



983598

高等 学校 规划 教材
工科 电子 类

半导体激光器

蔡伯荣 陈铮 刘旭 编

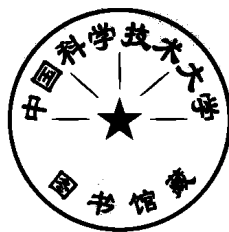


电子工业出版社

.4

半 导 体 激 光 器

蔡伯荣 陈铮 刘旭 编



電 子 工 業 出 版 社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书主要以信息光电子技术为背景,论述半导体激光器的基本结构,工作原理与特性,制备技术与器件应用及其可靠性等。除第一章引论外,第五章以前各章介绍了普通半导体激光器的结构、基本理论和工作特性。第六~八章讨论了其结构、性能均较特殊的半导体激光器(即分布反馈式激光器,耦合腔激光器和量子阱激光器)。后三章分别介绍了新近发展的其它几类半导体激光器(包括可见光,中、远红外,表面发射激光器和集成激光器组件);激光放大器和逻辑器件;器件主要制备工艺(包括分子束外延和有机金属化学汽相沉积技术)和器件的可靠性等。

本教材除较全面、系统地介绍半导体激光器的主要结构,基本理论和工作特性外,还尽可能地反映了该领域的最新进展。本书可用作高等学校光电子技术,微电子技术,应用物理和应用电子技术专业研究生教材或高年级本科生选修课教材。也可供信息光电子学领域相近专业的科学研究人员、工程技术人员和大专院校教师、研究生参考。

半 导 体 激 光 器

蔡伯荣 陈 铮 刘 旭 编

特约编辑: 仁 忠

责任编辑: 连潮东

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市燕山联营印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 16.75 字数: 407千字

1995年10月第一版 1995年10月北京第一次印刷

印数: 800册 定价: 13.50元

ISBN 7-5053-2822-0/G·229

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

EA016/125

前 言

本书由《物理电子学与光电子学》教材编审委员会《激光与红外》教材编审组评选审定，并推荐出版。

该教材由电子科技大学蔡伯荣教授任主编，吉林大学刘士墉教授任主审，北京理工大学魏光辉教授任责任编委。编审者均依据《激光与红外》编审组审定的编写大纲要求进行编写和审阅的。

此书是为高等学校光电子技术，微电子技术，应用物理和应用电子技术及其相关专业的研究生和高年级本科生编写的教材。鉴于半导体激光器已成为现代信息光电子技术的核心光源，是信息高速通道(Infohighway)发展的重要基础，也是功率光电子技术发展的优选器件。已成为光纤通信，光信息处理，光传感技术，光盘技术，光计算技术，光打印技术，材料加工技术以及固体激光器泵浦技术的重要光源。受到世界各国高度重视，发展迅速，应用广泛。因此，对于上述专业的学生，特别是研究生，学习、掌握半导体激光器的理论、特性及其应用是完全必要的。为此，我们编写了这本教材。尽可能全面、系统地介绍半导体激光器的基本理论，主要结构，重要特性，制备技术以及一些应用的例子，以供教学和科研之用。

考虑到作为研究生和高年级本科生教材，除应具有系统、深入的理论描述，器件特性的详细分析讨论和某些应用举例外，还应反映该领域发展的一些前沿研究动向。为此，书中编进了一些新内容，诸如，新近快速发展的超晶格量子结构理论及其相应器件的原理和性能等。全书主要以信息光电子技术为背景，对半导体激光器进行了全面、系统的论述。共列十一章：除第一章引论一简要介绍半导体激光器的发展历史，应用状况和发展趋势外；其余各章依次介绍了半导体激光器的光电物理基础；器体基本结构、工作原理和主要特性；半导体激光的模式理论和光波导特性；调制和噪声特性；分布反馈激光器原理、特性及应用；耦合腔激光器结构、理论及特性；量子阱激光器基本概念，原理、特性以及新型量子结构器件的发展；新近发展的其它半导体激光器(含可见光，中、远红外，表面发射激光器和集成激光器组件)；激光放大器和逻辑器件；最后概述了激光器制备工艺(包括分子束外延和有机金属化学汽相沉积技术)和器件的可靠性等。本课程的参考学时数为60学时。为适应研究生教学和科研的需要，各章均列有适当的参考文献目录，以供查阅。

本教材由电子科技大学蔡伯荣编写第一，六，七，八章；陈铮编写第二，三，四，五章；刘旭编写第九，十，十一章。全书由蔡伯荣统稿。

编写该书过程中，清华大学，华中理工大学，东南大学，西安电子科技大学，吉林大学和哈尔滨工业大学等兄弟院校的老师提出过不少宝贵意见和建议，在此一并表示诚挚的感谢！限于编者水平，加之时间仓促，书中难免尚有缺点或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

一九九四年十二月于成都

目 录

第一章 引 论	1
§ 1.1 半导体激光器发展的历史回顾	1
§ 1.2 半导体激光器的广泛应用 ^[1, 20]	6
1.2.1 1300~1550nm激光器应用状况	6
1.2.2 790~1020nm激光器应用状况	7
1.2.3 600~780nm激光器应用状况	8
§ 1.3 半导体激光器的发展趋势	9
第二章 半导体光电物理基础	12
§ 2.1 能带和杂质能级 ^[2, 1]	12
2.1.1 能带的形成	12
2.1.2 直接带隙和间接带隙 ^[2, 2]	13
2.1.3 杂质能级 ^[2, 1]	14
2.1.4 杂质带尾 ^[2, 2]	16
§ 2.2 半导体中载流子的统计分布 ^[2, 1]	17
2.2.1 本征半导体中的载流子	17
2.2.2 非本征半导体中的载流子分布	18
§ 2.3 非平衡载流子及其输运过程 ^[2, 1]	19
2.3.1 载流子输运	19
2.3.2 准费米能级 ^[2, 1]	20
§ 2.4 光子与载流子的相互作用 ^[2, 2]	21
2.4.1 带间跃迁光吸收	21
2.4.2 自由载流子光吸收 ^[2, 2]	21
2.4.3 受激发射	23
2.4.4 其他过程	24
§ 2.5 载流子复合机构 ^{[2, 1] * [2, 2]}	24
2.5.1 带间直接辐射复合	24
2.5.2 发生在局部能态处的辐射复合	27
2.5.3 非辐射复合过程	28
2.5.4 俄歇复合 ^[2, 5]	29
§ 2.6 p-n结的电特性	21
2.6.1 p-n结 ^[2, 1]	31
2.6.2 p-n结光电特性	34
§ 2.7 注入型半导体激光器发光过程 ^[2, 2]	35
2.7.1 半导体中的光发射	35

2.7.2	自发发射速率和受激发射速率	36
2.7.3	增益系数和自发发射速率的估算	38
2.7.4	吸收系数与光增益	39
第三章	半导体激光器的结构、原理与特性	40
§ 3.1	半导体激光器工作原理 ^(3.1)	40
3.1.1	阈值电流密度	40
3.1.2	异质结处载流子的泄漏 ^(3.2)	41
3.1.3	阈值电流与温度的关系 ^(3.2)	43
§ 3.2	异质结构激光二极管	43
3.2.1	同质结构中载流子约束和光约束	43
3.2.2	异质结构中载流子约束和光约束	44
§ 3.3	增益导引条形激光器	45
3.3.1	激光二极管的结构 ^(3.3)	45
3.3.2	光功率—电流特性	47
3.3.3	不稳定性 ^(3.3)	48
§ 3.4	折射率导引条形激光器 ^(3.2)	49
3.4.1	激光器结构	49
3.4.2	光功率—电流特性	51
§ 3.5	激光器阵列 ^(3.2)	52
第四章	半导体激光器的模式理论和光波导特性 ^(4.1)	55
§ 4.1	麦克斯韦方程组	55
§ 4.2	阈值条件和纵模	57
§ 4.3	增益和受激发射	59
§ 4.4	波导的模式理论	60
4.4.1	引言	60
4.4.2	有效折射率法	61
4.4.3	平板波导的模式	63
4.4.4	半导体激光器的侧模	66
第五章	半导体激光器的调制特性和噪声特性 ^(5.1)	70
§ 5.1	载流子与光子运动的速率方程	70
§ 5.2	稳态特性	73
5.2.1	引言	73
5.2.2	光功率——电流特性	74
5.2.3	纵模谱	75
§ 5.3	瞬态响应	80
5.3.1	动态纵模谱	80
5.3.2	接通延迟	81
5.3.3	弛豫振荡	82
§ 5.4	噪声特性	84

5.4.1	Langevin表达式	85
5.4.2	强度噪声	86
5.4.3	相位噪声和谱线宽度	87
§ 5.5	调制响应	90
5.5.1	小讯号分析	90
5.5.2	强度调制	91
5.5.3	频率啾啾 (Freguencg Chirping).....	94
5.5.4	大信号调制	96
第六章	分布反馈式半导体激光器	99
§ 6.1	引言	99
§ 6.2	DFB激光器结构	100
§ 6.3	耦合波理论	102
6.3.1	耦合波方程	102
6.3.2	纵模与阈值增益	105
6.3.3	耦合系数与阈值性质	111
6.3.4	光(功率)—电(流)特性	114
§ 6.4	DFB激光器的输出特性	115
6.4.1	连续工作特性	115
6.4.2	调制特性	117
§ 6.5	DBR激光器	119
§ 6.6	多段式DFB激光器	122
§ 6.7	传输实验	124
第七章	耦合腔半导体激光器	127
§ 7.1	引言	127
§ 7.2	耦合腔的设计模型	128
§ 7.3	耦合腔理论	130
7.3.1	耦合系数	130
7.3.2	纵模与阈值增益	132
7.3.3	边模抑制	134
7.3.4	调制响应	135
§ 7.4	C ³ 激光器的工作特性	137
7.4.1	纵模控制	137
7.4.2	直接调制的最佳偏置	139
7.4.3	频率啾啾 (Freguencg Chirping).....	140
7.4.4	光学双稳性	141
7.4.5	外腔式半导体激光器	143
第八章	量子阱半导体激光器	146
§ 8.1	引言	146
8.1.1	超晶格量子阱及渐变带隙微结构	146

8.1.2	超晶格量子结构的发展	147
§ 8.2	超晶格量子阱的基本概念 ^{(8.7)(8.8)}	147
8.2.1	量子化能级和子带	148
8.2.2	阶梯状态密度分布	152
8.2.3	势阱中量子态的实验观察	154
§ 8.3	量子阱中的复合过程	155
8.3.1	辐射复合 ^(8.7)	156
8.3.2	非辐射复合 ^(8.7)	158
§ 8.4	量子阱激光器原理与特性 ^(8.8)	161
8.4.1	量子阱激光器的工作原理	161
8.4.2	单量子阱和多量子阱激光器	168
8.4.3	量子阱激光器实验	169
8.4.4	调制与噪声特性	175
§ 8.5	量子结构激光器的新进展	177
8.5.1	其它量子阱激光器	178
8.5.2	应变超晶格结构及其激光器 ^(8.14, 8.28~8.30)	179
8.5.3	新型超晶格量子结构简介 ^(8.5, 8.6, 8.60~8.64)	190
第九章	其它半导体激光器	184
§ 9.1	可见光半导体激光器	184
9.1.1	半导体材料	184
9.1.2	激光器结构	186
9.1.3	激光器特性	187
9.1.4	器件应用	189
§ 9.2	中、远红外半导体激光器	190
9.2.1	引言	190
9.2.2	半导体材料	190
9.2.3	激光器特性	192
§ 9.3	表面发射半导体激光器	198
9.3.1	引言	198
9.3.2	基本结构	199
9.3.3	激光器特性	200
9.3.4	表面发射激光器的应用	206
§ 9.4	集成激光器发射组件	207
9.4.1	OEIC的结构	207
9.4.2	集成LD发射组件	210
9.4.3	集成LD发射组件的发展趋势	212
第十章	激光放大器及逻辑器件	217
§ 10.1	激光放大器	217
10.1.1	集成光—电式激光放大器	217

10.1.2	光—光式放大器	218
§ 10.2	半导体光逻辑器件	226
10.2.1	C ³ 激光器的波长调谐特性	226
10.2.2	光逻辑运算的结构及逻辑操作	227
第十一章	半导体激光器的制作工艺和可靠性	229
§ 11.1	制作工艺概述	229
§ 11.2	外延生长技术	230
11.2.1	液相外延	230
11.2.2	有机金属化学汽相沉积	232
11.2.3	分子束外延	235
§ 11.3	芯片金属化	238
11.3.1	金属与半导体接触的电流运输机理	238
11.3.2	金属化电极的制作	240
§ 11.4	半导体激光器制作的后工艺	241
11.4.1	烧焊及键合	241
11.4.2	LD与光纤的耦合	242
11.4.3	封装	245
§ 11.5	半导体激光器的可靠性	246
11.5.1	退化机理与改进措施	246
11.5.2	InGaAsP/InP激光器与GaAlAs/GaAs激光器退化模式的主要差别	249
11.5.3	可靠性保证	249
参考文献		253

第一章 引 论

工作物质为半导体晶体的一类激光器称为半导体激光器。这类激光器已经成为光电子技术领域中,研究最活跃,应用最广泛的器件。并且,不断出现新概念、新器件、新技术和新应用,继续以欣欣向荣的态势向前发展。

本章简要回顾半导体激光器发展的历史,应用状况、发展动向。从中可使我们清楚地认识到理论研究对科技发展的重要指导作用,科学技术发展对国民经济诸领域发展的重要促进作用。半导体激光技术的发展与应用,同样也证实了科学技术是第一生产力的论断。

最后概括介绍本书的基本内容、编排、以及作为教材的参考学时,主要适用的范围等。

§ 1.1 半导体激光器发展的历史回顾

五十年代出现的重大科学技术之一是激光器的诞生。1958年Schawlow和Townes发表了有关激光方面的创新论文。1960年红宝石激光器和氩-氦激光器^[1.3]相继成功运转。同时,对半导体的受激发射进行了研究^[1.1~1.3]。1962年三个研究小组几乎同时发表了正向偏压下GaAs p-n结激光器成功的受激发射^[1.4~1.7], 77K温度下,获得波长为830nm相干辐射的激光脉冲。此激光器是利用同种材料掺入不同类型杂质形成“同质结构Homomaterial (HOS)”器件,是利用p-n结有源层内注入的电子-空穴复合提供光增益,并利用与结平面垂直的两个解理平行端面构成的谐振腔提供光反馈。尔后,很快利用其它直接带隙半导体如InAs, InP, GaAsP, GaInAs和InAsP等的p-n结构,获得过不同温度下,发射不同波长激光的半导体器件。然而,同质结构激光器的致命弱点是阈值电流密度太大(一般 $J_{th} \geq 50 \text{ kA/cm}^2$),以至于这类器件难于在室温下连续工作。

1963年Kroemer^[1.8]和Alferov^[1.9]等就提出用不同带隙材料构成的器件,可改善半导体激光器性能,并把这类结构的激光器称为“异质结构Heteromaterial (HES)”激光器。图1.1给出了(a)同质结构,(b)异质结构激光器示意图,其中数字是器件的典型尺寸。图(a)中虚线部位表示同质结(Homomaterial)附近耗尽区;图(b)中带阴影线部位示厚约 $0.2 \mu\text{m}$ 的有源层,该层材料带隙比相邻两侧包层材料的窄。异质结构激光器视其有源区两侧包层材料不同又分为单异质结构(Single Heteromaterial, SH)和双异质结构(Double Heteromaterial, DH)两类激光器。前者由一个异质结(Heteromaterial)和一个同质结构构成;后者则由两个异质结构构成,如图1.2所示^[1.10]。但是,早期的研究表明,只有当构成异质结的两种材料晶格常数(格常数)严格匹配时,才能制出性能优良的激光器件。实验发现GaAs和 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料的格常数满足此要求。从而分别于1969年和1970年成功地研制出了室温脉冲运转和室温连续工作的异质结构激光

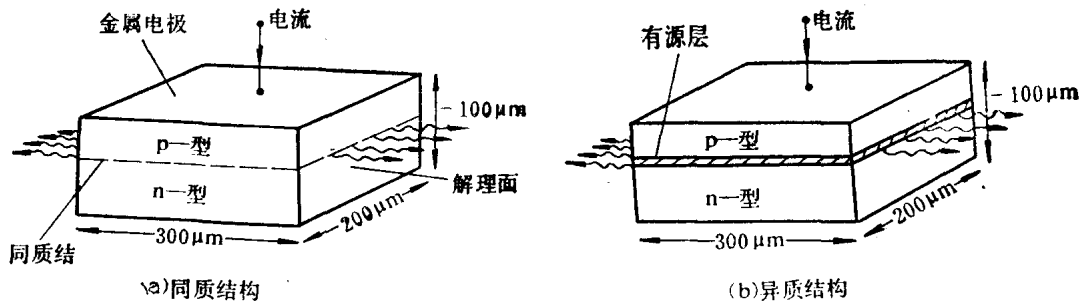


图 1.1 具典型尺寸的(a)同质结构和(b)异质结构激光器示意图

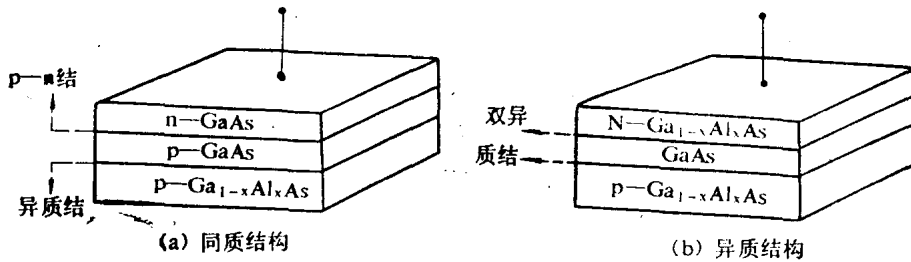


图 1.2 异质结构激光器示意图

器。且通常用GaAs/(Ga, Al)As或GaAs/GaAlAs表示有源区为GaAs(窄带隙材料)激光器的异质结构特征。甚至于只用有源区组分来表示异质结构器件,如GaAs DH激光器等等。

Alferov等人1969年报导的GaAs DH激光器, 室温工作的阈值电流密度 $J_{th} \approx 5 \text{ kA/cm}^2$, 1970年Panish等人将此值降低到 1.6 kA/cm^2 的水平。1975年Ettenberg采用有源层厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 的GaAlAs DH激光器, 把 J_{th} 降到约 0.5 kA/cm^2 。近10多

年来, 由于采用了GaAs和GaAlAs量子阱(Quantum Well, QW)材料制作激光器, 其 J_{th} 已下降到几 A/cm^2 的水平。与1962年首次报导的GaAs同质结激光器相比, 阈值电流密度降低了4个数量级。异质结构激光器已经成为极为重要的、实用化的相干光源。

在研究异质结构激光器过程中, 为提高器件性能, 特别是降低阈值电流密度, 曾采取过以下措施, 激光器有源层采用窄带隙、高折射率的材料; 包层(限制层)采用宽带隙、低折射率材料, 这样, 便可利用两种材料带隙差形成的导带, 价带阶跃(形成的势垒)将电子, 空穴约束在有源区内, 易于产生光增益; 而利用两种材料的折射率差形成的光波导, 将光模有效地限制在有源区内,

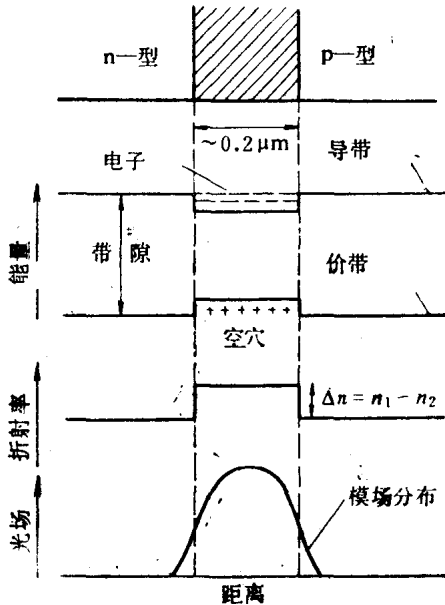


图 1.3 双异质结构激光器中能带、折射率分布以及注入载流子、光模约束在有源区的示意图

从而减小了内部损耗，如图1.3所示。

但是，如图1.2(b)所示的激光器——宽面接触型DH激光器还不能限制注入电流，也无法实现侧向（平行于结平面方向）限制光模功能。为了将注入载流子更好地限制于有源区内而不产生侧向扩展，1967年在研究同质结构激光器时，就采用了条形结构，即把接触电极做成与有源区平行的条形结构，使注入电流流入一狭窄的中心区内（约 $10\mu\text{m}$ ）。1971年将这种结构引入了异质结构激光器。由于条形异质结构器件中，光增益沿侧向的变化，可将光模限制在条形宽度附近，这种导引波的作用是由增益分布决定的，因此，把这种激光器称为增益导引型器件；而将主要由折射变化限制光模的激光器（如隐埋型结构）称为折射率导引型器件。有关两类导引型激光器的性能和优缺点已有大量文献和专著可查^(1·11~1·14)

人们对于以GaAs材料为基础的半导体激光器一直持有高度兴趣。从70年代末就采用气相外延（VPE）^(1·27)和分子束外延（MBE）生长出由GaAs和GaAlAs超薄层（层厚 $\sim 0.01\mu\text{m}$ 量级）材料交替生长构成的量子阱结构。近年来，随着MBE，有机金属化学汽相沉积（MO-CVD），以及两者相结合出现的化学束外延（CBE）和原子层外延（ALE）技术的发展，除上述的晶格匹配超晶格量子阱材料外，又出现了晶格失配超晶格，即所谓的应变（层）超晶格材料，这不仅大大拓宽了选用材料的范围，而且，它具有的特殊性能，可能制成许多奇特的电子与光电子器件。超晶格材料和量子阱器件已成为当今和未来相当长时期内光电子技术发展的重要基础，此外，近年来大功率半导体激光器和列阵器件也成为了研究的重点之列。

除了上述大量开发应用的以GaAs为基础，发射波长 $0.8\mu\text{m}$ 至 $0.9\mu\text{m}$ 激光器外。随着不同应用的需求，半导体激光波长已向该波段的两侧发展。针对光纤通信系统的光源，发展了 $1.1\mu\text{m}$ 到 $1.6\mu\text{m}$ 波长激光器。其中InGaAsP/InP是最合适的材料系统，采用 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 作激光器有源层，只需恰当改变组分 x, y 就可选择 $1.1\mu\text{m}$ 至 $1.6\mu\text{m}$ 波段内的在一波长。其限制层采用InP或者组分 x, y 不同的InGaAsP。

1975年报导了 $1.1\mu\text{m}$ 波长室温脉冲工作的InGaAsP激光器。1976年由于采用条形结构，使该器件实现了连续运转。接着1977年又把激射波长延伸到 $1.3\mu\text{m}$ 。鉴于 $1.3\mu\text{m}$ 波长具低损耗、零色散光纤的出现，人们将注意力集中于 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP半导体激光器实用化的研究。同时，在 $1.55\mu\text{m}$ 波长上硅光纤具超低损耗特性的引诱下，不少研究小组又投入了 $1.55\mu\text{m}$ 激光器的研制，1979年几个研究小组都分别报导了 $1.55\mu\text{m}$ 附近波长激射的InGaAsP激光器的研究结果。此后，对上述波段的异质结构激光器开展了广泛研究和开发应用^(1·15~1·17)。八十年代中期，这种激光器已普遍用于光纤通信系统中^(1·18)。鉴于长距离、超大容量光纤通信以及相干光通信系统发展需要，从八十年代后期起，许多科学家和工程技术专家又致力于研究和开发窄线宽、动态单频半导体激光器，例如对分布反馈激光器，耦合腔激光器以及采用量子阱结构的各类激光器开展的广泛深入研究。

对于波长小于 $0.8\mu\text{m}$ 短波一侧，则因光盘、激光打印技术的迅速发展，可见光半导体激光得到广泛研究和开发应用。除已开发应用的近红外，红光半导体激光器外，近年来，正广泛深入研究蓝绿光半导体激光器。

到目前为止，已发现大量的具有激射特性的半导体材料。图1.4给出的是其中部份

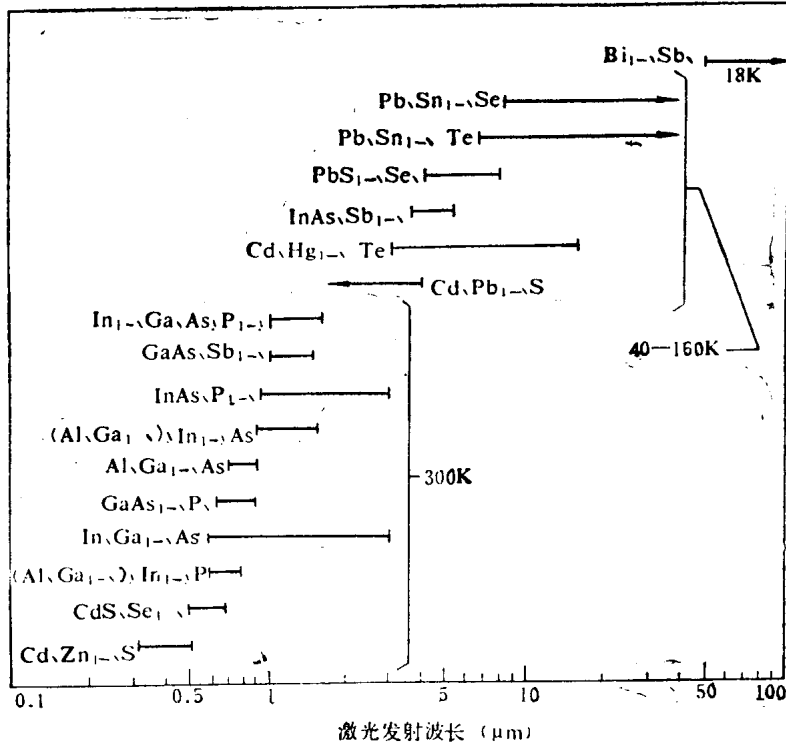


图 1.4 部分材料系统对应的波长(激射)范围, 图中标注的温度是指半导体激光器工作温度。

材料的激射波长的范围。可以看出, 这些材料对应的激射波长几乎复盖了从紫外到远红外光谱区。曾报到过激射波长接近 $100\mu\text{m}$ 的半导体激光器。就一般的异质结构激光器来说, 选择材料的准则是保证带隙不同的两种材料形成的异质界面缺陷最少。为此, 要求所选材料的格常数必须匹配, 晶格失配度应小于 0.1% 。图1.5给出了几种三元和四元化合物半导体的带隙 E_g 与格常数 a 间的关系。其中黑点示二元化合物, 实践表示三元化合物, 多边形围绕的空白区和阴影区是改变组分 x, y 对应的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 和 $(\text{Al}, \text{Ga}_{1-x})\text{In}_{1-x}\text{P}$ 的带隙与格常数的关系, 虚线表示不同 x, y 组分时, 四元化合物可能达到的带隙值范围, 点线则表示晶格匹配的四元化合物与二元化合物构成半导体激光器的激射波长范围。

图1.6给出了在组分 $x-y$ 平面内, 恒定带隙(实线)和恒定格常数(虚线)的等值曲线。对于给定的格常数, 可以通过组分 x, y 的恰当选择来得到材料的特定带隙(或激射波长)。对于给定的 E_g 和 a 值, 图中虚, 实线交点提供出所需四元化合物有源层组分 x, y 值。图中阴影区为间接带隙区。

由于激射光子能量 $h\nu$ 近似等于有源区带隙 E_g , 可以方便地利用 $E_g = h\nu = hc/\lambda$ 关系来估算激射波长 λ , 式中, h 为普朗克常数; c 是真空光速; ν 为光子频率。如果 E_g 单位用电子伏特(eV); λ 用微米(μm)量度, 则激射波长由下式给出

$$\lambda \approx \frac{1.24}{E_g} \quad (1.1-1)$$

根据图1.6, 恰当选择组分 x, y 值, 便可制造出晶格匹配的、波长覆盖 $1.1\mu\text{m}$ 至

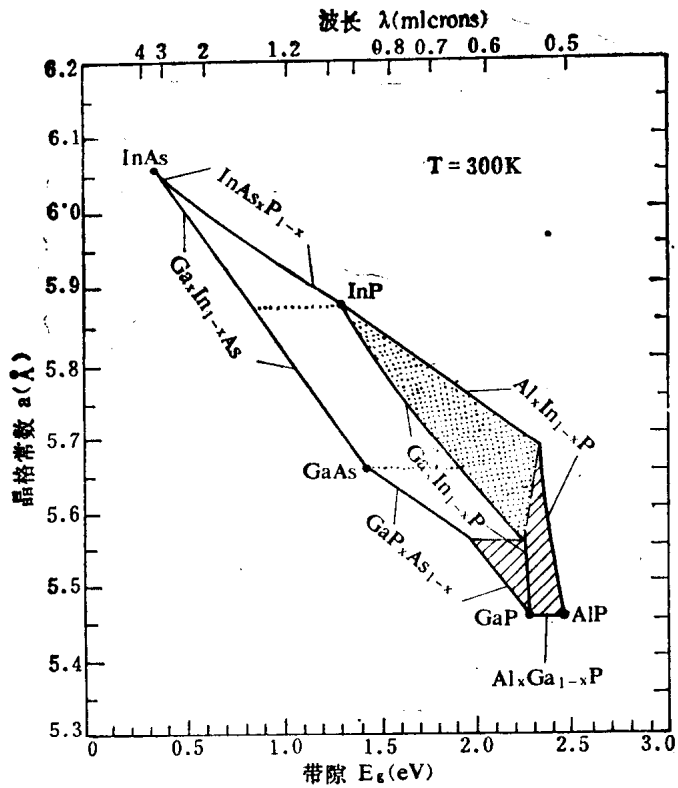


图 1.5 几种三元和四元化合物半导体不同组分 x 时的带隙，激光波长与格常数的关系曲线
 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$

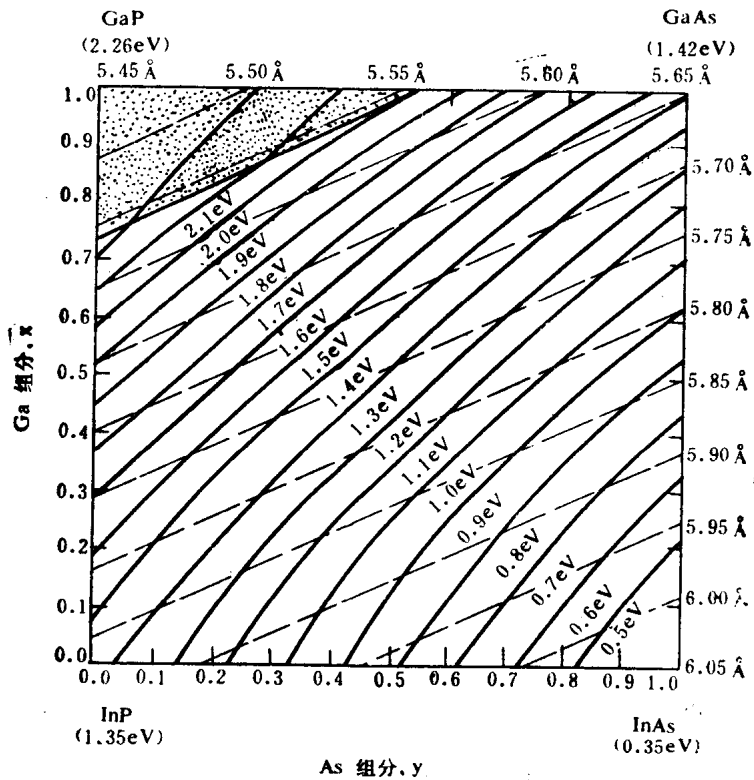


图 1.6 组分 $x-y$ 平面内, $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ 材料的恒定带隙与恒定格常数的等值线

1.6 μm (含1.3 μm 和1.55 μm 两个重要通信窗口)范围的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ 异质结构激光器。其它晶格匹配的异质结构材料也有相应的图形可查^[1·13]。

图1.4还给出了覆盖更长波长区 ($\lambda > 1.6\mu\text{m}$) 的材料系统。例如在 GaAs 衬底上外延生长晶格匹配的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 四元化合物有源层, 其覆盖波长在1.7 μm 至4.4 μm 范围。另一类重要的半导体材料是铅盐类化合物, 利用这类材料制出的半导体激光器, 其发射波覆盖了3 μm 到34 μm 的远红外波段。可惜的是这类激光器还只能在低温下工作。其中 $\text{PbTe}/\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 和 $\text{PbS}/\text{Pb}_{1-x}\text{Se}_x$ 两种材料系更为人们关注。此外, 曾报导过利用 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 材料作有源区时, 获得过100 μm 波长的激射^[1·19]。

正如前面提到的, 由于应变超晶格材料的出现, 即使两种材料的晶格失配度高达7%, 仍能作出性能优异的光电子器件, 这就大大拓宽了材料选择范围, 获得新的材料系统。

§ 1.2 半导体激光器的广泛应用^[1·20]

从七十年代初, 出现室温连续工作的半导体激光器起, 就开创了半导体激光器发展的新时期, 它给整个信息光电子领域带来了蓬勃生机。随着应用领域的迅速扩大, 半导体激光器的研究和开发以突飞猛进的速度发展。目前, 半导体激光器已在光纤通信、光传感、光盘、激光打印、条形码扫描、集成光学领域发挥着极为重要的作用。并在测量、自动控制、医疗、材料加工以及作为泵浦光源方面有着愈来愈重要的应用。现将不同波段半导体激光器的应用状况简介于下。

1.2.1 1300~1550nm激光器应用状况

1300nm和1550nm分别是硅光纤零色散和最低损耗窗口, 相应的半导体激光器主要用于长距离、大容量干线光通信。1981年至1986间, 主要采用1300nm波长的F-P腔半导体激光器与单模光纤的系统构成陆地和部分越洋长距离光通信干线。在此期间, 大约用了10万只长波长激光器, 总价值近2亿美元, 绝大部分市场集中在美、日和欧洲发达国家和地区, 其中美国占60%。经历数年的40%到50%以上的快速增长后, 由于这些国家的长途通信市场饱和, 使对长波长激光器的需求量进入稳定期, 即第二阶段, 此时, 市场趋于高性能、低价格的竞争时期。光纤通信系统转入短距离的城市网, 局域网和综合服务网的发展。

1986年, 器件性能更加优越的分布反馈 (DFB) 激光器和双沟道平面掩埋异质结构 (DC-PBH) 激光器开始商品化。1988年长距离光纤通信系统中开始采用1.55 μm 的 $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ DFB激光器。1.3 μm 和1.55 μm 波长激光器在微波模拟和高速数字通信市场中起重要作用。在此期间, 美国电报公司1990年推出2.5Gbit/s系列产品用于同步光纤网; 英国电信设备技术公司推出10GHz激光器用于光纤电视分配综合数字服务网; 英国标准电信公司生产的DFB激光器则瞄准海底光通信和光缆电视; 1986年首次出售DFB激光器的日电于1988年研制成功具 $\lambda/4$ 相移的DFB激光器, 实现了单频工作, 抑制了跳模现象, 大大降低了光纤通信系统的误码率, 并于1989年推出了具2.4Gbit/s传输速率的产品; 日本东芝公司也宣告采用MO-CVD技术生长出13Gbit/s超高速、波长1.3 μm 的

DFB激光器, 主要瞄准迅速出现的多路传真和视频数据传输领域; 日本电气公司研制成功的波长 $1.5\mu\text{m}$ MQW-DFB激光器, 工作在 2.4Gbit/s 下, 其波长起伏只有 0.4nm 。

目前, 光纤通信多采用强度调制、直接检波方式。而相干光通信则需要窄线宽、波长可调谐激光器, 这方面的工作, 仍处于试验阶段。其中英国电信设备技术公司首次推出了可调谐窄线宽的产品, 波长调谐范围大于 40nm , 线宽 100kHz , 也是首次用于相干光通信中作本机振荡的激光器; 目前日、美也能提供用于相干光通信的激光器。

表1.2.1给出了 1GHz 以上高速激光器的性能及其价格表^[1, 21]。按性能价格比, 一般而言, 对于传输速率为 Gbit/s 的光纤通信系统: 通信距离在 10km 以内, 光源采用F-P腔激光器; 10km 以上, 则采用DFB激光器。由于DFB激光器需加散热器和隔离器(一种单向光传输的晶片), 加之制造工艺难度大, 一般售价昂贵。但是, 作为远距离光纤通信, 它是最佳的选择光源。第二代越洋光通信系统几乎普遍采用 $1.55\mu\text{m}$ 的 InGaAsP/InP DFB激光器。近年来也有采用波长为 $1.5\sim 1.7\mu\text{m}$ 的应变型MQW InGaAs/InGaAsP 激光器作光纤通信系统光源的报导^[1, 22]。

表 1.2.1. 1GHz 以上高速半导体激光器性能及价格表

器件类型	波长(nm)	出纤功率(μW)	工作温度($^{\circ}\text{C}$)	价格(美元)
无致冷F-P激光器	1265~1357	200	0~70	400~500
致冷F-P激光器	1280~1330	1000	0~70	800~1000
致冷F-P激光器	1520~1565	1000	0~70	1400~1500
普通封装DFB激光器	1520~1565	1000	0~70	2500~3000
带隔离器DFB激光器	1520~1565	1000	0~70	6000~8000
外调制, 带隔音器DFB激光器	1520~1565	1000	0~70	>15000
外调制, 带隔音器, 外腔式	1535	500	0~70	>40000

波长介于 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 间 $1.48\mu\text{m}$ 激光器是近年来随着掺铒(Er)光纤放大器所需泵浦光源出现的, 其输出功率已达 $50\sim 100\text{mW}$ 以上。

1.2.2 790~1020nm激光器应用状况

$790\text{nm}\sim 830\text{nm}$ 激光器最早商品化, 用途最广泛, 用于条形码扫描、激光打印、光存储等领域。 800nm 波段附近的大功率激光器和列阵器件已用作 Nd:YAG , Nd:YLF 等固体激光器泵浦、医疗、照明、大气传输和材料加工等的光源。 850nm 波长是硅光纤的第一窗口, 其激光器多用于短程光纤通信网。 980 和 1020nm 波长则是掺铒光纤和掺镨(Pr)光纤放大器的最佳吸收波段, 与上述波长相应的半导体激光器分别作为两种光纤放大器的泵浦光源。此外, 800nm 波段激光器的军事应用也很广泛, 例如模拟训练, 引爆等。其中 850nm 波长激光器采用 GaAs 材料制作, 工艺成熟, 最先用于光纤通信系统。至今, 在短距离光纤通信系统中仍有较强的竞争力, 因为它比发光二极管(LED)带宽宽(大于 GHz), 又比长波长($\lambda > 1\mu\text{m}$)激光器(LD)的成本低。

在 $790\sim 830\text{nm}$ 波段上, 日本松下和夏普公司都已研制出用于可擦式光学数据存贮系统的大功率器件, 输出功率都在 50mW 以上, 光谱二极管实验室已推出了 100mW 的产品。

利用半导体激光进行材料加工是 800nm 波段激光器和列阵器件大功率化推进的结