(31)
2.1.2 半导体内量子跃迁的特点	(32)
2.2 光子密度与能量分布函数	(32)
2.3 跃迁速率与爱因斯坦(Einstein)关系	(34)
2.3.1 自发光发射跃迁	(35)
2.3.2 受激光发射跃迁	(35)
2.3.3 受激光吸收跃迁	(36)
2.3.4 爱因斯坦关系	(36)
2.4 自发发射、受激发射与受激吸收间的关系	(37)
2.4.1 净受激发射速率	(37)
2.4.2 吸收系数	(37)
2.4.3 自发发射速率与吸收系数的关系	(38)
2.4.4 自发发射速率与受激发射速率的关系	(38)
2.5 跃迁矩阵元、跃迁几率	(39)
2.5.1 含时间的微扰理论	(39)
2.5.2 微扰算符	(39)
2.5.3 跃迁矩阵元与跃迁几率	(41)

2.6	半导体中总的受激发射速率	(44)
2.7	半导体中的载流子复合	(46)
2.7.1	辐射复合	(46)
2.7.2	非辐射复合	(48)
第3章	半导体激光器的工作原理	(52)
3.1	粒子数反转分布与光增益	(52)
3.2	阈值条件和增益分布	(53)
3.2.1	阈值增益	(53)
3.2.2	增益谱计算	(55)
3.2.3	增益系数与电流密度的关系	(55)
3.2.4	增益饱和	(57)
3.3	半导体激光器的模式理论	(58)
3.3.1	激光二极管中的波动方程	(59)
3.3.2	电学常数与光学常数	(60)
3.3.3	电磁辐射的 TE 模与 TM 模	(62)
3.3.4	对称三层介质平板波导	(63)
3.3.5	图解	(66)
3.3.6	不对称三层介质平板波导	(68)
3.3.7	模截止条件	(69)
3.4	限制因子	(70)
3.5	导波有源层中导波机理的分类	(71)
3.6	垂直于 P-N 结平面的波导效应	(74)
3.7	模式选择	(75)
3.8	矩形介质波导	(77)
第4章	F-P 腔半导体激光器的结构及特性	(81)
4.1	结构简介	(81)
4.2	F-P 腔宽接触 DH 激光器	(82)
4.2.1	阈值电流密度	(82)
4.2.2	半导体激光器的效率	(86)
4.2.3	半导体激光器的远场特性	(88)
4.2.4	光谱特性	(90)
4.3	条形激光器介绍	(92)
4.4	条形激光器的理论分析	(94)
4.4.1	电流扩展	(94)
4.4.2	载流子扩散	(95)
4.4.3	光增益	(97)
4.4.4	平面结构中的导波效应	(98)
4.4.5	非平面结构中的导波效应	(99)
4.4.6	光功率(P) - 电流(I)特性	(99)
4.5	增益导引激光器	(101)

4.6 折射率导引激光器	(103)
4.6.1 弱折射率导引激光器	(103)
4.6.2 强折射率导引激光器	(103)
第5章 半导体激光器的动态特性	(109)
5.1 速率方程	(109)
5.1.1 速率方程的稳态解	(110)
5.2 接通延迟	(111)
5.3 弛豫振荡	(112)
5.4 自持脉冲	(115)
5.5 光谱线宽	(116)
5.6 调制特性	(117)
5.6.1 速率方程	(118)
5.6.2 小信号正弦波强度调制	(119)
5.6.3 大信号效应和脉码调制	(120)
5.6.4 高频调制下的受激发射光谱	(121)
5.7 噪声特性	(121)
5.7.1 强度调制噪声	(122)
5.7.2 频率调制噪声	(122)
5.7.3 其他噪声源	(124)
第6章 分布反馈式半导体激光器与分布布拉格反射式半导体激光器	(125)
6.1 概念的提出	(125)
6.1.1 简要回顾	(126)
6.2 理论分析	(128)
6.3 具有均匀光栅的DFB-LD	(130)
6.4 $\lambda/4$ 相移的DFB-LD	(132)
6.5 增益耦合DFB-LD	(134)
6.6 DBR激光器	(136)
6.7 工作特性	(137)
6.7.1 温度与电流注入特性	(138)
6.7.2 光谱及线宽	(138)
6.7.3 偏振选择性	(140)
6.7.4 动态单模与啁啾	(140)
6.8 制造技术	(141)
6.9 光栅制造	(143)
6.10 波长可调谐激光器	(145)
6.10.1 调谐基本原理	(146)
6.10.2 影响调谐范围的因素	(148)
6.10.3 扩大调谐范围的措施	(148)
6.11 近期进展	(148)
6.11.1 高速激光器	(149)

6.11.2 窄线宽激光器	(149)
6.11.3 光栅面发射激光器	(149)
第7章 其他半导体激光器	(152)
7.1 可见光半导体激光器	(152)
7.1.1 InGaAlP 激光器的结构及性能	(155)
7.2 半导体蓝、绿光激光器	(158)
7.2.1 SiC 材料激光器	(158)
7.2.2 III族元素氮化物激光器	(159)
7.2.3 IV-VI族蓝绿光激光器	(161)
7.3 中、远红外半导体激光器	(163)
7.3.1 III-V族化合物半导体	(164)
7.3.2 II-VI族化合物半导体	(165)
7.3.3 IV-VI族化合物半导体	(165)
7.4 垂直腔面发射激光器(VCSEL)	(169)
7.4.1 引言	(169)
7.4.2 历史简要回顾	(170)
7.4.3 VCSEL 结构	(170)
7.4.4 VCSEL 的制造	(176)
7.4.5 激光器阵列	(177)
7.4.6 VCSEL 特性	(177)
7.5 VCSEL 阵列	(183)
7.5.1 多波长阵列	(183)
7.5.2 独立可寻址(Addressable)阵列	(185)
7.5.3 高速多波长阵列	(186)
7.5.4 长波长 VCSEL	(187)
7.5.5 可见光 VCSEL	(188)
第8章 量子阱半导体激光器	(190)
8.1 引言	(190)
8.2 量子阱、超晶格物理基础	(191)
8.2.1 半导体超晶格	(191)
8.2.2 量子阱中电子的能量状态	(194)
8.2.3 二维电子气的台阶状态密度分布	(196)
8.2.4 量子阱中的激子效应	(198)
8.2.5 量子阱中载流子的能量分布	(198)
8.3 量子阱激光器工作原理	(199)
8.3.1 量子阱中载流子的收集与复合	(199)
8.3.2 注入电流与增益	(200)
8.3.3 增益与量子阱厚度的关系	(203)
8.4 量子阱激光器的结构与特性	(203)
8.4.1 量子阱激光器的结构	(203)

8.4.2	量子阱激光器的基本特性	(204)
8.5	应变量子阱激光器	(210)
8.5.1	晶格失配与应变	(211)
8.5.2	临界厚度	(212)
8.5.3	应变量子阱的能带结构	(213)
8.5.4	应变量子阱激光器的增益特性	(217)
8.5.5	应变量子阱激光器	(218)
8.6	新型量子阱激光器	(222)
8.6.1	低维超晶格——量子线、量子点激光器	(222)
8.6.2	量子级联激光器	(224)
第 9 章	半导体激光放大器(SLA)及其应用	(227)
9.1	引言	(227)
9.2	增益特性	(227)
9.2.1	增益谱和带宽	(228)
9.2.2	增益饱和	(229)
9.2.3	放大器噪声	(229)
9.3	放大器的设计	(231)
9.3.1	F-P 放大器	(231)
9.3.2	行波放大器	(231)
9.4	放大器的特性	(232)
9.4.1	放大器带宽	(232)
9.4.2	饱和功率	(233)
9.4.3	噪声因子	(234)
9.4.4	偏振灵敏性	(235)
9.5	多量子阱放大器	(237)
9.6	SLA 的应用	(237)
9.6.1	光通信系统中的应用	(237)
9.6.2	高功率应用	(238)
9.6.3	脉冲放大	(240)
9.6.4	光子开关	(240)
9.6.5	波长转换器	(247)
9.6.6	波长可调谐滤波器	(252)
第 10 章	半导体激光器列阵(SLDA)及光电子集成(OEIC)	(255)
10.1	引言	(255)
10.2	耦合模理论	(255)
10.2.1	耦合模方程	(256)
10.2.2	多波导系统内的模耦合	(258)
10.2.3	耦合模理论的改进	(261)
10.2.4	耦合模理论应用的限制	(262)
10.3	折射率导引列阵	(262)

10.3.1	基本结构	(262)
10.3.2	均匀列阵	(263)
10.4	增益导引列阵	(265)
10.4.1	基本结构	(265)
10.4.2	均匀列阵	(265)
10.5	增强模的选择机制	(267)
10.5.1	高阶模的截止	(268)
10.5.2	由近间隔反波导组成的列阵	(268)
10.6	应用简介	(273)
10.7	光电子集成电路(OEIC)及光子集成电路(PIC)	(273)
10.7.1	多段 DBR 可调谐激光器	(274)
10.7.2	激光器与调制器或放大器的集成	(276)
10.8	集成激光器发射组件	(280)
10.8.1	OEIC 的结构	(280)
10.8.2	集成 LD 发射组件	(282)
10.8.3	光电子集成的发展趋势	(283)
第 11 章	半导体激光器的材料、工艺及可靠性	(287)
11.1	半导体激光器的材料	(287)
11.1.1	GaAs 及其三元化合物	(289)
11.1.2	InP 及其三元、四元化合物	(291)
11.2	Ⅲ-V 族化合物的外延生长	(294)
11.2.1	液相外延(LPE)	(294)
11.2.2	金属有机化学气相沉积(MOCVD)	(309)
11.2.3	分子束外延(MBE)	(313)
11.2.4	化学分子束外延(CBE)	(315)
11.3	半导体外延材料的性能检测	(317)
11.3.1	半导体异质结显示	(318)
11.3.2	异质结晶格匹配度的测定	(318)
11.3.3	光荧光测量	(320)
11.4	半导体激光器的制造工艺	(320)
11.4.1	引言	(320)
11.4.2	化合物半导体中的掺杂扩散	(322)
11.4.3	化学腐蚀	(325)
11.5	欧姆接触	(327)
11.6	后步工艺	(329)
11.7	半导体激光器的可靠性	(330)
第 12 章	半导体激光器的应用	(335)
12.1	光纤通信	(335)
12.1.1	速率要求	(335)
12.1.2	光谱和功率的要求	(337)

12.1.3	相干光通信	(339)
12.1.4	多信道系统	(340)
12.1.5	其他附加考虑	(342)
12.2	半导体激光器与光纤的耦合	(343)
12.3	光学数据存储——光盘技术	(346)
12.3.1	引言	(346)
12.3.2	光盘的数据读出	(347)
12.3.3	用于光写入的半导体激光器	(348)
12.3.4	光反馈的影响	(350)
12.3.5	小结	(351)
12.4	激光二极管泵浦的固体激光器(DPSL)	(352)
12.4.1	引言	(352)
12.4.2	激光二极管的泵浦方式	(353)
12.4.3	激光增益晶体	(354)
12.4.4	泵浦用半导体激光器及列阵	(357)
12.5	半导体激光器的其他应用	(359)
12.5.1	军事方面的应用	(359)
12.5.2	激光打印	(360)
12.5.3	原子物理中的应用	(361)
附录	英语缩略词英-汉对照表	(363)

绪 论

一、半导体激光器发展的回顾

回顾半导体激光器发展的历程,早在 20 世纪 60 年代初就提出用半导体材料作为激光媒质的建议^[1,2]。同时,伯纳德(Bernard)和杜拉福格(Duraffourg)给出了半导体中实现受激发射的必要条件^[3]——对应于非平衡电子、空穴浓度的准费米能级差必须大于受激发射能量,并注意到 GaAs 中辐射复合效率很高的实验结果。当时半导体激光器(SLD)的研究工作非常活跃,已经看到 III-V 族化合物是很有用途的材料。杜姆克(Dumke)^[4]提出采用直接带隙半导体作激光射媒质的重要性。林肯实验室的凯斯(Keyes)报导了在 77K 下 GaAs 电致发光的量子效率可能接近 100%的结果^[5]。IBM 的内森(Nathan)^[6]和 MIT 林肯实验室的奎斯特(Quist)^[7]等人也报告了 GaAs P-N 结二极管中的受激发射的现象。这些早期的激光二极管都是宽接触同质结的,是在体材料上采用杂质扩散的办法来形成 P-N 结。但它已经具备了任何激射作用的三要素——①P-N 结区的电子-空穴复合,提供光增益;②垂直于结的两个解理端面形成 F-P 谐振腔提供光反馈;③正向偏置 P-N 结提供载流子注入。

从潘可夫(Pankove)、凯斯和梅伯里(Maybury)三人分别提出的 GaAs P-N 结注入型非相干电致发光,直到 1962 年 GE 公司的霍尔(Hall)用两个镜面构成谐振腔确实看到了 GaAs P-N 结正向偏置的相干光发射^[8],此后还有很多在制管工艺、器件结构设计、阈值、温度特性和光学性质方面的研究结果发表,这些都属于半导体激光器的第一发展阶段——同质结构注入型激光器。此类激光器有一个共同的致命弱点,即受激发射阈值电流密度特别高,通常要 5×10^4 A/cm² ~ 1×10^5 A/cm²,因此只能在液氮温度(或更低)和脉冲状态(脉宽 $\leq 1 \mu\text{s}$, 占空比 $< 0.1\%$)下工作。但这为以后的结构设计改进提出了明确的方向。

1963 年美国的克罗默(Kroemer)^[9]和前苏联科学院的阿尔费洛夫(Alferov)^[10]提出把一个窄带隙的半导体材料夹在两个宽带隙半导体之间以形成异质结构,希望在窄带隙半导体中产生高效率的辐射复合。虽然当初提出异质结构建议时,并没有掌握足够的知识为选择一对合适的异质结半导体材料提供依据,但它大大激发了几个发达国家的科学家们的研究兴趣。同时自那时以后,异质结材料的生长工艺,如气相外延(VPE)、液相外延(LPE)都取得了长足的进展。1967 年 IBM 公司的伍德德尔(Woodall)成功地用 LPE 在 GaAs 上生长了 AlGaAs^[11]。在 1968 ~ 1970 年期间,美国贝尔实验室的潘尼希(Panish)、Hayashi 和 Sumski 研究成功 AlGaAs/GaAs 单异质结激光器^[12],室温阈值电流密度为 8.6×10^3 A/cm²,结构如图 1(b)所示。同时美国 RCA 公司的克雷塞尔(Kressel)和内尔森(Nelson)也发表了类似结构的激光器的文章^[13]。这时半导体激光器进入了第二发展阶段——单异质结注入型激光器(SHLD)。它们是利用异质结提供的势垒把注入电子限制在 GaAs P-N 结的 P 区之内,以此来降低阈值电流密度 J_{th} ,其数值比同质结激光器降低了一个数量级。

正当美国学者们致力于单异质结激光器的研究时,前苏联科学院约飞物理研究所的阿尔费洛夫等人宣布研制成功双异质结构半导体激光器(DH-LD)^[14],如图 1(c)所示。该结构是把 p-GaAs 半导体夹在 N-Al_xGa_{1-x}As 层和 P-Al_xGa_{1-x}As 层之间,两个异质结势垒能有效地把载流

2001034

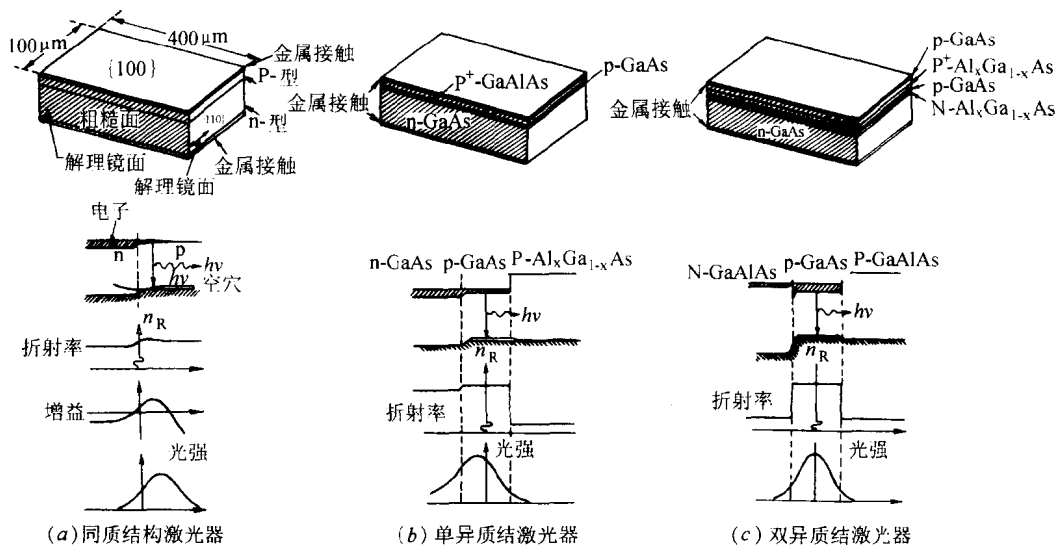


图1 半导体激光器不同管芯结构及相应参数分布示意图

子和光场限制在 p-GaAs 薄层有源区内,使得室温下的 J_{th} 降低到只有 $4 \times 10^3 \text{ A/cm}^2 \sim 10^4 \text{ A/cm}^2$ 。就在相同时间,1970 年初,美国的 Hayashi 和潘尼希也报导了双异质结激光器实现室温发射,300K 下的 J_{th} 只有 $2.3 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$ [15]。这比单异质结激光器的 J_{th} 又降低了一个数量级。这就标志着半导体激光器进入了第三发展阶段——双异质结注入型激光器。

双异质结半导体激光器的 J_{th} 能够显著降低,这主要依靠两个作用:1)有源层两侧的包层是宽带隙材料,它对注入窄带隙有源区的载流子有限制作用,以利于产生高的增益;2)有源区是高折射率材料,两侧包层是低折射率材料,这里形成的光波导能将光场的大部分限制在有源区内。

双异质结激光器的问世开创了半导体激光器发展的新时期。自此以后,在世界上许多实验室里对更复杂的双异质结构激光器进行了大量研究工作。1978 年半导体激光器已用于光纤通信系统,促使各种新材料、新结构半导体激光器不断涌现,器件的各种性能参数不断改进和提高,其主要标志有:

(1)为了降低阈值电流密度,相继研究出侧向增益波导与折射率波导结构。后者至今仍是低阈值半导体激光器的基本结构形式。

(2)室温、连续输出功率不断增加,单个半导体激光器的输出功率由初期的数毫瓦到目前已达瓦的量级。锁相阵列器件的输出功率已可以大于几百瓦。

(3)为适应光纤通信、光盘信息存储、二极管泵浦固体激光器(DPSL)和二极管泵浦掺铒(Er)光纤放大器(EDFA)等各方面应用的需要,半导体激光器的工作波长由最初的 850nm 向两侧延伸,目前从 570nm 到 1600nm 波长范围内都有室温连续工作、输出光功率较大的激光器,波长为 417nm 的 InGaIn 多量子阱和波长为 480nm 的 ZnSe 蓝绿光半导体激光器也已实现室温、连续激射,工作寿命正在不断延长,目前已达上万小时[16]。采用 AlGaInP 材料的激光器已能覆盖从 570nm[(Al_{0.4}Ga_{0.6})_{0.5}In_{0.5}P]到 670nm(Ca_{0.5}In_{0.5}P)的可见光范围,寿命达 20 万小时。

(4)为获得单频、窄线宽、波长可调谐和动态单模工作等高性能器件,发展了分布布拉格(Bragg)反射(DBR)激光器和分布反馈布拉格(DFB)激光器。

进入 80 年代以来,由于吸取了半导体物理研究的新成果,同时晶体外延生长新工艺,包括

分子束外延(MBE)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)和化学束外延(CBE)等取得重大成就,使得半导体激光器成功地采用了量子阱和应变量子阱新结构,出现了许多性能优良的新器件。其中最具代表性的是:各类量子阱激光器(极低阈值,单频,高调制速率,扩展新波长……),应变量子阱激光器,垂直腔面发射激光器及高功率激光器阵列。

由于新的外延生长工艺能够精确控制晶体生长厚度达原子层的精度,而且不同材料交替生长时具有平整陡峭的界面,界面态密度很低,这就使人们能够利用“能带工程”人为地改变结构参数以获得所需要的量子阱、超晶格材料从而优化器件的性能。

量子阱激光器中窄带隙的有源区材料其厚度小于电子在该材料中的德布罗意波长(一般小于 10nm ~ 20nm),这时有源区就成了势阱区,两侧的宽带隙材料成为势垒区。势阱中的电子和空穴沿垂直阱壁方向的运动呈现量子化特点,电子的状态密度也变为类阶梯状。这时只需要很小的注入电流就可以达到粒子数反转。因此,量子阱激光器具有很低的阈值电流和高微分增益,同时激光器中电子与光子的耦合时间更短,具有更好的高速调制特性。多量子阱激光器则是由多个阱和具有足够厚度的垒交替构成的,它比单量子阱激光器能给出更大的输出光功率,也有较宽的动态增益谱。

后来,在一般量子阱结构的基础上又发展了应变量子阱激光器。这是指形成阱和垒的两种材料的晶格常数虽不相等,但只要失配不是很大,有源层厚度又小于弹性形变的临界厚度(一般为 10nm),则在平行界面的方向上会产生一个统一的平衡晶格常数,同时内部产生一定的张应变或压应变。我们可以利用这个内建应力来改变能带结构从而使应变量子阱激光器的性能得到进一步的全面改善。

表 1 给出双异质结(DH)、多量子阱(MQW)和应变多量子阱(SL-MQW)三种结构 1.55 μm 激光器性能的简略比较。

表 1 三种结构的 1.55 μm 激光器性能比较^[17]

参 数 \ 激光器类型	DH	MQW	SL-MQW
阈值电流密度 (A/cm^2)	1000	450	96
阈值电流 (mA)	3.6	2.5	0.62 ^{注1}
斜率效率 (mW/mA)	0.2 ~ 0.25	0.2 ~ 0.3	82% ^{注2}
最大光输出功率(mW)	180	330	380
特征温度(K)	55 ~ 65	76 ~ 80	97
最小线宽(kHz)	500	56	3.6
3dB 调制带宽(GHz)	17	25	22

注 1 该数字指张应变单量子阱激光器,其余的都指压应变多量子阱激光器。

注 2 该数字指量子效率。

二、半导体激光器的应用与展望

随着信息化社会的到来,高速率信息流的载入、传输、交换、处理及存储是技术关键,半导体光电子技术是支柱之一,而半导体光电子器件,特别是半导体激光器是心脏。图 2 给出半导体激光器在一些主要应用领域相应所需的波长、功率及线宽的示意范围。

目前,实用光纤通信传输系统的单信道速率已达到 10Gb/s,1.55 μm 的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)是优选的理想光源。但是,直接调制方式受到啁啾频移噪声的影响。正在研