

光泵浦垂直外腔 面发射半导体激光技术

Optically Pumped Vertical-external-cavity
Surface Emitting Semiconductor Laser Technology

王菲 王晓华 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光泵浦垂直外腔 面发射半导体激光技术

王菲 王晓华 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器是一种新型的半导体激光器,它兼有常规电泵浦边发射和面发射半导体激光器的优点,具有输出功率高、光束质量好、转换效率高、光谱调谐范围宽、输出波长覆盖紫外到中红外波段等突出优势,已经成为当今国际研究的热点之一。本书针对光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的设计理论、制备工艺及输出特性展开了详尽阐释,内容包括半导体激光泵浦源技术、半导体增益介质的设计与制备、半导体增益介质外延片的后工艺处理、光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的热管理、激光器的理论模拟与输出特性及其腔内倍频技术等。

本书可供半导体物理、半导体工艺、激光技术等专业的研究人员和工程技术人员参考,也可以作为相关专业高年级本科生与研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光泵浦垂直外腔面发射半导体激光技术/王菲,王晓华

著. —北京:国防工业出版社,2016. 1

ISBN 978-7-118-10690-9

I. ①光… II. ①王… ②王… III. ①光泵浦-面发射-半导体-激光技术 IV. ①TN245

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 010208 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12 字数 228 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

PREFACE | 前言

自 1960 年美国休斯实验室梅曼等人报道了世界上第一台激光器以来,各种类型的激光器相继诞生,激光器的发展速度已经远远超越了与其原理相同的微波激射器,其在生产和生活中的应用极大地促进了人类的社会进步。基于激光器对促进人类文明发展的影响,目前,国际上已经将一个国家或地区对激光技术的应用程度作为衡量其工业技术先进性的重要标志之一。

1962 年美国 HALL 等多个研究小组同时报道了在半导体材料 GaAs pn 结上施加偏置电压获得了激光输出,这标志着半导体激光器的诞生,由于运转条件苛刻,很难在实际中得到应用。1970 年美国贝尔实验室 M. B. Panish 研究小组研制成功能够在室温下连续运转的双异质结结构半导体激光器,这一标志性的研究成果为半导体激光器向实际应用方面的发展奠定了基础,让人们看到了半导体激光器走向实际应用希望。随着异质结激光器的研究发展,在 1978 年出现了世界上第一支半导体量子阱激光器(Quantum Well Laser, QWL),这种激光器大幅度地提高了半导体激光器的各种性能。

如何将高输出功率、高转换效率和高光束质量等诸多优点集于同一种半导体激光器已经成为研究人员夜以继日奋斗的目标,一种新型的半导体激光器——利用光泵浦半导体增益介质的激光器引起了研究人员的注意。直至 1997 年美国 Micracor 公司的 KUZNETSOV M 等人首次报道了利用商用 808nm 半导体激光器泵浦多量子阱结构增益介质获得 0.69W 圆对称光场分布的激光输出,使得光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器获得圆对称的光束轮廓分布成为现实,这标志着真正意义的光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器(Optically pumped vertical-external-cavity surface emitting semiconductor Lasers, OPS-VESELs)的诞生,并掀起了研究的高潮。光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器是一种新型的半导体激光器,它兼有常规电泵浦边发射和面发射半导体激光器的优点,具有输出功率高、光束质量好、转换效率高、光谱调谐范围宽、输出波长覆盖紫外到中红外波段等突出优势,已经成为当前国际研究的热点之一。

全书共分为七章内容:第 1 章概述了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的研究意义、发展历程和研究现状,简介了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的基本原理,从结构和材料体系角度对光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器进行了分类阐述,最后介绍了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的应用领域。

第2章介绍了半导体激光器的基本类型、工作原理和工作特性,给出了边发射半导体激光器的几种典型封装结构,最后重点阐述了半导体激光束的几种泵浦整形方法。第3章介绍了半导体增益介质的基本理论,系统阐述了布拉格反射镜、有源区、缓冲层和帽层的设计方法,给出了几种典型的半导体增益介质结构;详细阐述了半导体增益介质外延生长工艺流程,介绍了半导体增益介质外延片测试与表征的结果。第4章介绍了半导体增益介质外延片的后工艺处理,阐述了半导体增益介质外延片衬底减薄、抛光工艺,散热片表面金属化及钎焊封装的工艺,以及半导体增益介质芯片液体毛细键合工艺过程。第5章介绍了热分析的基本方法,在分析光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的废热产生机理的基础上,采用有限元分析方法,分别从半导体增益介质芯片的封装工艺、半导体增益介质芯片的布拉格反射镜结构及泵浦光束分布等角度介绍了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的热管理。第6章从光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的速率方程出发,建立了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的理论模型,通过数值模拟,分析了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的输出功率和阈值泵浦功率密度的影响因素;介绍了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的等价腔分析方法;从常规的高斯分布光束泵浦 VECSELs 出发,开展了泵浦光的入射方向、芯片热管理方式、芯片工作温度等差异的实验研究;针对泵浦光的光场分布,介绍了环形光束泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的输出特性。第7章从倍频理论和相位匹配技术出发,介绍了几种典型倍频晶体,以及光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器腔内倍频技术。

本书以总结本研究小组近八年来的研究工作为主线,介绍了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光技术国际上最新的研究进展,并辅以大量的图表来说明。

本书涉及的研究内容在实施过程中得到了已毕业硕士生刘向南、王金艳、赵海峰、王英鸿及左亮等人在器件性能测试、器件工艺、热特性分析、计算模拟、实验研究与数据处理等方面的帮助,也得到了长春理工大学高功率半导体激光国防科技重点实验室薄报学研究员、李梅研究员、晏长岭研究员、王勇副研究员、李辉副研究员、郝永芹副研究员、徐莉副研究员、魏志鹏副教授、赵英杰副研究员、方铎博士和理学院李金华教授等人的帮助,在此表示感谢。

本书涉及的研究内容获得了国家自然科学基金(61076039)、教育部博士点专项基金(20102216110001)、吉林省科技发展计划(20080331、20090555)和长春市科技发展计划(2010CC02)的资助。本书的出版获得了长春理工大学光学工程国家重点学科学科建设经费的资助。

由于水平有限,书中不可避免地会存在着一些不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2015 年于长春理工大学

CONTENTS | 目录

第 1 章 引论	1
1.1 研究意义	3
1.2 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的 发展历程与研究现状	6
1.3 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的 基本原理、结构与材料体系	19
1.4 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的应用	25
参考文献	31
第 2 章 半导体激光泵浦源技术	39
2.1 半导体激光器简介	40
2.2 半导体激光器工作原理	41
2.3 半导体激光器的工作特性	42
2.4 半导体激光器的典型封装结构	45
2.5 半导体激光束泵浦整形技术	46
参考文献	49
第 3 章 半导体增益介质的设计与制备	51
3.1 基本理论	51
3.2 半导体增益介质结构设计	59
3.3 半导体增益介质外延片的生长与测试	73
3.4 几种典型的半导体增益介质结构	82
参考文献	87
第 4 章 半导体增益介质外延片的后工艺处理	90
4.1 半导体增益介质外延片衬底减薄工艺研究	90
4.2 半导体增益介质芯片抛光工艺研究	99

4.3 半导体增益介质芯片的钢焊封装工艺	106
4.4 半导体增益介质芯片表面键合工艺研究	108
4.5 本章小结	111
参考文献	111
第5章 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的热管理	114
5.1 热分析基础	114
5.2 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的 废热产生机理与热分析模型	122
5.3 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的热特性分析	125
参考文献	149
第6章 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的理论模拟与 输出特性	151
6.1 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的理论模型	151
6.2 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的数值模拟	153
6.3 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的等价腔分析	155
6.4 高斯分布光束泵浦垂直外腔 面发射半导体激光器实验研究	159
6.5 环形光泵浦垂直外腔面发射半导体激光实验研究	167
6.6 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器声光调 Q 实验研究	168
6.7 本章小结	169
参考文献	170
第7章 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器腔内倍频技术	171
7.1 倍频理论	171
7.2 相位匹配技术	174
7.3 几种典型倍频晶体	180
7.4 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器 腔内倍频实验研究	183
7.5 本章小结	185
参考文献	185

第 1 章 引 论

半导体激光器具有体积紧凑、重量轻、使用寿命超过 10000h、可靠性高、波长覆盖紫外至红外波段及易于调制等诸多优点,在工业、医学、国防等领域得到了广泛的应用。通常的半导体激光器主要有电激励边发射半导体激光器和电激励垂直腔面发射半导体激光器两大类型,其结构如图 1-1 和图 1-2 所示。

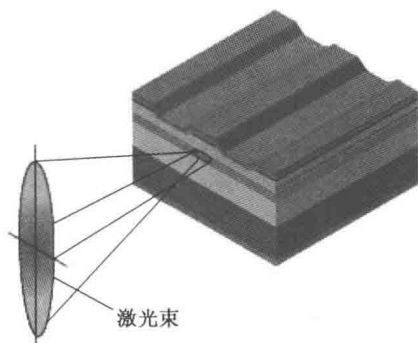


图 1-1 边发射半导体
激光器

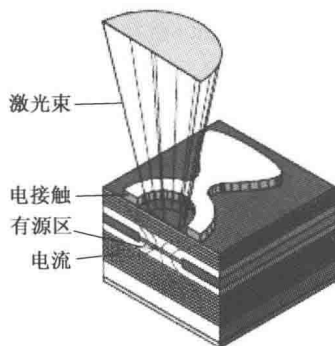


图 1-2 垂直腔面发射半
导体激光器

边发射半导体激光器具有高的电光转换效率和高的输出功率,商业化的边发射半导体激光器的电光转换效率通常在 40%~50%,单芭条半导体激光器连续输出的功率高达 120 W,准连续输出的峰值功率高达 300 W,这是电激励垂直腔面发射半导体激光器所无法媲美的。但是边发射半导体激光器发散角较大,并且平行和垂直于 pn 结的两个方向发散角悬殊较大,通常在平行于 pn 结方向的发散角在 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$,而垂直于 pn 结方向的发散角则可以达到 45° ,这两个方向的光斑尺寸也不对称,呈现椭圆状分布,这一缺陷限制了边发射半导体激光器的应用范围。

垂直腔面发射半导体激光器具有较好的光束质量和圆对称的光斑分布,其发散角也较小,只有 10° 左右,但是其单个发光源输出的光功率较小,功率在瓦级的垂直腔面发射半导体激光器在市场上也少见。除了上述激光器输出功率和

输出光束发散角之外,电激励的边发射半导体激光器和垂直腔面发射半导体激光器二者还有其他方面一些性能参数上的差异,如表 1-1 所列。

表 1-1 边发射半导体激光器和垂直腔面发射半导体激光器的对比

参 数	边发射半导体激光器	垂直腔面发射半导体激光器
有源区面积 S	$3\times300\mu\text{m}^2$	$5\times5\mu\text{m}^2$
有源区体积 V	$60\mu\text{m}^3$	$0.07\mu\text{m}^3$
谐振腔长度 L	$300\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$
反射率 R_m	0.3	$0.99\sim0.999$
光学限制因子 ξ	3%	4%
横向限制因子 ξ_t	$3\%\sim5\%$	$50\%\sim80\%$
纵向限制因子 ξ_l	50%	$2\times1\%\times3(3QWs)$
光子寿命 τ_p	1ps	1ps
弛豫频率 f_r	$<5\text{GHz}$	$>10\text{GHz}$

采用阵列化的垂直腔面发射半导体激光器是获得高输出功率激光束的有效途径之一,如图 1-3 所示,但是其发光面是由多个发光点构成,每个发光点的光场分布服从高斯函数分布,这导致了整个激光阵列发光面输出光斑的光场分布不再服从高斯函数分布,传输特性变得更加复杂,其应用范围在一定程度上受到了影响。

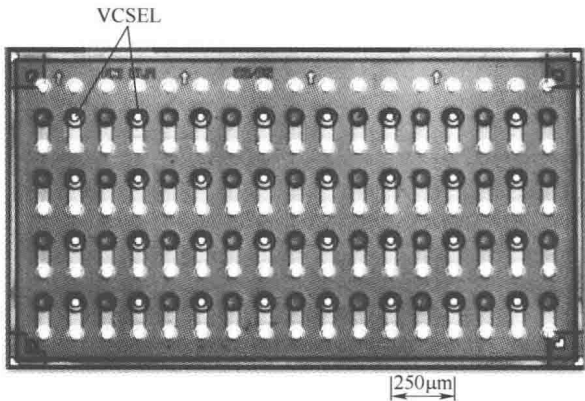


图 1-3 集成 32 个单管垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)4×8 阵列

虽然垂直腔面发射半导体激光器的发散角比边发射半导体激光器的发散角小很多,但是约 10° 的发散角足以限制其应用,这主要是由于电激励垂直腔面发射半导体激光器的谐振腔由顶部布拉格反射镜(上 DBR)、有源区和底部布拉格反射镜(下 DBR)构成,如图 1-4 所示,通常腔长为 $1\sim2\lambda$,腔长短而导致器件发散角较大。为了获得较小的发散角和在腔内置入调制器件,出现了一种垂直外腔面发射激光器(VECSELs)。电激励垂直外腔面发射半导体激光器由于热、电

和工艺的影响,虽然光束发散角上得到了一定的改善,但输出功率和转换效率仍然较低^[1]。

如何将高输出功率、高转换效率和高光束质量等诸多优点集于同一种半导体激光器已经成为研究人员夜以继日奋斗的目标,一种新型的半导体激光器——利用光泵浦半导体增益介质的激光器引起了研究人员的注意^[2]。直至1997年美国 Micracor Inc. 的 KUZNETSOV M 等人^[3]首次报道了利用商用的2W多模 808nm 半导体激光器泵浦 13 个周期 InGaAs - GaAsP - GaAs 多量子阱结构的 VECSEL 增益介质获得 0.69W 圆对称光场分布的激光输出,使得光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器获得圆对称的光束轮廓分布成为现实,这标志着真正意义的光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器(Optically pumped vertical - external - cavity surface emitting semiconductor lasers, OPS - VECSELs)的诞生,并掀起了研究的高潮。

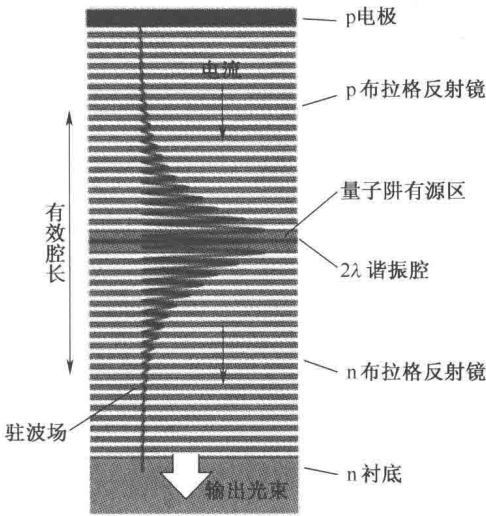


图 1-4 电激励垂直腔面发射半导体激光器的谐振腔结构示意图

1.1 研究意义

高速发展的光电子信息产业对激光器的种类及性能参数等提出了更高的技术要求,各种新型的激光器应运而生,为激光器的进一步应用拓宽了范围,改善了人类的生活,推动了人类文明的发展。

光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器是一种以半导体激光器为主要泵浦源,以半导体增益结构材料为激光介质的半导体激光泵浦半导体增益介质的全固态激光器,是一种新型半导体激光器,属于半导体光电子、激光技术领域。光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器结合了半导体泵浦固体激光器和传统电泵浦

VCSELs 的构造方法,集成了这两者的突出优点于一身。它具有较宽光谱调谐范围,有完美的空间光斑光强分布和优良的光束质量,泵浦光至激光的转换效率高达 50%,能够获得较高的激光功率输出(目前最高已经实现 106W 激光输出),输出波长可以任意设计且覆盖了紫外至中红外波段,已成为整个激光器家族中的佼佼者。正是由于这些突出优点而使得光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器在高速激光打印、高密度光存储、激光通信、激光制导、激光指示、刑事侦察、激光雷达、材料分析、矿物成分分析、生物医疗仪器(生化分析仪、共焦显微镜、流体细胞仪等医学仪器)领域、影像显示、激光表演及激光电视等诸多领域具有广泛的应用前景。

从增益介质的材料体系、增益介质的结构及制备工艺过程来看,光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器兼有常规电激励边发射半导体激光器和电激励垂直腔面发射半导体激光器的优点,不仅能够输出与电激励垂直腔面发射激光器相媲美的完美基模高斯分布光束,还能够获得与边发射半导体激光器相比拟的高输出功率。和所有半导体激光器一样,光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的输出激光波长可以根据实际需要来选择半导体材料体系和增益介质结构进行优化设计,获得的激光波长覆盖了紫外到中红外波段。除此之外,光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器还具有传统的电激励半导体激光器所不具备的优点。采用光泵浦方式替代传统的电注入泵浦方式,半导体增益介质芯片不需要注入电流,这有效地消除了附加电阻所产生的热效应,克服了电泵浦垂直腔面发射半导体激光器的量子阱、电阻和热阻之间的矛盾。不需要考虑半导体增益介质厚度增加对器件内电阻的影响,有了这种优势,理论上这样就可以通过增加量子阱周期的数量来获得更高的光增益性能,为获得高功率的垂直腔面发射半导体激光器件提供了理论依据。通过增加注入泵浦光可以获得较高的增益,通过采用输出腔镜外置的外腔式谐振腔结构,不需要在半导体增益介质的顶面和底面都生长布拉格(DBR)反射镜结构,简化了面发射半导体增益介质的生长过程。由于输出腔镜未固化在半导体增益介质芯片上,这将易于实现输出腔镜反射率的优化控制,从而获得性能更优良的激光输出。同时,采用外腔式激光器谐振腔结构,易于在谐振腔内置入调制器件实现对输出激光的调制,如通过在谐振腔内置入非线性光学晶体实现激光器输出波长的非线性变换和拓展,通过置入色散元件实现光谱线宽的压缩,通过置入锁模器件获得超短激光脉冲的输出,通过置入声光调 Q 器件、电光调 Q 器件或被动调 Q 器件来获得调 Q 激光脉冲输出。

半导体增益介质芯片采用半导体材料生长,内部没有 pn 结结构,没有掺杂 p 型或 n 型材料,降低了增益介质内部自由载流子吸收导致的内损耗,而这种掺杂层的自由载流子吸收恰恰是限制电激励半导体激光器向高功率扩展的重要影响因素。同时,在半导体材料生长时,掺杂 p 型或 n 型材料也使得芯片生产工艺过程变得更为复杂。由于半导体增益介质芯片没有电流注入,不需要考虑器件

内部电阻和电导率的影响问题,也不需要半导体增益介质芯片上制作电极,省去了电激励半导体激光器制作中所进行的欧姆工艺,制作工艺得到简化,提高了器件长期工作的稳定性和可靠性。半导体增益介质芯片底部反射镜采用交替生长突变折射率的反射镜来替代渐变组分的布拉格反射镜,如采用 AlAs 和 GaAs 交替生长替代铝组分渐变的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 来生长布拉格反射镜,极大地简化了生长过程。除此之外,半导体增益介质的布拉格反射镜可以采用两种具有不同折射率的材料以突变式结构交替生长来获得高的反射率,由于两种材料的折射率差较大,获得高反射率所需要的层数也会大大减少,如获得相同反射率的情况下,两种材料采用突变式结构交替生长的层数要比采用渐变式交替生长的层数少很多,克服了传统渐变式结构的生长控制难及层数多的问题,极大地降低了半导体增益介质的生长工艺难度。

从光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的总体结构上来看,它实质上就是半导体泵浦微片(薄片)激光器或全固态微片(薄片)激光器,只不过是它的增益介质采用了结构比较复杂的半导体增益介质芯片,而不是通常的 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等固体激光晶体,而且增益介质的厚度只有十几微米。由于增益介质厚度较薄,其内部的废热可以近似等效为一维纵向分布,比较有利于对增益介质芯片的热管理。对增益介质进行制冷封装和常规的半导体泵浦固体微片激光器的增益介质的制冷封装是一致的,都是通过对增益介质的底面进行金属化,并通过钎焊工艺将其与制冷的热沉进行良好的联结,从而有效地将增益介质产生的热量导出。光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器继承了半导体泵浦固体激光器所拥有的优点,如采用外腔式谐振腔结构可以获得高光束质量的激光束(基横模、圆形光斑和近衍射极限),通过在腔内置入非线性光学晶体进行各种非线性光学频率变换(倍频、和频、差频等),置入调 Q 器件获得调 Q 激光脉冲输出,置入锁模器件进行锁模来获得超短脉冲激光输出,通过采用多个半导体增益介质芯片在腔内进行串接实现输出激光功率的定标放大。采用半导体激光二极管作为泵浦源,亦为光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的小型化,以及获得高效率高功率激光输出提供了前提条件。除此之外,光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器还具有自身的特性,如采用不同的半导体材料体系,通过对材料组分及半导体增益介质芯片结构进行优化设计来获得不同的激光波长。目前已经获得从紫外波段至中红外波段的单一波长激光输出或可调谐激光输出,突破了只有固体激光器非线性光学频率变换获得彩色激光器的单一手段,而且更容易实现大的功率输出。

通常半导体激光泵浦源具有温漂特性,在其工作稳定发生变化时其输出的峰值波长也在发生变化,通常工作温度每升高 1 °C 其输出的峰值波长向长波方向漂移 0.3 nm。对于吸收带较窄的固体激光基质来说需要对泵浦源的波长进行锁定以实现高的转换效率。通过设计半导体增益介质芯片的材料体系和组分

来满足不同泵浦源波长的泵浦要求,并且半导体增益介质芯片具有较宽的泵浦吸收带,通常吸收带可以达到 30~40nm,从而满足对具有较宽带宽的半导体激光器泵浦时的高效率吸收,避免了对单一激光泵浦波长的依赖性。因此,采用半导体增益介质消除了由于半导体激光泵浦源受到工作温度变化所导致泵浦波长漂移的影响问题,降低了对温控系统的温控精度要求,也使得泵浦源的成本得到了降低。

在产生超短激光脉冲方面,与固体激光器、边发射半导体激光器相比,光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器具有自身独特的优势。首先,固体激光器的激光介质具有的大饱和增益系数特点,导致了在 GHz 量级重复频率下被动锁模调制器件的工作不稳定性,而光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器谐振腔中的多周期半导体量子阱结构具有相对小的增益饱和系数,使它们能在 GHz 量级重复频率下被动锁模而不会有不稳定趋势。其次,边发射半导体被动锁模激光器的平均功率和最大功率受到限制,因为稳定的锁模需要基横模工作,这限制了端面的尺寸。上述限制条件在光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器中都可以得到有效的解决,通过增加泵浦光斑面积可以获得更高的输出功率,同时通过外置输出腔镜可以实现很好的横模选择,从而获得接近衍射极限的高斯光束输出。另一方面,光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器与电注入垂直腔面发射半导体激光器相比,制作工艺更加简单,并克服了其功率限制。

综上所述,开展光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器研究具有重要的实际意义和推广价值。

1.2 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的发展历程与研究现状

早在 1953 年 9 月,美国 John Von Neumann 首次论述了在半导体中产生受激发射的可能性,认为可以通过向 pn 结注入少数载流子来实现受激发射,并计算了在两个布里渊区之间的辐射跃迁速率^[4]。J. Bardeen 在总结 John Von Neumann 的相关理论后认为,通过施加扰动导带电子和价带空穴的平衡浓度,使非平衡少数载流子复合而产生光子,其辐射复合的速率可以像放大器那样,以同样频率的电磁辐射作用来提高。

自从 1960 年美国休斯实验室梅曼等人报道了世界上第一台激光器——脉冲红宝石激光器以来,如图 1-5 所示,各种类型的激光器相继诞生,激光器的发展速度已经远远超越了与其原理相同的微波激射器,其在生产和生活中的应用极大地促进了人类的社会进步。基于激光器对促进人类文明发展的影响,目前,国际上已经将一个国家或地区对激光技术的应用程度作为衡量其工业技术先进

性的重要标志之一。

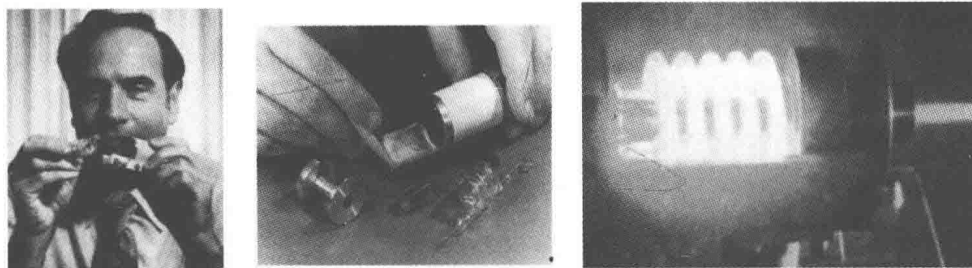


图 1-5 世界上首台激光器及其发明人

1962 年美国 HALL 等多个研究小组^[5-8]同时报道了在半导体材料 GaAs pn 结上施加偏置电压获得激光输出,这标志着半导体激光器的诞生,由于这种激光器只能工作在液氮环境下,运转条件较为苛刻,很难在实际中得到应用。1970 年,美国贝尔实验室 M. B. Panish 研究小组^[9]研制成功能够在室温下连续运转的双异质结结构半导体激光器,这一标志性的研究成果为半导体激光器向实际应用方面的发展奠定了基础,让人们看到了半导体激光器走向实际应用希望。

随着异质结激光器的研究发展,研究人员设想如果将薄膜(厚度小于 20nm)的半导体材料层作为激光器的激活层,从而能够产生量子效应,结果会怎么样?于是,在 1978 年出现了世界上第一支半导体量子阱激光器(Quantum Well Laser, QWL),这种激光器大幅度地提高了半导体激光器的各种性能,具有阈值电流低、输出功率高、频率响应好、光谱线宽窄、温度稳定性好和较高的电光转换效率等许多优点。

早在 1976 年,人们普遍认为光纤的传输损耗在波长大于 $1\mu\text{m}$ 时波长越大损耗越小,然而当时还没有这种波长范围的半导体激光器。1977 年日本 K. Iga 教授^[10]提出垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, VCSELs)的设想,即垂直于衬底面发射激光的激光器,如图 1-6 所示。1979 年 K. Iga 教授带领的研究小组^[11]采用液相外延生长技术生长的 VCSEL 芯片在液氮温度下实现了激光运转,这一研究结果标志着垂直腔面发射半导体激光器的诞生。通过优化制备工艺,1988 年 K. Iga 小组^[12]首次成功实现了 GaAs VCSELs 的室温连续激射。伴随着半导体材料生长技术、工艺和设备(分子束外延(Molecular Beam Epitaxy)和金属有机物化学汽相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)生长技术)的日益成熟,垂直腔面发射半导体激光器的研究进入了快速发展时期。如图 1-7 所示,这种传统的电泵浦 VCSELs 具有如下几个方面的特点:

- (1) 有源层体积小,其产生激光的阈值电流较低;
- (2) 波长及阈值电流对温度变化不太敏感;



图 1-6 K. Iga 教授关于 VCSELs 的设计图

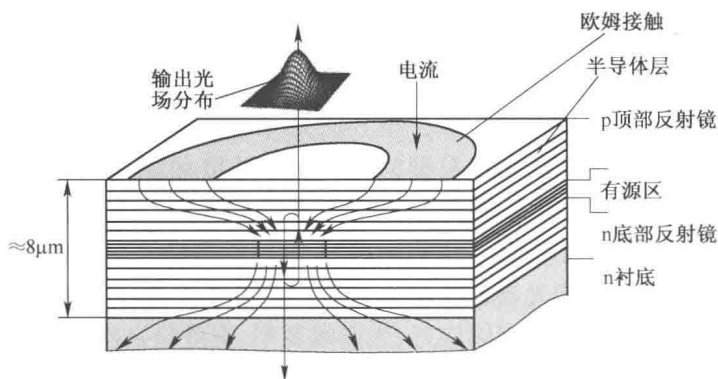


图 1-7 电泵浦 VCSELs 示意图

(3) 具有完美的光束质量、小的发散角和圆对称光场分布；

(4) 具有极短的谐振腔长度,通常为 1λ ,这使得纵模间距变大,易于实现单纵模激光运转；

(5) 具有垂直于衬底表面光出射方向,易于通过高密度集成实现高功率激光输出；

(6) 高的传输速率和调制频率,利于高速光纤网路传输通信；

(7) 寿命高达数万小时。

对于电泵浦 VCSELs 的增益介质 VCSEL 芯片来说,其顶面和底面集成了具有不同反射镜对数的布拉格反射镜,并分别充当整个激光器的高反射腔镜和输出腔镜,其中作为激光器输出镜的出光面反射镜对数相对较少。VCSEL 芯片结构生长完成后,谐振腔即固化,内部无法再置入其他任何元件,如调 Q 元件、非线性光学晶体及锁模元件等。同时,布拉格反射镜的结构与厚度设计要考虑芯

片内电阻的影响。为克服这一缺陷,一种新型的半导体激光器——垂直外腔(扩展腔)面发射半导体激光器(VECSELs)引起了人们的注意。这种 VECSELs 主要有两种类型,即电泵浦型和光泵浦型。

电泵浦 VECSELs 是在电泵浦 VCSELs 基础上将 VCSEL 芯片的顶部布拉格反射镜外置而成,其结构设计和制备工艺没有明显的变化,没有完全克服传统电泵浦 VCSELs 存在的缺陷。2003 年,美国加利福尼亚 Novalux 公司 J. G. McInerney 等人^[13]报道了电泵浦 980nm 外腔半导体激光器(NECSELs),实现了连续多模输出 1W,光束质量 M^2 小于 10,单模输出 500mW,光束发散角约 3mrad,光束质量 $M^2 = 1.1$,电光转化效率最高达到 20%,如图 1-8 所示。这种电泵浦 NECSELs 由于体积小成本低而优势明显,可以通过在腔内置入非线性光学晶体进行非线性光学频率变换,已经实现了红绿蓝三基色激光输出,如图 1-9 所示。目前 Novalux 公司通过将此三基色激光器集成在一起应用于背投电视,以期替代 LED 用于激光显示,解决 LED 长时间工作出现波长漂移的问题。电泵浦 VECSELs 虽然体积小,但受限于芯片电阻和热阻的变化,其向高功率扩展的能力有限,尽管如此,研究人员仍然对其有更高的期待^[14]。

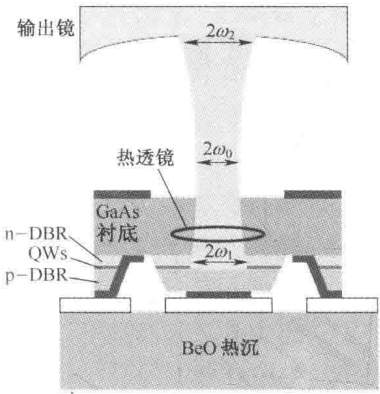


图 1-8 NECSELs 示意图

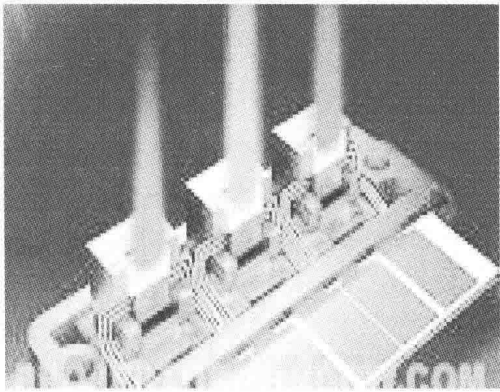


图 1-9 三基色 NECSELs

光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器恰好可以弥补电泵浦 VECSELs 功率低的不足。在电泵浦半导体激光器的研究过程中,其中一个重要的研究内容是采用光激励半导体增益介质来研究其荧光特性,这也是直接诱导光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器诞生的重要因素,为光泵浦半导体激光器的实现提供了一种新思路。1973 年 M. Nakamura 等人^[15]报道了用 694.3nm 红宝石调 Q 激光器泵浦 GaAs 分布反馈半导体激光器获得 832nm 光输出。1982 年 R. S. Putnam 等人^[2]报道了 Kr^+ 激光泵浦厚度为 $2.5\mu m$ 液相生长的 InGaAsP 四元化合物获得了 2mW $1.1\mu m$ 和 $1.2\mu m$ 波长 6ps 锁模激光输出。此后 1989 年 J. L. Jewell 研究小组^[16]报道了染料锁模激光器泵浦垂直腔 InGaAs 单量子阱实现了

980nm 激光运转。1991 年日本 NTT 基础研究实验室 W. B. Jiang 研究小组^[17]报道了采用 $1.32\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器泵浦 InP 半导体材料获得 $1.5\mu\text{m}$ 激光输出,同年,美国 MIT 林肯实验室 H. Q. Le 研究小组^[18]报道了 Ti:Al₂O₃ 激光泵浦外腔 GaAs 微片实现室温激光运转,天津大学向望华等人^[19]报道了光泵浦外腔面发射 InGaAs/InP 材料体系的半导体增益介质,获得了平均输出功率 187mW 脉冲宽度为 181fs 的 $1.5\mu\text{m}$ 超短脉冲激光输出。1993 年美国 MIT 林肯实验室 H Q Le 研究小组^[20]报道采用 808nm 阵列半导体激光泵浦 InGaAs/GaAs/AlGaAs 半导体异质结结构增益介质,在长为 2.5mm、宽为 0.33mm 的孔径内获得了 4W 功率连续激光运转,输出光束为长方形,实验装置如图 1-10 所示。1997 年中国科学院长春物理研究所于广友等人^[21]以 N₂ 激光器的 337.1 nm 谱线激发 ZnSe_{0.93}Te_{0.07}-ZnSe 多量子阱实现受激发射。同年,美国 Micracor 有限公司的 M. Kuznetsov 等人^[3]首次报道了利用商用 2W 多模 808nm 半导体激光器泵浦 13 个周期 InGaAs - GaAsP - GaAs 多量子阱结构 VECSEL 增益介质,获得 0.69W 1004nm 圆对称光场分布的激光输出,实验装置如图 1-11 所示,使得光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器获得圆对称的光束轮廓分布成为可能,这标志着真正意义的光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器诞生,并在学术界掀起了对光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的研究热潮。关于光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的研究主要体现在如下几个方面:

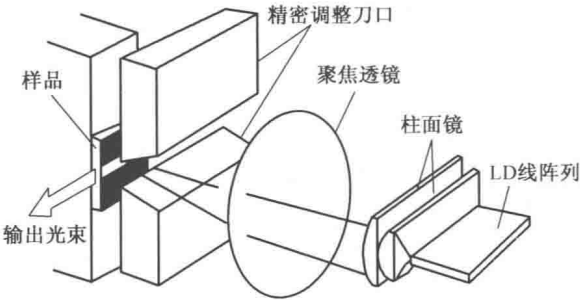


图 1-10 H Q Le 的实验装置

1. 关于光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的基本理论研究

一种新型激光器的诞生,对其产生激光的机理进行研究是进一步推动该新型激光器发展的动力,赋予了其生命力,并指导着其发展的方向。

伴随着光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的产生和发展过程,关于电泵浦垂直腔面发射半导体激光器的部分理论在光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器中同样适用,但该新型激光器也有自身的一些特性。直接诱导光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器诞生的因素是在电泵浦半导体激光器增益介质荧光特性的研究过程。早在 1977 年 L. Gigueroa 等人^[22]报道了在高能量窄脉冲激光对半导体增益介质进行瞬态加热,从而导致光泵浦半导体激光器光谱展宽的影响