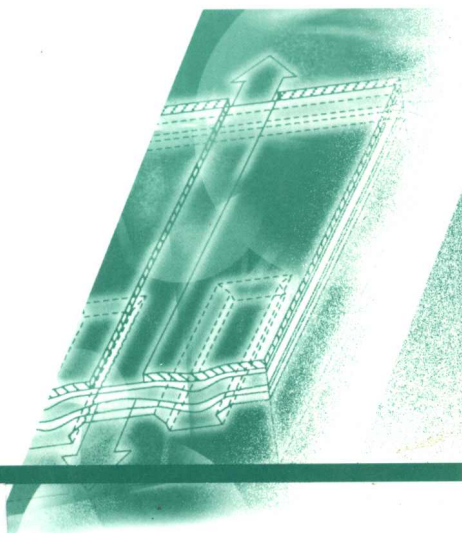


BANDAOTI
JIGUANGQIJIANWULI

半导体 激光器件物理

● 杜国同



吉林大学
出版社

217

7/23/2017

半导体激光器件物理

杜国同



A1025951

吉林大学出版社

内容提要

本书是吉林大学微电子学与固体电子学、物理电子学等专业的硕士研究生教材，共分九章。

第一章介绍半导体激光器的一般特性。第二、三、四章讨论了半导体异质结、半导体中光子和电子的相互作用、简单三层平板波导。第五、六章讨论了半导体激光器侧向模式的稳定性、侧向模式分布及选择性，并介绍了作者本人提出的波导互补复合腔激光器。第七章对纵模控制进行了论述。第八章讨论瞬态特性。第九章介绍了量子阱激光器，大功率半导体激光器及其阵列、超辐射发光管、半导体光放大器、宽带半导体激光器、有机电致发光器件、光子晶体等最新研究进展。

本书可作为半导体光电子学研究方向的研究生教材，亦可供从事半导体激光器方面科学研究、生产的工程技术人员和有关专业的教师、研究生和大学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

半导体激光器件物理/杜国同编著. —长春: 吉林大学出版社, 2002.5

ISBN 7-5601-2648-0

I.半... II.杜... III.半导体激光器—研究生—教材 IV.TN248.4
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 031317 号

半导体激光器件物理

主编 杜国同

责任编辑、责任校对: 唐万新

封面设计: 孙 群

吉林大学出版社出版
(长春市解放大路 125 号)

吉林大学出版社发行
长春市永昌福利印刷厂印刷

开本: 787 × 1092 毫米 1/16
印张: 20.375
字数: 445 千字

2002 年 5 月第 1 版
2002 年 5 月第 1 次印刷
印数: 1-1 000 册

ISBN 7-5601-2648-0/TN·10

定价: 29.50 元

序

21 世纪人类迈入了一个高度信息化的社会，社会对信息量的需求呈爆炸式增长，光子已成为信息的重要载体。半导体光电器件，特别是半导体激光器是一类电流驱动的理想光子源器件。半导体激光器经过 30 年的研究开发已经成为信息领域重要的产业，其应用涉及到光纤通信、光盘存储、激光印刷、传感计测、激光加工与医疗、显示、制导等民用与军事领域，而且仍在不断地发展进步，新的构思、新的材料、新的器件和新的应用不断涌现，仍是世界科学家们研究的热门课题。为了使我们的信息产业能在国际上占有一席之地，使我们在该领域的研究跟上世界先进国家，在相关专业研究生中开设半导体激光器物理这门课程是十分必要的。

杜国同教授是我国自己培养的第一批博士，一直从事半导体光电子学的科研工作，在这一新兴领域，作了大量系统的研究工作，有许多创造性成果。在模式稳定的双异质结激光器，条形半导体激光器电流的侧向分布，可见光半导体激光器，激光器锁相阵列，面发射激光器，超辐射发光管及其集成器件，宽带半导体 ZnO 材料和其它新材料与器件等方面有许多建树。

杜国同教授讲授这门课程多年，几年前我就希望并催促他结合我们的情况编著一本研究生教材，可是他太忙，现在本书总算完稿，我对本书的完稿与出版深感欣慰。本书也是他在多年的教学和科研实践中不断修改完成的。主要介绍了半导体激光器的一般特性，论述了半导体异质结，半导体中光子和电子的相互作用，半导体激光器的模式理论（包括激光器横模的稳定性和选择性、纵模的控制）、瞬态特性等内容。学习完本课程后学生们将会对半导体激光器的器件结构、工作原理和稳态、动态特性有了全面认识 and 了解，对将来从事这方面的研究打下坚实的基础。

本书对半导体激光器的基本理论除了进行一般论述外，杜国同教授还结合自己十几年来创新性的科研成果进行了具体分析讨论，如他提出的波导互补原理和获国家发明奖与发明专利的波导互补复合腔激光器、阶梯衬底内条形激光器、钨丝掩膜质子轰击垂直腔面发射激光器、超辐射发光管与光放大器的单片集成光源等新结构器件进行了介绍和相关的理论分析。这对开发研究生们的思路，提高他们的发明创造能力，培养他们的科研素质大有益处。同时本书作者还结合自己课题组近期的科研工作，对半导体光电器件的最新进展情况作了介绍，如量子阱激光器、大功率半导体激光器及其阵列、超辐射发光管、半导体光放大器及其应用、宽带半导体激光器、有机半导体光电器件、光子晶体等。这是至今相关内容的中文论著中尚少见到的。因此本书对我国从事半导体光电器件研究、开发和生产的工程技术人员也将有重要的学术参考价值。



2001 年 12 月于长春

前 言

本书是为吉林大学微电子学与固体电子学、物理电子学等专业的硕士研究生编写的教材。

全书共分九章。第一章介绍半导体激光器的一般特性，使学生们对半导体激光器的一般结构和特性有一个初步的了解，学习以后章节时不至于感到过于抽象。第二章介绍半导体异质结，从异质结的能带结构讲起，全面介绍了异质结在半导体光电器件中的作用，重点讨论了异质结对载流子的限制作用。第三章讨论半导体中光子和电子的相互作用。主要论述半导体中量子跃迁的特点，光子密度分布与能量分布，跃迁速率与爱因斯坦关系，并由此得出半导体激光器中增益系数与电流密度的关系。第四章论述了光场和波在半导体波导中的传播行为，从电磁的基本方程开始，讨论了简单三层平板波导，对半导体激光器模式问题所需要的理论基础给与了介绍。第五章讨论了半导体激光器侧向模式的稳定性问题。对通常条形双异质结激光器侧向模式的导引机制及不稳定性问题做了讨论，介绍了几种理论分析模型和几种侧向模式稳定性好的半导体激光器结构。第六章论述了半导体激光器的侧向模式分布、控制及选择性。介绍了圆谐分析、远离截止近似、等效折射率近似几种分析突变波导的模型；从电流的侧向分布引起的条形增益导引开始，讨论了缓变波导情况。这一章的最后介绍了作者本人提出的波导互补复合腔激光器。第七章对半导体激光器的纵模控制进行了论述，介绍了几种实现动态单模的方法和器件结构。第八章论述了半导体激光器的瞬态特性。从光电耦合速率方程出发，讨论了半导体激光器的光电延迟、张弛振荡、自脉动、双稳态等特性，最后讨论了高速半导体激光器。第九章结合我们研究组近几年的科研课题介绍了半导体激光器的最新研究进展。主要有量子阱激光器、大功率半导体激光器及其阵列、超辐射发光管、半导体光放大器及其应用、宽带半导体激光器、有机半导体电致发光器件、光子晶体。

本书是多年来在吉林大学讲授“半导体器件物理Ⅱ（主要是半导体激光器器件物理）”课程的基础上结合自己的科研工作整理编写的。因此本书除了总结前人在半导体激光器方面的试验研究和理论研究成果外，还写入了我们自己的一些研究成果。如对获国家发明奖和发明专利的波导互补复合腔激光器、阶梯衬底内条形激光器、钨丝掩膜质子轰击垂直腔面发射激光器等新结构器件进行了介绍和相关的理论分析。

本书的编著首先要感谢我的导师高鼎三院士，是高鼎三老师首先在我们这几届研究生中讲授了“半导体激光器”这门课程，打下了本书的基础，也是高老师多次鼓励和催促我编写本书。还要感谢在中国电子学会半导体集成技术学会主办的第一届全国半导体光电子学讲习班授课的王启明院士、郭长志、杜宝勋等老师，我作为一个学员在这次讲习班上受益匪浅，本书也有部分内容取材于这次讲习班的教材。第七章第4节分布反馈激光器的原稿由清华大学罗毅教授提供，改写后他们又作了审核，在此表示感谢。还要感谢我的研究生们，部分章节由他们提供了原稿，第七章的垂直腔面发射激光器一节由李雪梅供稿，第九章的量子阱激光器一节由殷景志供稿，超辐射发光管一节由刘扬供稿，半导体光放大器及其应用一节由许呈栋供稿，宽带半导体激光器一节由王新强供稿，有机半导体电致发光器件一节由康博南供

稿，光子晶体一节由宋俊峰供稿，他们还作了大量的画图、校稿工作；参与这些工作的还有刘大力副教授、闫伟、柳丹、马燕、殷宗友、王海嵩、崔宏峰、常玉春、王金忠、侯小珂、张源涛、杨天鹏等。

由于本人水平有限，加之科研、教学、行政任务繁重，新的研究生们又急需教材，时间仓促，急就而成，错误和不当之处在所难免，诚望各位专家、同行、广大读者提出宝贵意见。

作 者

2001年12月于长春

目 录

绪论	(1)
第一章 半导体激光器的一般特性	(5)
§ 1.1 早期研制的通常条形双异质结激光器结构	(5)
§ 1.2 半导体激光器的 $I \sim V$ 特性和 $P \sim I$ 特性	(7)
§ 1.3 半导体激光器的效率	(13)
§ 1.4 半导体激光器的光学特性	(15)
§ 1.5 半导体激光器的热学特性	(20)
§ 1.6 半导体激光器的电导数参数特性	(22)
第二章 半导体异质结	(24)
§ 2.1 引言	(24)
§ 2.2 带隙与带隙宽度	(26)
§ 2.3 半导体材料的折射率	(31)
§ 2.4 载流子在半导体能带中的分布	(36)
§ 2.5 异质结的能带结构与特性	(40)
§ 2.6 异质结对载流子的限制	(47)
第三章 半导体中的量子跃迁	(56)
§ 3.1 引言	(56)
§ 3.2 光子密度分布与能量分布	(57)
§ 3.3 跃迁几率	(59)
§ 3.4 跃迁速率与爱因斯坦关系	(67)
§ 3.5 半导体的载流子复合	(73)
§ 3.6 增益系数与电流密度的关系	(82)
第四章 光场和波在半导体波导中的传播	(90)
§ 4.1 电磁过程的基本分析	(90)
§ 4.2 光在波导中的传播	(95)
§ 4.3 三层平板波导	(97)
§ 4.4 三层平板波导本征方程和模式截止条件	(103)
第五章 半导体激光器侧向模式的稳定性问题	(107)
§ 5.1 通常条形双异质结激光器侧向模式的导引机制及不稳定性问题	(107)
§ 5.2 侧向模式稳定性的理论研究	(111)
§ 5.3 几种折射率导引激光器结构	(115)
第六章 半导体激光器侧向模式的选择性	(120)
§ 6.1 突变波导	(120)
§ 6.2 缓变波导	(136)

§ 6.3	复合腔波导互补激光器	(158)
第七章	纵模的控制	(168)
§ 7.1	半导体激光器的频谱结构	(168)
§ 7.2	短腔激光器	(170)
§ 7.3	垂直腔面发射激光器	(172)
§ 7.4	分布反馈式半导体激光器	(185)
§ 7.5	耦合腔与复合腔激光器	(202)
第八章	半导体激光器的瞬态特性	(210)
§ 8.1	瞬态特性的一些物理现象	(210)
§ 8.2	速率方程的建立	(211)
§ 8.3	速率方程的稳态解	(212)
§ 8.4	电光延迟	(215)
§ 8.5	张弛振荡	(218)
§ 8.6	自脉动	(223)
§ 8.7	在双区共腔激光器中的双稳态	(229)
§ 8.8	高速半导体激光器	(232)
第九章	半导体激光器件的最新进展	(234)
§ 9.1	量子阱激光器	(234)
§ 9.2	大功率半导体激光器及其阵列	(245)
§ 9.3	超辐射发光管	(258)
§ 9.4	半导体光放大器及其应用	(269)
§ 9.5	宽带半导体激光器	(283)
§ 9.6	有机半导体电致发光器件	(293)
§ 9.7	光子晶体	(306)
参考文献	(313)

绪 论

半导体激光器是 20 世纪 60 年代发展起来的一项高科技成果.本课程将对这一领域所涉及的半导体激光器的一般特性、半导体中的受激发射、异质结、半导体激光器模式的稳定性、半导体激光器模式的选择性、半导体激光器的瞬态特性以及半导体激光器的最新发展动态等内容做一些介绍,希望研究生通过这一课程的学习,对半导体激光器的特性、器件结构、工作原理、器件的发展状况有一个清楚的了解,为今后参与这一领域的研究打下坚实的基础.为了使读者对半导体激光器有更深刻的认识以及掌握它和其它种类激光器的区别,有必要先简单讲一下什么是激光和激光器的一般工作原理,同时回顾一下半导体激光器的发展历史.

一、激光和激光器的一般工作原理

1. 光的发射与吸收

原子或分子都具有能量,但这些能量只能取分立数值,能量最低的状态称为基态,能量比基态高的状态称为激发态.当原子或分子从能量高的状态向能量低的状态跃迁时,则发射光子,反之从能量低的状态向能量高的状态跃迁时,则吸收光子.所发射和吸收的光子能量等于两种状态的能量级差.即

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

吸收光子的过程也叫受激吸收.

而光的发射有两种,一种是自发发射,另一种是受激发射.自发发射是激发态自发的偶然发生的跃迁,发射是无规则的.受激发射是指处于激发态的原子或分子,受到 $h\nu = E_2 - E_1$ 的入射光子的微扰作用,发射出跟入射光同方向、同频率、同相位和同偏振特性的光.图 0-1(a), (b), (c) 示出与光有关的三种量子跃迁.

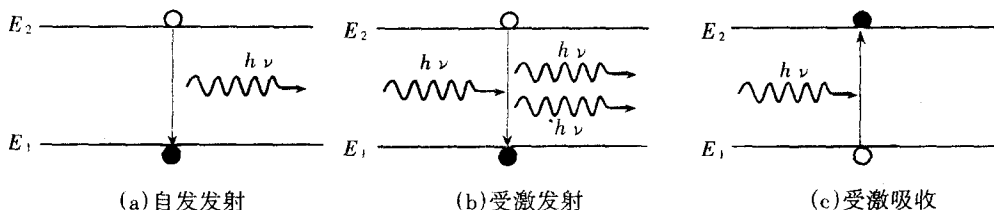


图 0-1 与光有关的量子跃迁

2. 粒子数反转与光抽运

在普通的热平衡状态下,处于高能态 E_2 的原子数比处于低能态 E_1 的原子数少得多,吸收比发射更易发生.与此相反,若处于 E_2 态的原子数比处于 E_1 态的原子数多,这时发射比吸收更易发生,这种状态称为粒子数反转.

为了实现粒子数反转,必须从外界供给原子或分子能量,使低能态 E_1 的粒子跃迁到高能态,这种供给能量的过程叫做光抽运或者叫泵浦.气体激光器是通过外加高压使气体放电进行光抽运的,如红宝石激光器是以氙灯闪光照射红宝石进行光抽运,半导体激光器是通过载流子

的注入实现的,是电子-光子的直接转换器.

3. 激光振荡与激光器

处于粒子数反转状态的激光工作物质,一旦发生受激发射,在同一方向上,就会有同振荡频率、同相位及同偏振特性的光波发生连锁反应,使规则整齐的光波得到放大.如果此时在激光工作物质的两端装上反射镜,光就会在反射镜之间多次来回反射,光通过激光工作物质时,会引起受激发射而被放大,光在反射镜间的多次来回反射,就会被多次放大.当增益超过损耗时,就发生激光振荡.若事先使一端反射镜稍微透光,则放大后的一部分激光就能输出到腔外,这种能获得激光的装置叫激光器.典型的固体红宝石激光器结构如图 0-2 所示.

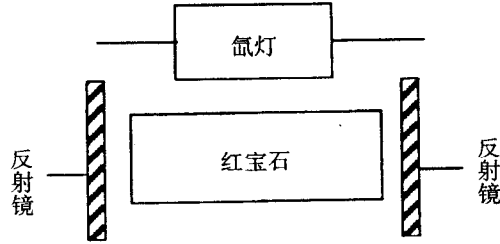


图 0-2 红宝石激光器示意图

如图 0-2 所示,可以看出构成激光器有三大要素.一是工作物质,在红宝石激光器中的红宝石就是粒子数反转的工作物质,可以产生受激发射,对光起到放大即增益作用.二是泵浦源,在红宝石激光器中氙灯就是泵浦源,它供给工作物质能量,进行光抽运,使工作物质粒子数反转.三是谐振腔,由两个反射镜构成,它的作用有两个:第一使光来回反射,这样光和工作物质的作用时间和作用光程加长了,使光来回反复被放大;第二是可以有选频作用,因为不是所有频率的光都能来回反射的,只有满足驻波条件的光才能来回反射.

4. 激光的特性

(1) 相位一致

相位一致也称为相干.在反射镜之间所形成的驻波,由于受激发射,相位一致的光受到放大,因此,输出光也是相干光.相干性也称为可干涉性,激光是干涉性好的光.因此,从前难以做到的各种干涉和衍射实验,现在采用激光就易于实现了.

(2) 方向性好

因为仅在光轴方向往返的光才被放大,所以,能够得到沿光轴方向直线传播的、发射角很小的光束,这就可以使利用光的直线传播性质作几何光学实验变得简单.但是,由于激光束口径有一定大小,衍射效应会使得光束稍微发散.

(3) 单色性好

因为仅仅是由两个能级间之能量差所决定的波长的光才被放大,而且只有在两个反射镜之间形成驻波的光才能振荡,所以,用激光器能够得到单一波长的光.由于能够用这种单一波长的光源进行干涉实验和偏振光实验,从而提高了测量精度.

(4) 强度高,能流密

能流密度是指光源在单位面积、单位立体角内发射的能量.由于激光的方向性好,发射光的立体角极小,所以能流密度高.

二、半导体激光器的发展历史

1960年前后,各种激光器[固体、气体、液体(颜料)]的研究工作进展很快,这时在电子技术领域 p-n 结的器件进展也相当快.1958年~1961年 Basiv 等人就先后提出了半导体 p-n 结处注入载流子的复合可能引起受激发射,同年之后不久,Bernard 和 Duraffourg 推导出在半导体中受激发射的必要条件.当然这前后也有人曾一度怀疑过制成半导体激光器的可能性.1962年 Hall、Nathan 等人在 n 型 GaAs 中扩散 Zn 形成 p-n 结,两端垂直抛制成反射镜面构成谐振腔,在 77 K 脉冲电流工作下观察到了相干光发射,这种激光器被称之为同质结激光器.后来两端面用自然解理面构成反射镜,代替抛光工艺.最先提出并实验用自然解理的方法做平面反射镜的是 Holonyak,但所用的材料晶向方向不对,很难解理.最先报道制成端面是解理面的注入型半导体激光器的是 Bond,1963年2月他发表的结构如图 0-3(a).

在证明了 GaAs 同质结结构激光器中的 p-n 结可以受激发射之后,紧接着其它材料的 p-n 结受激发射也相继报道,有 InAs、InP、 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ 等.但是同质结注入型激光器有一个共同的致命弱点,即室温受激发射的阈值电流密度特别高,通常大于 $50\,000\text{ A/cm}^2$.绝大多数研究工作是在液氮温度(77 K)或更低的温度下进行的,所用的工作电流几乎全是在窄脉冲($\leq 1\ \mu\text{s}$)和低占空比($< 0.1\%$)的条件下.虽然 Dymant 和 Asaro D 在 1967 年利用良好的热沉实现了温度高达 205 K 的连续工作,但室温连续工作是没有希望的.

为了降低阈值电流密度,实现室温连续工作,1963年 Kroemor 建议,把一个窄带隙半导体夹在两个宽带隙半导体之间,这两种不同半导体的结称为异质结.利用这种异质结结构,可以使注入式激光器得到改进,其中复合区域称为有源区,被禁带宽度较宽的区域(叫限制层)所限制.这样的异质结结构由于价带和导带有势垒台阶存在,可以使载流子限制在薄的有源区域内;同时由于又有折射率差存在,可以使光产生全反射,使光也限制在薄的有源区域内.从而大大提高发光效率,降低阈值电流密度. Alferov 和 Kazarinov 1963 年也提出相同的建议,但他们的建议实际上从未发表(是私人通信中提到的).当时,他们提出的材料是 GaAs-Ge 和 $\text{GaAs-GaAs}_x\text{P}_{1-x}$,由于晶格匹配不好,生长出来的异质结晶体质量很差.

1967年6月美国国际商业机器公司的 Woodall 和他的同事报道了用液相外延(LPE)技术在 GaAs 上生长了宽带系的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层,两者的晶格失配相当小,就在那时(1967~1969) Hayashi 和 Panish 等人开始了单异质结(SH)激光器的研制工作,首先制得了单异质结激光器,阈值电流密度降到 $8\,600\text{ A/cm}^2$,结构如图 0-3(b).之后他们又研究了如图 0-3(c)所示的双异质结(DH)激光器.1970年初他们又把 300 K 的阈值电流密度降低至 $2.3 \times 10^3\text{ A/cm}^2$,接着 1970年春又把 300 K 的阈值电流密度降至 1600 A/cm^2 ,并在利用热沉的情况下实现了温度高达 311 K 的连续受激发射.1970年在美国西雅图和华盛顿的器件研究会上, Hayashi 首次公开介绍了这项研究工作,6月初写出报道文章投到 Appl. Phys. Lett., 8月1日刊登, Hayashi 和 Panishi 以为他们取得了第一.然而 1970年9月苏联出版的《半导体物理与科技》刊登了 Alferov 和他的同事的文章,文章是5月写的,他在这篇文章中声称他们研制的 DH 激光器实现了室温连续受激发射.

双异质结构的研制成功,使得半导体激光器中光和电流在垂直 p-n 结的横向方向得到了很好的限制.为了进一步降低阈值,提高器件寿命,人们又开始在平行 p-n 的侧向方向上想办法.改进器件结构,设计和研制了许多种条形结构激光器,这样开始了半导体激光器大发展的时代.早期(20世纪70年代)研制的器件结构多数是如何在激光器侧向方向限制电流上打主意,有源层是平的无折射率变化的.如质子轰击条形、氧化物条形、山字台形、平面条形、衬底内

条形等等.当然,当时也有侧向有折射率变化的结构,如掩埋条形、横向结条形.条形激光器结构的研制进一步大大降低了器件阈值(已达几十毫安量级),从而大大提高了器件寿命,达 10^5 h 以上,器件开始实用化.这就是半导体激光器发展过程中解决的第一个大问题.

半导体激光器在实际应用中,特别是在光纤通讯实验中遇到的第二个问题是侧向模式的不稳定问题,即包括光功率曲线的非线性输出问题.由于这个问题的出现,人们又研制出了许多侧向具有波导结构的双异质结激光器.如沟道衬底条形(CS)、梯形衬底条形(TS)、压缩形(CDH)等器件结构.光通讯速率的不断提高,对半导体激光器的纵模特性又提出了要求,于是又发展了动态单模半导体激光器.随着应用范围的不断扩展开拓,半导体激光器研究工作也在不断深入和扩展,如微腔、量子阱激光器,大功率激光器阵列,中红外、蓝紫光半导体激光器,半导体激光器与其它器件的单片集成等等.

总之,半导体光电器件特别是半导体激光器经过几十年的研究开发已经成为信息领域重要的产业,而且仍在不断地发展进步,仍是世界科学家们研究的热门课题.

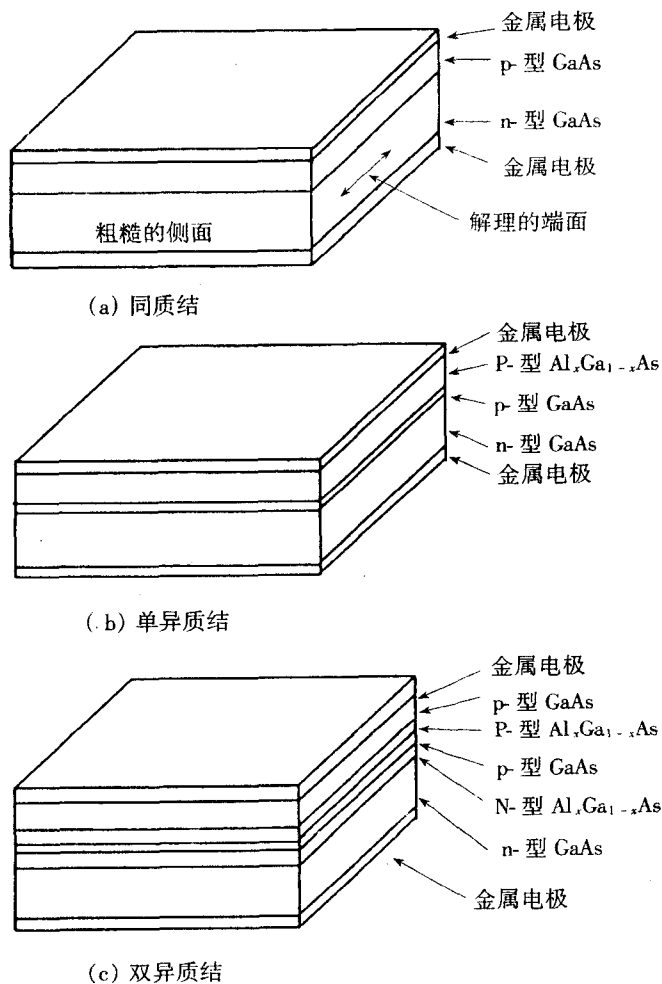


图 0-3 几种最早的激光器结构

第一章 半导体激光器的一般特性

为了使读者对半导体激光器有一个初步的了解,在学习以后章节时不至于感到过于抽象,我们首先介绍一下半导体激光器的一般结构和一般特性.

§ 1.1 早期研制的通常条形双异质结激光器结构

1. 氧化物隔离条形

氧化物隔离条形(OS)^[1]这种结构的激光器是采用氧化物隔离的方法,使电流只通过较窄的电极条流向 p-n 结,对电流进行了侧向限制,器件结构如图 1.1-1 所示.工艺过程大体为:在 n-GaAs 衬底上依次外延生长上 N-Al_xGa_{1-x}As 下限制层, n 或 p-GaAs 有源层, P-Al_xGa_{1-x}As 上限制层, p⁺-GaAs 盖层.然后在外延片上淀积 Si₃N₄ 或 SiO₂ 电流隔离层,再光刻出条形窗口以形成电流通路,蒸镀金属上电极,减薄,再蒸镀金属下电极,合金,解理,组装,测试.

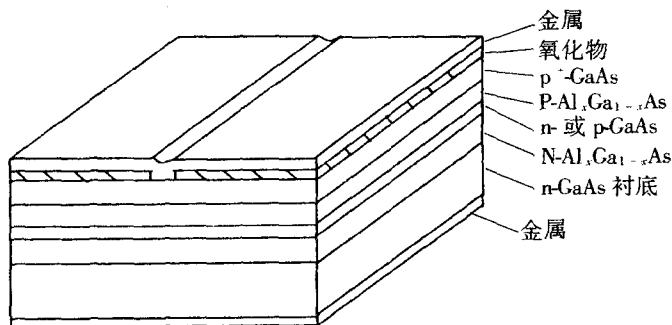


图 1.1-1 氧化物隔离条形(OS)激光器结构示意图

2. 质子轰击条形^[2]

当半导体受质子等高能粒子轰击照射时,由于耗损能量而产生晶格缺陷.这些损伤区可以具有很高的电阻率.用这种质子轰击隔离技术可以制成条形半导体激光器.器件的制作过程大体如下,外延生长如上述氧化物隔离条形一样的四层双异质结构,采用钨丝掩蔽或用蒸发的条形金属掩蔽进行质子轰击,如图 1.1-2 所示.质子轰击使条形以外的区域形成高阻,从而限制电流侧向流动,金属上电极可以在轰击前对整个外延片表面蒸镀制得.

除了质子(H⁺)可以进行轰击形成高阻区外,也可以用氧离子注入,用氮离子等轰击都可以形成高阻区,但是这些离子都比 H⁺ 重,轰击同样深度需要的能量大许多.

3. 山字台形激光器^[3]

也可以用台面条形结构来减少注入电流的截面对电流进行限制.为了焊接热沉方便并提供机械支持,往往在注入电流的台面两侧再制成两个电绝缘的台面,从而形成一个山字,故这种结构叫山字台形;如图 1.1-3 所示.

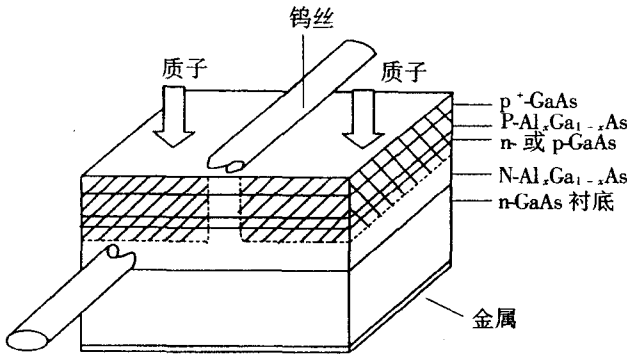


图 1.1-2 用质子轰击制作条形 DH 激光器

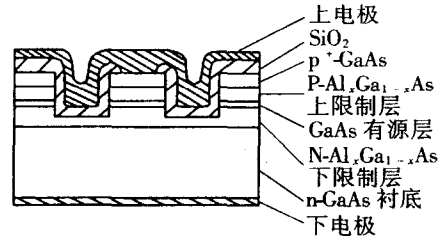
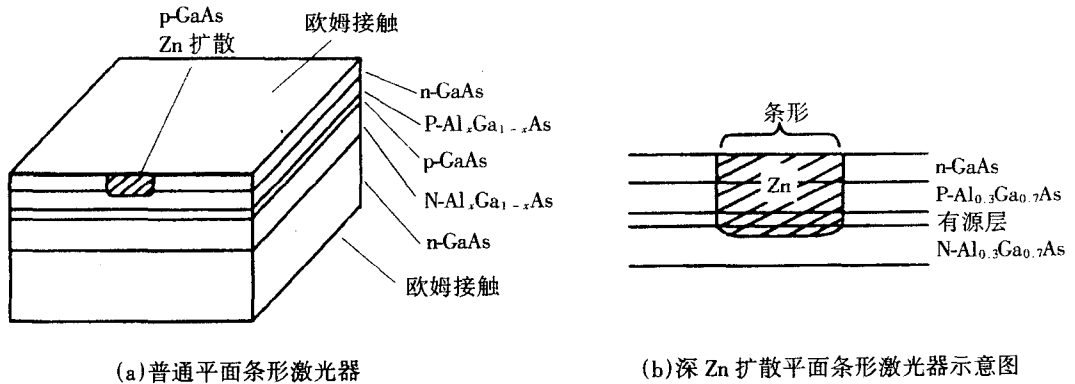


图 1.1-3 山字台形激光器结构示意图

4. 平面条形激光器

平面条形激光器(PS)^[4]结构如图 1.1-4(a)所示.这种结构的外延层和氧化物隔离条形结构不同的是,氧化物隔离条形外延片最外面的盖层是 p^+ -GaAs,而平面条形结构的盖层是 n -GaAs.这样 n 型 GaAs 盖层和 P 型 $Al_xGa_{1-x}As$ 上限制层形成一个反向 $P-n$ 结,从而阻止和隔离了电流的注入.为了形成条形电流通路,用 SiO_2 或 Si_3N_4 做掩膜光刻出窗口进行 Zn 扩散, Zn 扩散达到 $P-Al_xGa_{1-x}As$ 上限制层深度, Zn 扩散使 n -GaAs 转变成 p 型.去除 SiO_2 (或 Si_3N_4)掩膜,在表面蒸发上金属形成上电极,扩 Zn 区以外的区域由于反型结的存在限制了电流的注入,电流只能流过扩 Zn 条区.

进一步的发展,Yonezu H 等人把 Zn 扩散进入有源层内或 $N-Al_xGa_{1-x}As$ 下限制层内,如图 1.1-4(b)所示,使得有源层的侧向掺杂浓度不同,从而观察到输出功率线性有所改善,以后还要讲到,这种结构称深 Zn 扩散平面条形.



(a)普通平面条形激光器

(b)深 Zn 扩散平面条形激光器示意图

图 1.1-4 平面条形激光器结构示意图

5. 异质结隔离条形激光器

异质结隔离条形激光器^[4]结构如图 1.1-5 所示,比氧化物隔离条形结构多外延生长一层 $N-Al_xGa_{1-x}As$ 电流隔离层.将电流注入条形区的 $N-Al_xGa_{1-x}As$ 电流隔离层光刻腐蚀去掉,再蒸镀上电极.

6. 衬底内条形激光器

衬底内条形激光器^[6]结构如图 1.1-6 所示.在 n -GaAs 衬底上用条形 Si_3N_4 掩膜扩 Zn ,在条形区以外形成 p 型区,去除 Si_3N_4 掩膜后再外延生长和氧化物隔离条形一样的异质外延层.反

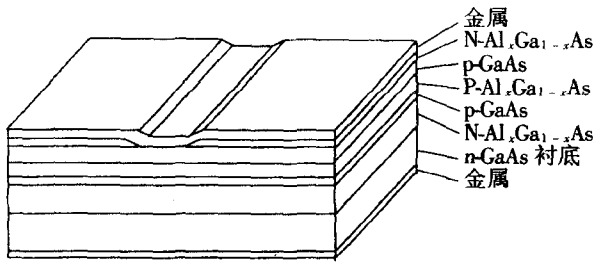


图 1.1-5 异质结隔离条形激光器结构示意图

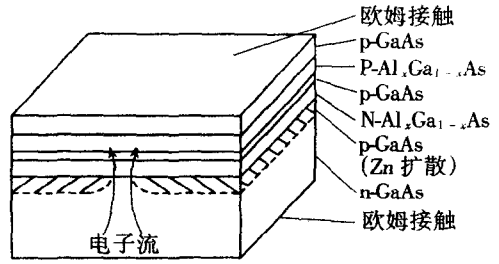


图 1.1-6 衬底内条形激光器示意图

向 p-n 结的存在使电流被限制在没有扩 Zn 的条形区通过。

7. 掩埋异质结结构激光器

掩埋异质结结构(BH)激光器^[7]的有源层完全被 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 包围,如图 1.1-7 所示.这种器件结构需要两次液相外延.工艺过程大体如下:第一次液相外延生长出和氧化物隔离条形一样的四层双异质结结构,接着是腐蚀台面,由于 $x > 0.05$ 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 暴露在空气后就很难在其表面上实现液相外延,所以台面要腐蚀到 n-GaAs 衬底,然后进行第二次液相外延生长 N- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 包围层.腐蚀台面露出的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层的侧面上可以实现液相外延生长.二次外延生长好后,淀积 SiO_2 膜,光刻腐蚀出电极窗口,蒸镀上电极,减薄,蒸镀下电极,合金,解理,组装.

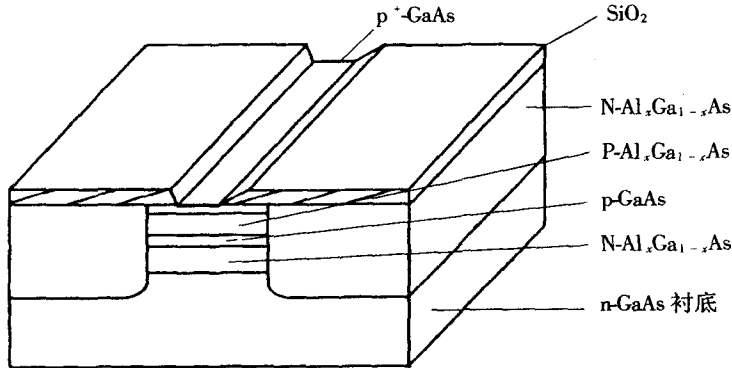


图 1.1-7 掩埋异质结结构激光器示意图

条形结构的研制进一步降低了器件阈值(达几十毫安),提高了器件寿命达 10^5 h 以上,器件开始实用化.

§ 1.2 半导体激光器的 $I \sim V$ 特性和 $P \sim I$ 特性

一、半导体激光器的 $I \sim V$ 特性(电学参数)

半导体激光器虽然有各种各样的结构,但都是由 p-n 结构成的二极管,所以有时也叫激光二极管.因此半导体激光器的 $I \sim V$ 特性就是一个典型二极管的 $I \sim V$ 特性,如图 1.2-1 所示.其中 V_f 叫正向导通电压, V_R 叫反向击穿电压.正向导通电压和材料的禁带宽度有关,典型的

GaAs-Al_xGa_{1-x}As DH 激光器正向导通电压(电流为 1 mA 时)为 1.1 ~ 1.2 V, 激射波长为 1.3 μm 和 1.55 μm 的 InGaAsP-InP DH 激光器 V_f 为 0.8 ~ 0.6 V 左右. 如果在给定电压下正向电流明显超过这个值, 则说明器件中有多余的电流通道, 即所谓的漏电流, 因而会有较高的阈值电流. 反向击穿电压 V_R 与杂质浓度有关, 对于 GaAs-Al_xGa_{1-x}As DH 激光器一般大于 6 V. 如果 V_R 小于这个值或反向成软击穿特性, 说明反向有漏电流. 从器件 $I \sim V$ 曲线可以估算出激光器串联电阻的大小, 如图 1.2-1 中取 V_1 、 V_2 两点 and 所对应的电流 I_1 、 I_2 , 则器件的串联电阻

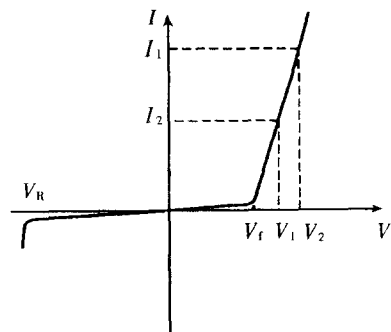


图 1.2-1 半导体激光器的 $I \sim V$ 特性曲线

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad (1.2-1)$$

二、半导体激光器的输出功率与电流的关系

典型的半导体激光器输出功率与电流关系(光~电参数)的特性曲线($P \sim I$ 特性曲线)如图 1.2-2 所示. 当激光器正向偏置有注入电流时就有光输出, 一开始输出光功率随着注入电流的增加而线性增加, 但发光效率很低, 即曲线的斜率很小, 如图 1.2-2 中 $P \sim I$ 曲线的 OA 段, 这一阶段是自发辐射发光阶段. 注入电流增加到一定值后, 发光效率开始增加, $P \sim I$ 曲线开始弯曲, 表明受激辐射发光开始起作用并逐渐加大比重, 如图 1.2-2 中 $P \sim I$ 曲线的

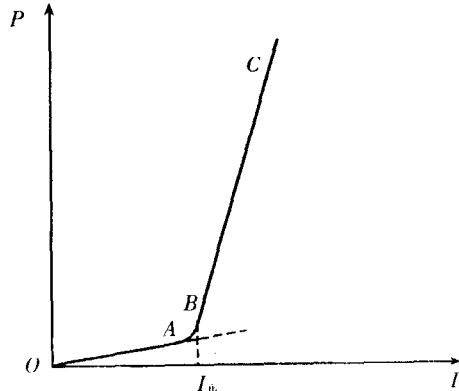


图 1.2-2 半导体激光器输出功率与电流关系曲线

AB 段, 这一阶段的发光现象人们称为超辐射发光. 当注入电流进一步增加, 即粒子数反转达到光子在腔内所得到的增益与受到的损耗相等时, 光子才能获得净增益并在腔内振荡激射, 此后, 光输出功率随电流陡峻上升, 如图 1.2-2 中 $P \sim I$ 曲线 BC 段. 我们将光子在谐振腔内振荡开始出现和增益所必须满足的条件称为阈值条件, 这时所对应的一些参数(如增益, 注入电流等)被称为阈值. 阈值电流用 I_{th} 表示, 阈值电流密度用 J_{th} 表示, 阈值增益用 g_{th} 表示.

三、阈值特性

1. 阈值增益条件

考虑一个半导体激光器的谐振腔, 两端面的功率反射系数分别为 R_1 、 R_2 , 腔长为 L . 光强为 I_0 的光从端面 A 附近的 a 点出发射向端面 B, 到 B 端后反射回来, 再到达端面 A 反射后回到 a 点, 如图 1.2-3 所示.

考虑这样一个往返路途光强的变化, 当光由 a 点到 B 时光强受到的放大(增益)为 e^{gL} , 受到的损耗为 $e^{-\alpha L}$. 光由端面 B 反射回来到达 A 端面, 再反射回来到达 a 点, 光强的变化为:

$$I_1 = I_0 R_1 R_2 e^{2(g-\alpha)L} \quad (1.2-2)$$

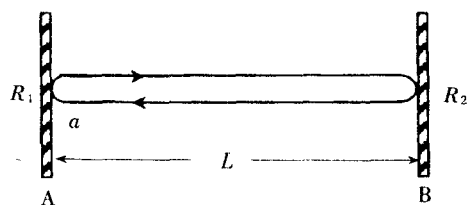


图 1.2-3 光子在谐振腔内增益振荡示意图

光维持稳定振荡的条件是,光子在腔内往返一周回到起始位置时光强应保持不变,即

$$I_1 = I_0$$

此时 $g = g_{th}$,故可得:

$$R_1 R_2 e^{2(g_{th} - \alpha_i)L} = 1$$

取对数

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (1.2-3)$$

令 $R_1 = R_2 = R$, 则

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad (1.2-4)$$

(1.2-3)和(1.2-4)两式子就是我们常用的阈值增益条件.

2. 阈值电流密度与有源区厚度的关系

有源区厚度对阈值电流密度的影响主要是由于有源区厚度不同对载流子浓度的影响和在垂直结平面方向上对光场限制的能力不同. 根据一定的理论分析(下两章会讲到)和实验观察,在一定的条件下我们可以认为增益和名义电流密度(有源区厚度为 $1 \mu\text{m}$ 时的电流密度)成线性关系,即

$$g = A(J_n - J_t) \quad (1.2-5)$$

J_t 为增益开始为正值时的电流密度,称截距电流密度. 对于有源区厚度不为 $1 \mu\text{m}$ 的普遍情况,有

$$\left. \begin{aligned} J_n &= \frac{J}{d} \\ J_{nth} &= \frac{J_{th}}{d} \end{aligned} \right\} \quad (1.2-6)$$

其中 d 为有源区厚度,把(1.2-6)式代入(1.2-4)式得

$$\begin{aligned} g_{th} &= \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} = A \left(\frac{J_{th}}{d} - J_t \right) \\ \frac{J_{th}}{d} &= J_t + \frac{1}{A} \left(\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) \\ J_{th} &= J_t d + \frac{d}{A} \left(\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) \end{aligned} \quad (1.2-7)$$

再考虑到内量子效率 η_i 和限制因子 Γ , 可写为

$$J_{th} = \frac{d}{\eta_i} \left[J_t + \frac{1}{\Gamma A} \left(\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) \right] \quad (1.2-8)$$

代入相应的数据,则可以将 GaAlAs/GaAs 双异质结激光器室温下的阈值电流密度表示为