

# 半导体激光器件物理学

[英]G.H.B.汤普森 著

周元庆 王清正

张文芳 庞涛 徐柱 译

蔡伯荣 校

电子工业出版社

## 内 容 简 介

本书系统地论述了半导体激光器中的物理过程及工作特性。全书包括两部分。第一部分阐述半导体激光器的基本原理。主要内容有半导体中的光发射过程、异质结特性和异质结激光器、光波导；第二部分讨论激光器的特性。包括宽接触和各种条形激光器的特性、激光器的动态特性等。最后介绍了分布反馈和分布喇格反射激光器。

本书可作为有关专业的研究生或本科高年级学生的教材或教学参考书，也可供从事光通信、光电器件、激光技术和光信息处理的科技工作者参考。

**G.H.B.Thompson**

**Physics of Semiconductor Laser Devices**

**John Wiley & Sons**

**半导体激光器件物理学**

[英]G.H.B.汤普森 著

周元庆 王清正

张文芳 庞涛 徐柱 译

蔡伯荣 校

责任编辑：连潮东

\*

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂印刷

\*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：20.75 字数：510千字

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

印数：1—1000册 定价：4.30元

统一书号：ISBN 7-5053-0266-3/TN·113

## 译 者 序

由于半导体激光器具有波长覆盖范围广、效率高、体积小、能实现集成化和便于调制等优点,所以自 1962 年问世以来的 25 年间获得了迅速发展。现在它已成为光通信、声频和视频光盘、光信息处理、光传感和集成光学的理想光源,其市场之广是其它任何一种激光器所无法相比的,从而使它成为光电子学中最活跃的领域。近年来,我国在这一领域的发展也很快,形成了一支从事教学、科研和小批量生产的科技队伍。

为促进我国光电子事业的发展,我们翻译了本书。该书是有关半导体激光器的、起点较高的专著。其特点是从物理学角度出发,全面而详细地分析了半导体激光器中的各种基本现象,深刻地揭示这些现象的物理过程,强调清晰的物理模型、避开繁琐的数学推导。尤其是对条形双异质结激光器中,载流子限制和光限制的物理过程作了迄今最为详尽的论述。这无疑对研制低阈值和模式特性好的器件具有重要指导意义。为研究高速和单频器件,书中还对半导体激光器的动态特性、分布反馈和分布喇格激光器作了较深入的分析。为了便于读者阅读,在有关章节引入了必要的基础知识,各章均列出了大量的专门文献。

本书虽以  $(\text{GaAl})\text{As}/\text{GaAs}$  为主要研究对象,但其内容对其它 III / V 族合金系统,如  $\text{InGaAsP}/\text{InP}$  也是适用的。

第一、二章由庞涛译,三、四章由张文芳译,第五章由徐柱译,第六章和附录由周元庆译,第七、八章由王清正译。

译者对原书中的印刷差错和其它错误之处均已作了纠正。但由于水平有限,难免有错、漏和其它不足之处,敬请读者批评指正。

译者于 1988.1.11.

## 序

半导体注入式激光器自问世以来的十五年中取得了出乎意料的进展。在此期间,从最初相当粗糙简单的 p-n 结激光器,发展衍生出为多种潜在的重要用途而特别设计的、整系列的先进光电子学器件。达到这一状况所进行的大量研究工作加深了人们对半导体光电子过程的认识,同时还促进了各学科之间的相互渗透。

近年来,在半导体激光器领域内提出了许多新概念,这就有必要重新评价一些较陈旧的观念。现在,它的发展看来已进入鼎盛时期。虽然发表新文章的数量并未减少,但研究重点在转移。目前,文章重点放在通过改进的工艺使已有的设想得以实现,而不是提出新的基本概念。一个巩固和发展的时期即将到来。现在半导体激光器已取得应有的地位,并在诸如光纤通信,军事系统,信息读出和写入等许多领域得到广泛的实际应用。近期将主要是改善现有器件而不是增加品种。目前是对本学科比较基本的方面进行认真归纳分析的时候了。

本书致力于论述半导体激光器物理学方面的问题。详细分析和描述了制约器件工作的基本现象。并着眼于基本概念和普遍规律的论述,避免那些并非普遍存在的个别现象。在数学推导繁琐和缺乏分析手段的地方,不取计算机模拟而选用近似方法,以便得到总体的物理模型及更好地理解其内容。这些内容随时都以曲线表示,而且这些曲线常常都是归一化的,以便于更普遍使用。半导体激光器中的物理现象涉及到许多学科。为了使对这些学科尚不精通的读者能阅读本书,在基础部分的章节里,编入了对理解本书较专述的章节所必须的最低限度的基础知识。而且,为了理解书中更专门化的内容,以一种易于阅读的方式提供了最低限度的背景材料。

本书的安排如下。第一部分基本原理。第一章绪论。第二章详细叙述半导体中的光发射。首先论述适用于半导体的爱因斯坦发射-吸收关系,进而分析阈值电流,微分效率和激光器的纵模分布。第三章研究半导体异质结的载流子注入过程及温度对载流子限制的影响。第四章论述光被限制在非常小的半导体激光器芯片内的过程。为达到约束光的目的,在半导体内有意制作了介质光波导,增益波导也有利于约束光。为便于更多的读者阅读,采用射线光学和波动光学两种处理方法简要地导出了介质光波导原理,其结果普遍适用于各种类型的异质结构光波导。特别注意将此原理应用于增益导引过程。此过程是半导体激光器所特有而在别处却难以遇到的,本章对此作了十分详细的分析。还用波导理论研究了激光器谐振腔的横模。

本书第二部分论述半导体激光器的具体特性。主要是:第五章中各种宽接触异质结构激光器的性质;第六章全面论述“条形激光器”和它们的工作模式;第七章中激光器的动态特性,包括调制、延迟,稳定性和噪声;第八章分布反馈和分布布喇格反射激光器。全书中大多数都用 GaAs / (GaAl)As 激光器为例。因为,目前只有这类器件才能给出解释一般原理的足够好的特性。然而书中的基本内容更具有普遍性。

为了给本书的其余部分提供更多分析资料,第一章对半导体激光器和有关技术的现

代发展作了简要的评论。不仅叙述了不同类型的激光器和材料,而且还对它们的制造过程和制约器件工作寿命的因素作了介绍。也讨论了半导体激光器将来在集成光学中可能起的作用,但未涉及具体的应用场合。

本书不打算提供全部有关的研究文献或指出在每个领域首次发表的文章。书中提供的参考文献是从两个方面来选择的:增加本学科的一般知识和在读者需要附加资料的地方增加补充内容。可以从综合目录中查到各种评论文章。

# 目 录

<b>第一章 导论和基础</b> .....	1
1.1 引论.....	1
1.2 激光器设计和发展评论.....	1
1.3 激光器的半导体材料.....	4
1.4 器件制备的一些问题.....	8
1.5 晶体生长.....	8
1.5.1 液相外延.....	8
1.5.2 化学气相沉积.....	10
1.5.3 分子束外延.....	11
1.6 激光器的制造.....	11
1.6.1 衬底制备.....	12
1.6.2 外延片的金属化.....	12
1.6.3 端面涂层.....	13
1.6.4 激光器芯片的分离和装配.....	13
1.7 激光器的退化.....	13
1.8 半导体激光器同其他光学元件的集成.....	16
参考文献.....	17
<b>第二章 半导体中的光发射过程和激光</b> .....	21
2.1 电子辐射跃迁.....	21
2.2 发射和吸收过程之间的关系.....	24
2.2.1 热辐射.....	24
2.2.2 电子态密度和占据几率.....	26
2.2.3 跃迁几率之间的爱因斯坦关系.....	28
2.2.4 总的受激发射速率.....	29
2.2.5 净受激发射条件.....	30
2.2.6 自发发射速率和它与受激发射及吸收之间的关系.....	31
2.2.7 光增益.....	32
2.3 跃迁几率.....	33
2.3.1 带间跃迁( $k$ 选择).....	33
2.3.2 杂质能级和对应的能带之间的跃迁.....	34
2.3.3 重掺杂半导体的带间跃迁.....	36
2.4 重掺杂半导体中的电子态密度.....	37
2.4.1 杂质态.....	38
2.4.2 带尾.....	39

2.5 载流子复合和自发发射 .....	42
2.5.1 严格 $k$ 选择的复合 .....	43
2.5.2 放宽 $k$ 选择的复合 .....	43
2.6 增益—电流关系 .....	46
2.6.1 唯象分析 .....	46
2.6.2 “理想”半导体的增益—电流关系 .....	49
2.6.3 放宽 $k$ 选择的增益—电流关系 .....	50
2.7 光—电流特性 .....	54
2.7.1 阈值条件 .....	55
2.7.2 效率(低功率) .....	57
2.7.3 阈值附近的光输出 .....	62
2.7.4 效率(大功率) .....	66
2.8 光模式 .....	68
2.8.1 纵模间隔 .....	70
2.8.2 各模的谱分布 .....	70
2.8.3 模谱和光强随电流的变化 .....	72
参考文献 .....	76
<b>第三章 激光器的异质结构和异质结的性质 .....</b>	<b>79</b>
3.1 同质结构激光器 .....	79
3.2 异质结 .....	80
3.2.1 异质结中载流子的注入和输运 .....	82
3.2.2 异质结中载流子的限制 .....	85
3.2.3 异质结中载流子的复合 .....	86
3.2.4 异质结势垒的效能 .....	87
3.2.5 带隙与半导体组分的关系 .....	89
3.2.6 折射率与半导体组分的关系 .....	90
3.3 异质结构激光器的类型 .....	92
3.3.1 单异质结构激光器 .....	92
3.3.2 双异质结构激光器 .....	93
3.3.3 提供局域增益的异质结构 .....	93
3.4 条形激光器(二维异质结构) .....	95
参考文献 .....	96
<b>第四章 光波导 .....</b>	<b>98</b>
4.1 介质平板波导 .....	98
4.1.1 射线分析 .....	98
4.1.2 波动分析 .....	99
4.1.3 横向光场分布 .....	103
4.1.4 异质结构的介质波导特性 .....	105
4.1.5 辐射光束的发散 .....	107

4.1.6 端面反射率 .....	114
4.2 平滑分布的增益波导和介质波导 .....	116
4.2.1 增益和介电常数虚部的等价性 .....	117
4.2.2 横向光场分布 .....	117
4.2.3 具有抛物线型介电常数分布的波导的分析 .....	120
4.2.4 $\cosh^{-2}$ 型介电常数分布的波导的分析 .....	127
4.2.5 小结 .....	133
4.3 横模的波导特性 .....	134
4.3.1 介质平板波导中的横模 .....	135
4.3.2 平滑分布的介质波导中的横模 .....	137
参考文献 .....	142
<b>第五章 异质结构激光器的性能</b> .....	<b>143</b>
5.1 引言 .....	143
5.1.1 单异质结构激光器和双异质结构激光器 .....	144
5.1.2 大光腔激光器 .....	145
5.1.3 局域增益区激光器和分别限制异质结构激光器 .....	145
5.2 阈值电流密度 .....	146
5.2.1 概述 .....	146
5.2.2 双异质结构 .....	149
5.2.3 单异质结构和温度效应 .....	151
5.2.4 局域增益区结构或分别限制异质结构 .....	154
5.2.5 局域增益区激光器和分别限制异质结构激光器中阈值的温度敏感性 .....	159
5.2.6 大光腔激光器 .....	161
5.3 高峰值功率 .....	161
5.3.1 概述 .....	161
5.3.2 双异质结构 .....	162
5.3.3 单异质结构 .....	163
5.3.4 分别限制异质结构激光器和局域增益区激光器 .....	163
5.3.5 大光腔激光器 .....	164
5.4 微分效率 .....	164
5.4.1 概述 .....	164
5.4.2 双异质结构 .....	166
5.4.3 单异质结构 .....	166
5.4.4 分别限制异质结构激光器和大光腔激光器 .....	167
参考文献 .....	168
<b>第六章 条形激光器</b> .....	<b>170</b>
6.1 引言 .....	170
6.2 条形激光器的类型 .....	171
6.2.1 条形接触激光器 .....	171



6.2.2	质子轰击和氧注入条形激光器	173
6.2.3	掩埋异质结构条形激光器	173
6.2.4	p-n 结限制结构	175
6.2.5	凸条形激光器	177
6.2.6	双条形激光器	180
6.3	条形激光器的载流子限制	180
6.3.1	载流子限制的方法	180
6.3.2	条形接触激光器的电流扩展	182
6.3.3	载流子扩散损耗	184
6.3.4	电极下的电流扩展和扩散	186
6.3.5	掩埋异质结构中的载流子限制	189
6.3.6	双横向结激光器的载流子限制	190
6.4	条形激光器的光限制	191
6.4.1	增益导引	191
6.4.2	自聚焦	196
6.5	条形激光器的阈值电流	205
6.5.1	阈值电流的理论分析	206
6.5.2	阈值电流与条宽关系的测试结果	215
6.5.3	激光器长度对阈值电流的影响	217
6.6	条形激光器的光—电流特性	219
6.6.1	带边吸收对微分效率的影响	220
6.6.2	光—电流特性的非线性效应	221
6.7	条形激光器特性小结	230
6.7.1	具有电流限制窗口的激光器	230
6.7.2	具有附加光限制的激光器	233
6.7.3	具有光和载流子限制的激光器	234
	参考文献	235
<b>第七章</b>	<b>激光器的动态响应</b>	<b>238</b>
7.1	瞬态响应的物理模型	239
7.2	延迟时间	241
7.3	光子—电子共振和调制	243
7.3.1	速率方程	243
7.3.2	单模激光器中的小振幅振荡	246
7.3.3	多模激光器中阈值附近的小振幅振荡	249
7.3.4	激光振荡的扩散阻尼	252
7.3.5	条形激光器中的典型实验观察	258
7.4	注入电流非均匀性对瞬态的影响	261
7.4.1	小振幅振荡分析	262
7.4.2	非稳定激光器的理论模型	266

7.5 激射的出现 .....	269
7.5.1 纵模动态光谱 .....	269
7.5.2 多模输出的大小与时间的关系 .....	270
7.5.3 瞬态振荡的模式分布 .....	276
7.5.4 从低值到高值转换过程中的模谱 .....	276
7.6 反常接通延迟和 $Q$ 开关 .....	277
7.7 激光输出的噪声起伏 .....	278
7.7.1 特性的观察 .....	279
7.7.2 理论 .....	279
参考文献 .....	283
<b>第八章 分布反馈激光器和分布布喇格反射激光器 .....</b>	<b>285</b>
8.1 引言 .....	285
8.2 理论 .....	286
8.3 波在周期波导中的传播 .....	288
8.4 本征波的反射和透射系数 .....	291
8.5 周期结构的阈值条件和输出耦合 .....	293
8.5.1 部分泵浦的分布反馈激光器 .....	293
8.5.2 分布布喇格反射激光器 .....	293
8.5.3 具有均匀输出波导的分布反馈激光器 .....	298
8.6 微分效率 .....	300
8.7 耦合系数 .....	301
8.8 周期结构的辐射 .....	304
8.9 周期结构激光器的设计及其性能 .....	307
8.9.1 分布反馈激光器 .....	307
8.9.2 布喇格反射激光器 .....	309
8.9.3 光栅耦合输出光束激光器 .....	310
参考文献 .....	311
<b>附录一 激光器结构的热耗散 .....</b>	<b>313</b>
<b>附录二 条形激光器中二维波导的近似分析 .....</b>	<b>316</b>
<b>附录三 在介电常数的实部和虚部分布之间具有空间位移的</b>	
<b>抛物线波导中光模的导引 .....</b>	<b>318</b>
A3.1 概述 .....	318
A3.1.1 光束位置 .....	318
A3.1.2 波前倾斜 .....	318
A3.2 精确的解析式 .....	319
<b>附录四 注入载流子对半导体介电常数的影响 .....</b>	<b>320</b>

# 第一章 导论和基础

## 1.1 引 论

半导体激光器经历了一个相当长的发展时期以后,现在正趋于成熟。最初的概念可追溯到1961年,那时Basov等人<sup>[1]</sup>提出,通过p-n结注入的载流子复合,在半导体中能够产生光子的受激发射。仅仅在Maiman<sup>[6]</sup>首先论证了最先工作的红宝石激光器三年后及第一个气体激光器被论证两年以后<sup>[7]</sup>,于1962年由美国的三个研究小组<sup>[2~5]</sup>几乎同时宣布,获得了第一个实用的在低温下工作的半导体激光器。然而,半导体激光器的出现比其他类型的激光器只不过晚了几年,它的发展则明显地落在其他类型激光器的后面,并且花了很长时间才达到成熟。

半导体激光器成熟较慢,部分原因是常常涉及到发展一种新的半导体工艺问题。还与器件的特殊性质密切相关。对于一定的反转度,半导体受激发射比其他任何材料更强。因此,为适应所出现的高速率的能量产生和热耗散,已经作出特别努力。在这个发展过程中,半导体激光器的结构有了很大的变化,现在的激光器与1962年首次工作的器件完全不同,由不同组份的若干层半导体异质结构代替了简单的p-n结。直接影响器件性能的于1969年首先提出的异质结构<sup>[8~10]</sup>,在以后几年内得到了进一步发展和改进<sup>[11,12]</sup>。这种崭新的设计把仅仅只能在低温下工作的半导体激光器变成了能在室温下连续运行的、有效的实用器件。

促进半导体激光器必然走向成熟的一个因素是出现了一种新的重要的应用,它对器件性能提出了很多要求。这种应用就是采用激光器作为光纤通信系统的信号源。为使器件能满意地达到上述目的,必须研究器件性能的各种变化并用适当的方法来改善和提高器件的性能。特别是激光器的可靠性、重复性和工作寿命。因此一般有用的器件都作了许多改进并且很快找到了其他各种各样的应用。

## 1.2 激光器设计和发展评论

第一只注入式激光器是由矩形GaAs薄片做成,在薄片扩散了一个平面p-n结。这种激光器的GaAs芯片固定在金属基片上,其顶部接有导线。这个芯片有两个平滑的解理端面和两个粗糙的侧面。光从它的端面射出。p-n结的位置和光发射方向如图1.1所示。电流流过电极产生的少数载流子,特别是电子,越过p-n结注入到其厚度接近于扩散长度的区域内与多数载流子复合。当电流上升至足够高时,开始在这个区域中产生受激发射。因为GaAs的折射率较高,芯片端面具有很高的反射率且形成Fabry-Perot谐振腔。当电流上升至一定值,即称为“阈值”的时候,在接近于注入载流子复合区厚度范围内,这个谐振腔谐振激发产生激光振荡。因为在半导体中受激发射率较高,使Fabry-Perot谐振腔的长度可以远远小于其他大多数激光器,其长度宜取在0.2~1mm

之间。

上述的简单 p-n 结半导体激光器的阈值很高,特别是在室温以上,其值可达  $35\sim 100\text{kA}/\text{cm}^2$ 。这种高阈值是半导体的一个主要的基本性质,是由导带和价带的高电子态密度引起的(参看第二章)。可是,在如上所述的简单结构中阈值电流密度甚至会进一步增大,因为(a)没有一种非常满意的方法使光限制在产生反转的区域内,(b)反转区不是精确确定的,而尾部又远离载流子扩散的方向。

在半导体激光器发展的早期 Kroemer<sup>[13]</sup>, Alferov 和 Kazarinov<sup>[14]</sup>认为激光器上述两个缺点能够通过 GaAs 反转层的每一边加上一个附加层得以改善,这个附加层由具有较宽带隙的半导体所组成。这样一种结构提供了一种既把注入载流子完全限制在有源层内又把光大量限制在同一区域的方法。正如第三章所述,由宽带隙的界面构成的势垒,限制了注入载流子;由窄带隙层的高折射率产生的波导,限制了光。带隙与折射率之间必然的反量关系几乎出现在整个 III/V 族化合物半导体中,很少有例外,注入式激光器几乎完全使用这种 III/V 族化合物半导体(参看 1.3 节)。这些多层激光器的结构叫做“异质结构”。并且为了区别起见,把最初的简单的 p-n 结构重新命名为“同质结构”。异质结构的特殊优点是(a)构成了波导;(b)能够把有源区作得比同质结构中的薄得多;(c)注入有源区内的载流子浓度更加均匀。

可以预料异质结构所提供的激光器性能的改进,如果没有采用近乎理想的电学特征的“异质结”,是不可能实现的。异质结的性质主要由晶体的完整性和一个必要的准则所决定。其准则是,为有良好的性能,必须满足两部分半导体的晶格尺寸非常接近。采用 GaAs 与化合物半导体  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  的组合的第一个异质结构<sup>[15]</sup>其晶格尺寸不匹配,由此在异质结上产生的晶格缺陷导致了大量的注入载流子的非辐射复合。1967 年 Woodall 等人<sup>[16]</sup>证实了用液相外延技术,能够

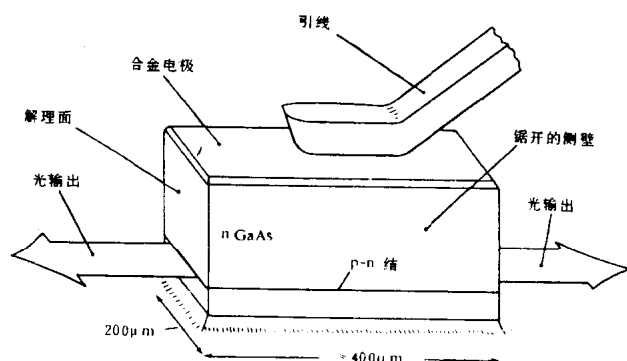


图 1.1 具有引线、固定在热沉上的宽接触激光器

成功地使  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  生长在 GaAs 衬底上,且与 GaAs 的晶格匹配得极好。这个工作促使了三个独立的科研小组,即 Alferov 等<sup>[8,12]</sup> Kressel 等<sup>[9]</sup>以及 Panish 和 Hayashi<sup>[10]</sup>, 采 GaAs / (GaAl)As 系统来制造异质结构激光器。这些器件作得很好。在逐步研究异质结构的过程中,降低了阈值电流密度,并且最终制成了室温下连续工作的激光器<sup>[11,12]</sup>。

为了尽可能完善激光器性能的不同方面,已经研制了各种类型的异质结构。例如,通过改变各层的数量和尺寸,有可能获得特别低的阈值电流密度,或者大大减小光束的发散,或者大大减小沿垂直于结平面方向扩展的相当大的发散端面,当端面损伤是限制因素时,后一个特征与峰值输出功率的最大值有关。第五章中详细描述了改变各层的数量和尺寸能够获得不同的异质结构和性能。各种结构中最广泛采用的是单异质结构和双异质

结构。前者仅有一层宽带隙材料毗邻于有源层,并且特别适用于高功率的应用;后者有源层夹在两层宽带隙材料之间,并且适用于低电流连续工作。

在大多数半导体激光器中,限制注入电流的扩展和限制平行于结的平面内激射的扩展是重要的。为此目的,必须把工作电流限制在与激光器轴线对准的窄条上。为了阻止条型外面电流的流动,必须绝缘。这种绝缘有不同的方式,可以引出不同的器件。图 1.2 中示出了采用  $\text{SiO}_2$  绝缘的一种简单设计。这些器件是在条型结构的统称下分类的。各种细微而有意义的差别产生不同的结构性能,为了弄清这些性能必须作出大量的详细研究。结平面中受激发射的横向分布的精确形状,在确定激射的宽度和阈值条件中起着重要的作用。所包含的因素在第四章 4.2 节中讨论。与折射率的小变化有关的其他作用也是重要的,并且能够影响光学分布的稳定性。第六章描述了不同类型的条型激光器,并且还详细讨论了它们的性能。在半导体激光器成功地应用在光通信系统方面,条型激光器的发展是特别有意义的。

通过直接改变电流,能够有效地调制半导体激光器达到高的调制频率,实际的高频范围可达 2GHz 左右。在这方面半导体激光器比其他类型的激光器更优越,而其他类型的激光器,对于调制它们的泵浦供给,几乎不能够如此迅速地响应。在通信系统中,半导体激光器的直接调制能力是非常有用的,因此了解其调制机理和它的极限特别重要。原理上这个过程包含了激光器谐振腔中的注入载流子和光子之间的相互作用。第七章中详细描述了在正弦和阶跃函数激励的两种情况下的这种相互作用。一定条件下,激光器的光谱会受调制影响。这种情况特别适用于当激光器仅在阈值上面一点工作或者在接近阈值脉冲工作的时候。那时会激励出许多纵模。这种特性也将在第七章中论述。一个与激光器电流调制有关的课题是激光器输出所出现的噪声或涨落现象。噪声源是由于个别光子的相互作用引起的光激励激光器的散粒调制。此课题将在第七章的后部分作专题讨论。

已经作了大量的工作来制造比简单 Fabry-Perot 结构更新奇的激光谐振腔。其目的是为了获得更好的模式控制或者制造一种更容易集成在集成光学组件中的结构。为了获得更好的模式控制,可把激光器的芯片作成外腔结构内的一个部件,该外腔结构是由一个或两个镜片构成的适当的光学系统,通常激光器端面上镀有抗反射涂层。在某种程度上对这种外腔的需要现在已经减少,这是因为已经改进了一般的条型 Fabry-Perot 腔的模式控制。然而在必须使用比一般条型激光器更大的半导体有源层体积的地方,如在高峰功率系统中,外腔还是有一定的应用。还可以证明外腔对于压窄个别模式的线宽和广泛稳定半导体激光器的波长将是有益的。因此可以用于要求长相干长度的全息照像。

可以使用另一种形式的激光谐振腔来完成一般端面反射器的功能,这种谐振腔是把光栅作在多层结构上构成的。将这种光栅用在稍有不同的两种结构上时,就分别叫做分布反馈激光器和分布布喇格反射激光器。第八章中详细描述了这两种激光器,并且讨论

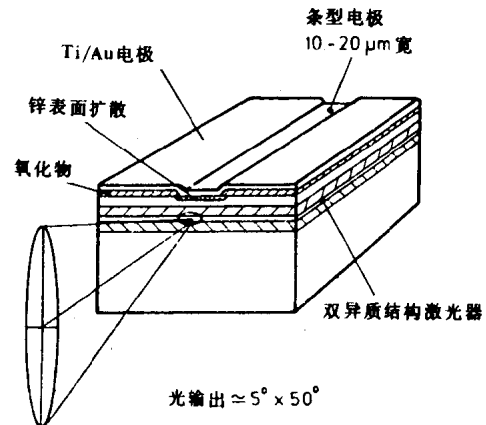


图 1.2 氧化物绝缘 GaAs/(GaAl)As 双异质结构条型激光器

了它们的工作模式。在这样的激光器设计中,可以使多层结构有利于无源输出波导的制备,可以把无源波导用于将光对准各种其他集成光学组件。目前只作成了这一类型非常简单的器件。在这章的后面将对它们的某些方面作简短的讨论。

### 1.3 激光器的半导体材料

除 GaAs 以外,还有大量的半导体材料已经用来制造注入式激光器。研究使不同材料的主要目的是扩展可以发射的波长范围。至今已经用来制造简单 p-n 结激光器(同质结构)和异质结构激光器的各种材料,连同它们的发射波长列于表 1.1 中。已经获得的波长覆盖了一个非常重要的范围,即在短波端从 (GaIn)P<sup>[17]</sup> 的 0.59 $\mu\text{m}$  至长波端<sup>[18]</sup> 接近 (PbSn)Te 的 30 $\mu\text{m}$  处。然而,室温下连续工作的范围目前受到非常多的限制而处于 0.7 $\mu\text{m}$  和 1.67 $\mu\text{m}$  之间。

表 1.1 在有源层中使用各种 III / V 族和 IV / VI 族化合物半导体激光器例子

材 料		衬 底		激光器类型	$\lambda(\mu\text{m})$	$J_{th}(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	参考 文献
有源层	无源层	材料	晶格匹配				
Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As	Ga <sub>1-y</sub> Al <sub>y</sub> As	GaAs	是	DH(双异质结)	0.9~0.7	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup>	34
(GaIn)P		GaAs	不	同质结	0.59	>10 <sup>4</sup> (77K)	17
Ga(AsP)	(GaIn)P	GaAs	不	DH	0.70	3.4 × 10 <sup>13</sup>	33
(GaIn)(AsP)	InP	InP	是	DH	1.15~1.65	1~2 × 10 <sup>3</sup>	21,22
Ga(AsSb)	(GaAl)(AsSb)	GaAs	不	DH	1.0	2 × 10 <sup>3</sup>	26
(GaAl)Sb	(GaAl)(AsSb)	GaSb	是	DH	1.35	≈ 2 × 10 <sup>3</sup>	23
(GaIn)(AsSb)	(GaAl)(AsSb)	GaSb	是	DH	1.80	5 × 10 <sup>3</sup>	96
(PbSn)Te		PbTe	不	同质结	直至 28	≈ 150(12K)	18
					直至 15	≈ 5 × 10 <sup>3</sup> (77K)	18
(PbSn)Se		PbSe	不	同质结	直至 34	≈ 150(12K)	18
(PbSn)Te	PbTe	PbTe	不	DH	8~15	6~20 × 10 <sup>3</sup> (70~110K)	40
Pb(SSe)	PbSe	Pb(SSe)	不	单异质结	5	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup> (20~90K)	36
(PbSn)Se	PbSe	(PbSn)Se	不	单异质结	11	≈ 10 <sup>4</sup> (90K)	36

注入式激光器的有源层中所使用的半导体材料必须具有直接带隙。正如在第二章中所解释的那样,只有直接带隙材料能提供足够强的辐射复合来产生满意的受激发射。没有一个正规的元素半导体是直接带隙的,但是有大量的二元化合物具有直接带隙。此外,利用不同二元系之间固溶体带隙的连续变化,可能产生直接带隙半导体。

最重要的一组二元化合物是所谓的 III / V 族化合物,它们是一种由 III 族元素——Al、Ga 或 In 和一组 V 族元素——P、As 或 Sb 组成的化合物。以上的化合物中除了 GaP 和 Al 的三个化合物 (AlP、AlAs 和 AlSb) 之外其余的都是直接带隙材料,并且已有激射,至

少以纯二元化合物所作的同质结构激光器是如此。各种三元和四元化合物,包括那些含一定比例的 GaP 或 Al 的化合物,如象 Ga(AsP)和(GaAl)As,直到某一极限组分时,也都是直接带隙材料,并能使其发射激光。

已经研究了有源层具有组分变化的这些材料的异质结构激光器。设计一般如下,为了开发 GaAs/(GaAl)As 系统,用不同的 III/V 族化合物的固溶体来获得不同异质结构层的相应的特性。然而,与(GaAl)As 不同,不存在其晶格常数不随组分产生明显变化的其他三元固溶体。因而用四元固溶体是必要的。为了获得晶格匹配,四元系提供了一个额外的自由度。因此,不要求取代原子和被取代原子具有相同的尺寸,只要一种取代原子比较小,而另一种取代原子比较大,就可以通过调整两种取代原子的比例使晶格常数不随组分的改变而变化。为了找到一个恰当的比例,仔细的实验是必要的,一旦找到了合适的比例,那么在这些材料的制备中就能够获得象(GaAl)As/GaAs 系统一样好的重现性。

图 1.3 表示若干 III/V 族化合物的三元系固溶体的晶格常数同带隙之间的关系。这是一个显示出改变固溶体组分而不改变晶格常数所能获得的带隙范围的有用的图形。四元系的性质能够从三元系的性质内推,并且与包含在四边形内的区域对位,该四边形的四个角代表四种单纯的二元化合物。

作为一个例子,我们考虑重要的 (GaIn)(AsP) 系统。对应图形的四个角分别代表 InAs、InP、GaAs 和

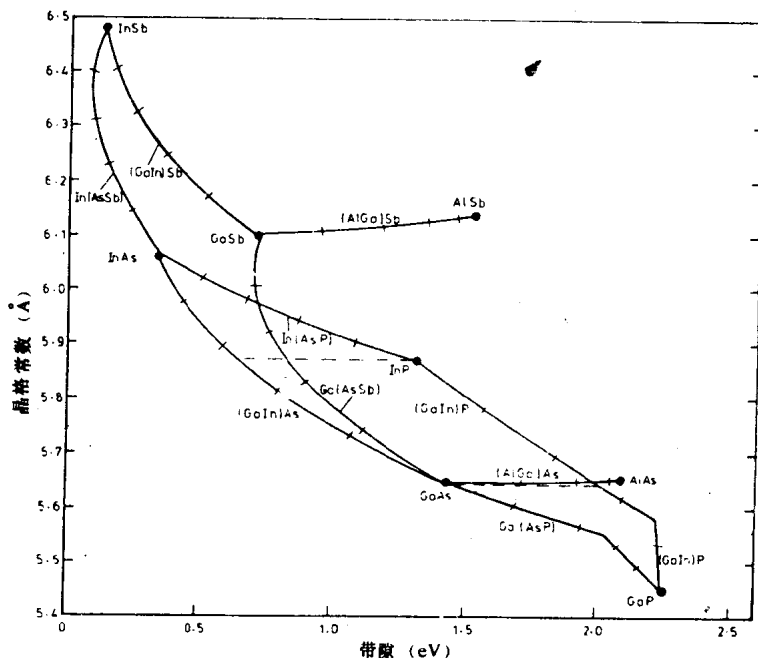


图 1.3 若干 III/V 族半导体晶格间距和带隙之间的关系。

这些半导体包含 Al、Ga、In 和 P、As、Sb 的三元化合物 GaP, 并且四条边代表固溶体 (GaIn)As、In(AsP)、(GaIn) 和 Ga(AsP)。在半导体各层的整个外延生长中,必须从衬底薄片开始,通常最好选择各层的材料与衬底的晶格常数匹配。在这个四元系中,只有两个纯的二元系具有中间的晶格常数,即 GaAs 和 InP,才能提供衬底,在此衬底上可以生长一定范围的晶格匹配组分。参考图 1.3 指出在 GaAs 衬底上可以生长宽的带隙材料,直到  $Ga_{0.5}In_{0.5}P$  的最大带隙(处在水平线上)为止,并且在 InP 衬底上可以生长窄带隙的四元系材料,终止于  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  的最窄带隙。使用上面两个系已经制成异质结构激光器。虽然在 GaAs 衬底上生长的那些异质结构激光器,大大地重现了 (GaAl)As 激光器的性质,但是生长过程更复杂<sup>[19,20]</sup>。实际上更感兴趣的是第二个系统,它使用四元系化合物来作为这种激光器的有源层并且能够产生发射波长在

大约  $1.1\mu\text{m}$  (应远大于提供良好异质结构的无源层 InP 的  $0.92\mu\text{m}$  的波长) 直至与  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  三元系对应的  $1.67\mu\text{m}$  的范围内。在撰写本书期间, 已经获得在室温下波长在  $1.15$  和  $1.67\mu\text{m}$ <sup>[21,22]</sup> 之间良好工作的激光器。

还能够把 GaSb 用来作为四元层 (GaAl) (AsSb) 和 (GaIn) (AsSb) 的晶格匹配的衬底。在这两种情况下使用 (GaAl) (AsSb) 作无源层, 就能使这些系统覆盖  $1.3\sim 1.7\mu\text{m}$  和  $1.7\sim 4.4\mu\text{m}$  波长范围。它们已经成功地工作在  $1.3$  和  $1.4\mu\text{m}$ <sup>[23]</sup> 之间以及  $1.8\mu\text{m}$  上<sup>[96]</sup>。

对 Ga(AsSb) / (GaAl) (AsSb) 系统也进行了研究, 该系统与任何一种纯的 III / V 族材料晶格都不匹配。在这个工作中, 用 GaAs 作衬底, 且在初期生长过程中用组分逐渐变化来抑制失配位错的产生。已经制造的异质结构激光器有优良的性能, 但是为了使器件可靠和具有长寿命, 恐怕这种渐变组分方法并不完全有效。目前看来, 要用 III / V 族化合物来制造在实际应用中具有良好性能的激光器, 晶格匹配是必须的。

能够使 III / V 族半导体激光器工作的最短波长处在可见光谱的长波长端。低温下脉冲工作同质结激光器已经获得了非常短的波长。由临近直接-间接过渡点来确定这些激光器的较低极限。当组分使激光器工作也接近该点时, 会出现大量的非辐射跃迁, 从而不可能再激射。且异质结构的激光器在室温下获得的最短波长要稍长一些。这是因为在高温下材料的带隙会减小和异质结构激光器还受到附加的限制。特别是, 这些激光器中需要提供晶格匹配的宽带隙无源层, 不允许有源层组分有这样宽的选择。

让我们考虑带隙和相应的波长数值。带隙直接-间接转变(过渡)出现在若干 III / V 族半导体中(例如参看第三章图 3.9)。对于过渡, 具有最大带隙值的材料依次是 (AlIn)P,  $2.33\text{eV}$  ( $532\text{nm}$ )<sup>[27]</sup>; (GaIn)P,  $2.25\text{eV}$  ( $551\text{nm}$ )<sup>[28]</sup> (AlIn)As,  $2.04\text{eV}$  ( $608\text{nm}$ )<sup>[29]</sup> 及 (GaAl)As<sup>[30]</sup> 和 (GaAs)P<sup>[31]</sup>,  $1.97\text{eV}$  ( $629\text{nm}$ )。在过渡点上, 间接能带中存在着最大比例的导带电子, 这是因为这些电子态密度远远大于直接能带中的电子态密度。其数值达 98% 左右。间接能带中的电子不发生辐射跃迁, 因此不能够产生激射。虽然在复合前一部分可能转至直接能带, 但它们主要引起附加的非辐射复合, 从而大大增加了激射阈值。一直到材料组分使直接能带仍处在间接能带之下大约  $0.15\text{eV}$  的情况下, 这些材料才有激射的可能。在这种组分材料中, 电子不仅不占据间接能带, 而且还不占据通常伴随着间接能带的深的施主能级。因此, 激射阈值只在正常水平上增加一点。

已经获得的 III / V 族注入式激光器的最短波长是在  $77\text{K}$  下同质结 (GaIn)P 激光器的  $590\text{nm}$ <sup>[17]</sup>。原则上有可能用这种三元材料进一步缩短波长, 但实际上要获得足够高的 p 掺杂是有问题的。

一般不能把 (GaIn)P 用作双异质结构激光器的有源层。如图 1.3 所示, 没有一种合适的 III / V 族化合物与它配合用来形成限制层。与有源层 (GaAs)P 配合, (GaIn)P 本身可以用来作为限制层<sup>[32,22]</sup>。然而, 比 (GaAs)P / (GaIn)P 更方便且质量几乎与它相当的一种组合系统使用的是两种组分的 (GaAl)As: 一种刚好在过渡组分下面的组分作为有源层; 另一种组分明显地在过渡组分上面用作无源层。图 1.4 中画出了室温下宽接触激光器中从该组分开始获得的典型阈值电流密度随着有源层中 AlAs 含量  $x$  变化的函数曲线。 $x$  大于  $0.16$  ( $< 770\text{nm}$ ) 时, 阈值开始上升, 且当  $x = 0.28$  ( $690\text{nm}$ ) 时, 其阈值大约增大 10 倍。这种材料的条型激光器获得的连续工作的最短波长是  $714\text{nm}$ <sup>[35]</sup>。

除了 III / V 族化合物外, II / VI 族和 IV / VI 族化合物也可以制成直接带隙半导体。



但只有 CdTe 这种 II / IV 族化合物成功地用来作成了激光器(同质结构器件)。其他 Cd 的 II / VI 族化合物和 Zn 的 II / VI 族化合物不能掺杂形成 p-n 结, 因此不宜用作注入式激光器。

对注入式激光器感兴趣的 IV / VI 族半导体包括 S、Se 和 Te 的 Pb 盐类材料, 它们自身间形成混合固溶体, 以及与 Se 和 Te 的盐类形成相应的混合固溶体。这些 Pb 盐是直接带隙半导体, 虽然它们不同于其他直接带隙半导体材料, 其导带的极小值和价带的极大值出现在 L 点(非零点  $k$ ) 而不在如 III 族材料那样的  $\Gamma$  点(零点  $k$ ) (参看第二章)。Sn 盐有负的带隙, 即导带和价带之间有一个重叠。既然在 (PbSn) Se 和 (PbSn) Te 固溶体中, 有连续变化的特性, 可能通过适当选择 Sn 的含量来获得从纯材料的位置(在 77K 下对于 PbSe 为 0.17eV, 对于 PbTe 为 0.22eV) 降至零(能带转变点)的带隙范围。在 77K 温度下, (PbSn) Te 的零带隙出现在 Sn 含量近似为 40%

的地方。采用接近于零带隙的材料, 已经作成了工作波长为  $34\mu\text{m}$  的 (PbSn) Se 同质结激光器和波长为  $28\mu\text{m}$  的 (PbSe) Te 同质结器件。这些结果是在 12K 温度下得到的<sup>[18]</sup>。

使用三元系的组分变化来获得良好的外延层的方法, 已经用 Pb(SSe), (PbSn) Se<sup>[36]</sup>, 和 (PbSn) Te 系统<sup>[37~39]</sup> 作成了异质结构激光器。这些系统不是晶格匹配的。失配的影响虽然可能不象宽带隙材料那样有害, 因为缺陷状态不可能处在带隙内部的同一个范围, 但是这种影响尚不完全清楚。至今, 还没有 Pb 盐工作在低温范围以上的激光器, 在异质结构激光器的情况下, 已经报导的用 (PbSn) Se 制作的、波长为  $8.6\mu\text{m}$ <sup>[36]</sup> 的器件工作在 100K, 而用 (PbSn) Te 材料的为 114K<sup>[40]</sup>。

为什么长波长 Pb 盐激光器要如此大量冷却的理由还不明白。至少包含两个因素。首先存在自由载流子的光吸收, 它近似随波长的平方而增加。其次, 由 Auger 相互作用<sup>[95]</sup> 引起载流子的非辐射复合。在此过程中, 注入载流子复合能量的耗散变成剩余的自由载流子热能的升高。出现上述过程的几率随着半导体带隙的减小而增大。因为自由载流子的浓度较高, 在高温下这两个作用变得更为重要。它们会趋使阈值时的载流子浓度上升至较高的平均水平。发生的上述反馈过程会产生一个最高温度限, 超出此限就不可能出现激射。然而, 还没有作出定量分析来确定这种解释能否很好地应用于实际观察

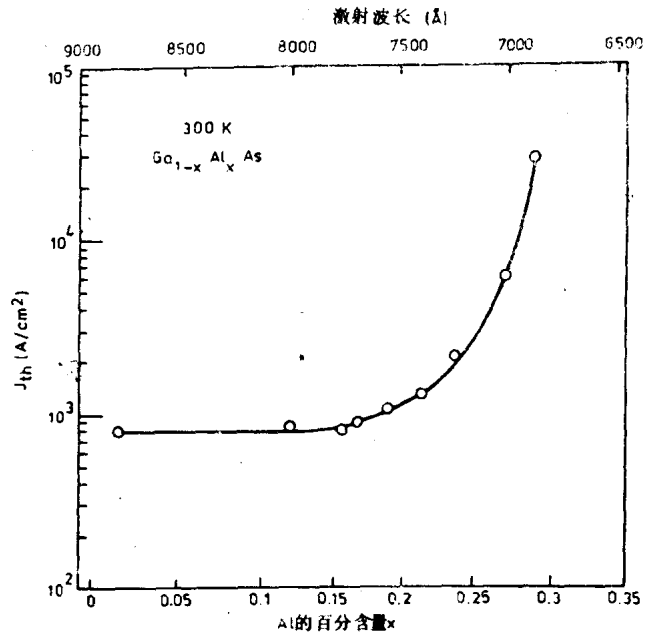


图 1.4 宽接触双异质结  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  激光器的室温阈值电流密度随组分  $x$  变化的函数关系。还表示了激光波长。 $\text{Ga}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{As}$  无源层的 Zn 和 Te 掺杂浓度分别为  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  和  $1\sim 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。引自 Kressol 和 Hawrylo 的文章<sup>[34]</sup>