

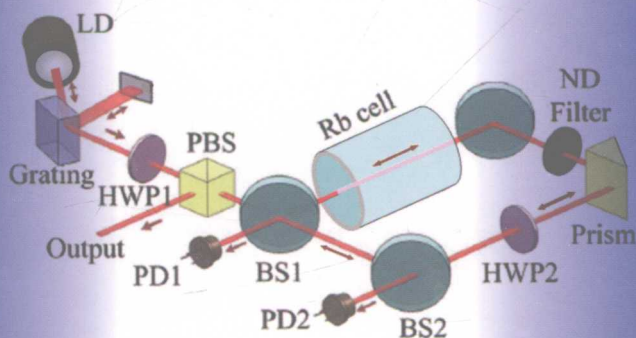


光科学与应用系列

总主编 王之江

单频半导体激光器 ——原理、技术和应用

方祖捷 蔡海文 陈高庭 瞿荣辉 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

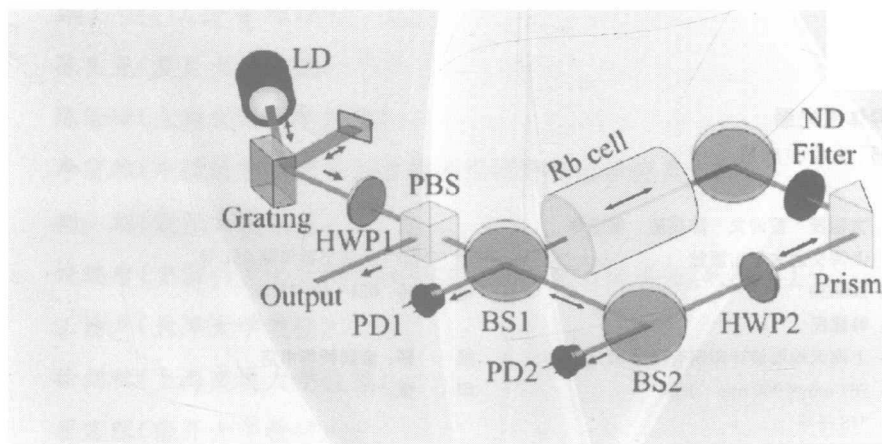
国家科学技术学术著作出版基金资助出版

光科学与应用系列

总主编 王之江

单频半导体激光器 原理、技术和应用

方祖捷 蔡海文 陈高庭 瞿荣辉 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书对单频半导体激光器的物理原理、技术和应用进行了完整、全面、深入的论述,主要内容包括半导体激光器的基本原理和特性、单片集成单频半导体激光器的原理和特性、外腔单频半导体激光器的原理和特性、单频半导体激光器的调谐技术、单频半导体激光器的稳频技术、单频半导体激光器的锁相技术、单频半导体激光器的应用等内容。

本书可作为相关领域研发工程师的参考书,也可作为研究生的教科书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

单频半导体激光器:原理、技术和应用 / 方祖捷等
编著. —上海:上海交通大学出版社, 2015
ISBN 978-7-313-13520-9

I. ①单… II. ①方… III. ①半导体激光器 IV.
①TN248.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 180314 号

单频半导体激光器

——原理、技术和应用

编 著: 方祖捷 蔡海文 陈高庭 瞿荣辉

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海天地海设计印刷有限公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

字 数: 318 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-13520-9/TN

定 价: 98.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 17

印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-64835344

丛书编委会

总主编

王之江(中国科学院院士)

副总主编

楼祺洪(中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

刘立人(中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

编委(以拼音为序)

陈良尧(复旦大学教授)

陈险峰(上海交通大学教授)

李育林(中国科学院西安光学精密机械研究所研究员)

刘旭(浙江大学教授)

饶瑞中(中国科学院安徽光学精密机械研究所副所长、研究员)

王清月(天津大学教授)

徐剑秋(上海交通大学教授)

翟宏琛(南开大学教授)

Ting-Chung Poon(美国 维珍尼亚理工州立大学教授 Virginia Polytechnic Institute
and State University)

总 序

光学是物理学的一部分,是物理学的一个分支,也是当前科学研究中最活跃的学科之一,光学的发展是人类认识客观世界的进程中一个重要的组成部分。光学从产生开始就具有强烈的应用性,并形成了光学工程这一独特技术领域,在人类改造客观世界的进程中发挥了重要作用。光学实验的结果曾经推动了近代相对论和量子论的发展。光学为多个学科提供了重要工具,如望远镜对于天文学与大地测量学;显微镜对于生物医学与金相学;光谱仪对于化学和材料科学。光学的发展还为生产技术提供了许多重要的观察和测量工具。

从爱因斯坦辐射理论可以预见到激光存在。20世纪中叶,激光问世对光学及相关科学和技术影响很大。激光的本质是受激辐射形成的高亮度、高功率密度,从而派生出种种前所未有的非线性物理现象;形成非线性光学、激光光谱学等新学科分支;开拓了远紫外到太赫兹等新辐射波段;提供了超快过程研究的工具。激光作为新光源已应用于多个科研领域,并很快被运用到材料加工、精密测量、信号传感、生物医学、农业等极为广泛的技术领域。产生了光通讯、光盘等新产业。此外,激光还为同位素分离、受控核聚变以及军事上的应用,展现了光辉的前景,成为现代物理学和现代科学技术前沿的重要组成部分。

信息科学原先以电子学为基础,如电报、电话、雷达等领域。现代科技的发展使图像信息日益重要,光信息的获取、传输、存储、处理、接收、显示等技术在近代都有非常大的进步。光信息科学已是信息科学的重要组成部分。

总之,现代光学和其他学科、技术的结合,在人们的生产和生活中发挥着日益重大的作用和影响,成为人们认识自然、改造自然以及提高劳动生产率的越来越强有力的武器。学术的力量是科技进步的基础,上海交通大学出版社在这个时候策划出版一套“光科学与应用”系列丛书,是一件非常合乎时宜的事情。将许多专家、

学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,对促进我国光学事业的发展具有十分重要的现实意义。

本套丛书的内容涵盖光学领域先进的理论方法和科研成果。图书类别主要以专著、教材为主。旨在从系统性、完整性、实用性和技术前瞻性角度出发,把理论知识与实践经验结合起来,更好地促进光学领域的学术交流与合作、让更多的学者了解该领域的科研成果和研究趋势,为促进我国光学领域科研成果的转化、加速光学技术的发展提供参考和支持。

可以说,本套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了众多国内外光学专家、学者的智慧和成果。期望这套丛书能有益于光学专业人才的培养、有益于光学事业的进一步发展。同时能为祖国吸引更多的愿投身于光学事业的仁人志士。

王之江

前 言

单频半导体激光器技术的迅速发展、应用需求的不断增长,使其成为半导体激光器的一个重要分支。在国际上已经有许多大学、科研机构和企业从事单频半导体激光器的研究、开发和制造。在国内,研究和应用也非常活跃。高频率稳定度、窄线宽的单频半导体激光器在高精度干涉仪、高分辨率激光光谱学、激光原子冷却与原子钟、相干光通信、光纤水听器、分布式光纤传感技术和相干激光雷达等前沿科学和高技术领域有着重要和广泛的应用需求。在这些领域中,不仅要求激光具有高相干性(窄线宽),还要求激光具有高的频率稳定性和调谐能力。发展各种单频半导体激光器新型器件结构、压缩线宽、发展调谐和稳频技术、降低噪声、提高频率稳定性,是近年来国际上激光技术领域最活跃的研究方向之一。单频半导体激光器的独特优点使其在基础研究领域、信息光学领域、测量传感领域以及军事方面有着非常广泛的应用。

在半导体激光器领域已经出版了许多著作,涵盖理论、材料特性、器件设计和制作工艺等诸多方面,但还没有专门论述单频半导体激光器的著作。本书试图对单频半导体激光器的物理原理、最新技术发展和应用作一较为集中和深入的介绍和论述,抛砖引玉,给从事单频激光器和应用系统的研究人员提供参考资料,以共同促进我国单频半导体激光器及其应用的发展。

本书共7章,第1章简要介绍半导体激光器的发展历程和单频半导体激光器的技术要求。第2章介绍半导体激光器的原理、基本特性,频率和噪声特性的表征和测量方法。第3章介绍单片集成单频半导体激光器的结构、原理及特性,主要包括分布反馈(DFB)半导体激光器、分布布拉格反射(DBR)半导体激光器、垂直腔面发射激光器(VCSEL)。第4章介绍外腔单频半导体激光器,对半导体激光器的光反馈模型进行了简要论述,并详细说明了目前常用的外腔半导体激光器的原理及

结构,概述了外腔半导体激光器的研究现状及发展趋势。第5章介绍半导体激光器的稳频技术,包括饱和吸收稳频原理、无调制稳频技术和 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频方法。第6章介绍单频半导体激光器的调谐、扫频技术以及涉及的光学锁相技术,并简要介绍了光频率梳在光频转换和锁定方面的应用。第7章介绍单频半导体激光器的几个有特色的应用,包括冷原子物理、相干光通信、精密测量传感和激光雷达。本书注重内容的系统性,尽量体现科学技术的新进展。部分素材直接来源于作者多年来取得的科研成果。

本书作者为中国科学院上海光学精密机械研究所的研究员。作者所在研究团队的同事和研究生们,在单频半导体激光器及其应用的研究项目中做了大量工作,为本书积累了素材。在本书写作过程中,辛国锋、陈迪俊、魏芳、杨飞等博士参与了初稿的写作和讨论,提出了许多好的意见,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中存在的错误和不当之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 半导体激光器发展历史回顾	1
1.2 单频半导体激光器及其应用	3
参考文献	6
第2章 半导体激光器概述	9
2.1 半导体激光器的结构和基本原理	9
2.1.1 半导体中的光受激发射条件	10
2.1.2 半导体P-N结、异质结和量子阱	13
2.1.3 半导体激光器的激射条件和速率方程	16
2.2 半导体激光器的特性	18
2.2.1 输出功率特性	19
2.2.2 横向结构和横模特性	22
2.2.3 光谱特性	25
2.2.4 瞬态特性和电流调制特性	27
2.2.5 温度特性	31
2.3 半导体激光的线宽和噪声	34
2.3.1 激光器噪声机理及其表征	35
2.3.2 单频半导体激光的线宽和线型	38
2.3.3 半导体激光器的低频噪声	45
2.3.4 频率稳定性与阿仑方差	50
参考文献	52
第3章 单片集成单频半导体激光器	56
3.1 分布反馈半导体激光器	56
3.1.1 DFB激光器的耦合模理论分析	57

3.1.2	DFB 激光器结构和制作工艺	62
3.1.3	DFB 激光器的基本特性	63
3.2	分布布拉格反射半导体激光器	69
3.2.1	DBR 激光器结构和作用原理	69
3.2.2	无源波导光栅反射光谱	70
3.2.3	DBR 激光器的基本特性	72
3.3	垂直腔面发射半导体激光器	77
3.3.1	VCSEL 激光器结构和基本原理	77
3.3.2	VCSEL 激光器的基本特性	83
	参考文献	88
第 4 章	外腔单频半导体激光器	94
4.1	外腔半导体激光器的特性和基本理论	95
4.1.1	ECDL 模型和基本特性	95
4.1.2	弱反馈平面外腔半导体激光器的基本理论	97
4.1.3	强反馈选频外腔半导体激光器的特性	99
4.1.4	半导体激光器的注入锁定	101
4.1.5	光反馈诱导的半导体激光器不稳定性	104
4.2	平面光栅外腔半导体激光器	106
4.2.1	Littrow 结构外腔半导体激光器	107
4.2.2	Littman-Metcalf 结构外腔半导体激光器	109
4.2.3	光栅外腔激光器单元技术	110
4.2.4	光栅外腔激光器的性能和进展	113
4.3	布拉格光栅外腔半导体激光器	118
4.3.1	体布拉格光栅外腔半导体激光器	118
4.3.2	光纤布拉格光栅外腔半导体激光器	124
4.3.3	平面波导布拉格光栅外腔半导体激光器	127
	参考文献	129
第 5 章	半导体激光器的稳频技术	135
5.1	饱和吸收光谱技术概要	135
5.1.1	吸收光谱的经典理论和功率饱和效应	136
5.1.2	吸收谱线的多普勒展宽与饱和吸收光谱	138
5.2	调制光谱稳频技术	142

5.2.1	调频光信号的频谱分析	142
5.2.2	调制光谱稳频及饱和吸收稳频半导体激光器	145
5.2.3	残余幅度调制的影响和消除方法	149
5.3	无调制稳频技术	152
5.3.1	偏振光谱技术	152
5.3.2	萨格纳克干涉仪型鉴频技术	153
5.3.3	磁致二色性稳频技术	157
5.3.4	正交偏振光负反馈稳频方法	158
5.4	PDH(Pound-Drever-Hall)稳频技术	160
5.4.1	法布里-珀罗谐振腔的频谱特性	160
5.4.2	PDH 稳频技术的原理和特性	163
5.4.3	PDH 稳频激光器的关键技术和进展	167
	参考文献	169
第 6 章	激光扫频和光学锁相技术	175
6.1	激光扫频技术	175
6.1.1	半导体激光器的电流调谐和线性扫频	176
6.1.2	腔内调谐扫频	180
6.1.3	外调制器扫频技术	188
6.2	光频转换和光锁相技术	194
6.2.1	光锁相技术基本原理	195
6.2.2	光锁相技术的应用	199
6.3	光频率梳及其在光谱技术方面的应用	208
6.3.1	光频率梳的产生和基本特性	208
6.3.2	光频率梳在光频转换和锁定方面的应用	213
	参考文献	218
第 7 章	单频半导体激光器的应用	227
7.1	单频半导体激光器在冷原子物理和技术领域的应用	227
7.1.1	时间基准和原子钟	227
7.1.2	原子的激光冷却和冷原子钟	228
7.1.3	冷原子物理和光谱技术相关的数据资料	232
7.2	单频半导体激光器在光通信领域的应用	236
7.2.1	相干光通信对激光器频率特性的要求	236

7.2.2	星际光通信	239
7.2.3	射频光纤技术	240
7.3	单频半导体激光器在测量传感领域的应用	241
7.3.1	基于光波干涉的精密测量技术	241
7.3.2	分布式光纤传感器	243
7.3.3	激光光谱技术	248
7.4	单频半导体激光器在激光雷达领域的应用	250
7.4.1	激光雷达的基本结构	250
7.4.2	合成孔径激光雷达	252
	参考文献	253
	索引	257

第1章 绪论

1.1 半导体激光器发展历史回顾

激光器的发明是光学科学技术历史上的一个划时代的成就。在微波激射和红宝石激光器诞生之后^[1, 2], 不久就实现了半导体材料的光受激发射^[3]。在各种激光器中, 半导体激光器是人民生活中使用最多、产业化程度最高的一种。半导体激光器的应用范围覆盖了整个光电子学领域, 是目前光电子科学中的核心器件。以半导体激光器为光源的光纤通信成为各国信息基础设施的重要基石。人们每天打电话、上网所依赖的光纤通信, 听音乐、观看录像要用到的光盘, 在市场中常用的条形码扫描器中, 在电脑中常用配件的光电鼠标中, 都可以看到半导体激光器的身影。在国防军工和国家安全领域, 它正在成为不可或缺的核心器件。

在半导体激光器的发展历史上, 下面的事件具有里程碑的意义。

1962年, 在GaAs同质P-N结上获得光受激发射^[3], 证明了半导体受激发射机理。

1969年, 实现GaAs/AlGaAs异质结激光器^[4], 为激光器室温连续工作拓宽了道路。

1970年, 双异质结激光器获得800 nm波段的室温连续运转^[5, 6], 成为高速光通信的发射机的核心器件。

1970年代末、80年代初, 获得分布反馈(DFB)激光器^[7]。

1980年代开始量子阱激光器的研究^[8]; 随后开展应变层量子阱激光器的研究^[9]。

1990年代取得垂直腔面发射激光器^[10]和量子级联激光器^[11]的成功。

1980年代开始半导体激光器的工作波长不断拓展, 先后实现在1 300~1 500 nm, 980 nm, 650 nm, 2 μm 波段半导体激光器; 并获得10~16 μm 中红外半导体激光器。

1990年代至21世纪初, 半导体激光器的输出功率取得了巨大进展, 组合封装组件的输出功率可达上千瓦。

半导体激光器的诞生和发展, 无疑离不开爱因斯坦奠定的理论基础。在激光尚未取得实验成功之时, 冯·诺依曼就提出了在半导体材料上获得受激发射的设想^[12]。与汤斯和普罗霍罗夫共同获得1964年诺贝尔物理学奖的巴索夫, 在1959年提出半导体激光器的设想、在1961年提出采用P-N结的方案^[13]。半导体异质

结结构和量子阱结构的研究成功,是最重要的科学和技术成就之一。为此,2000年的诺贝尔物理学奖授予俄国的阿尔费罗夫(Zhores I. Alferov)和美国加州大学的克勒默(Herbert Kroemer),以表彰他们在半导体异质结方面的贡献,特别是对半导体激光器发展的贡献^[14, 15]。

材料的研究和发展是半导体激光器的基础。日本科学家赤崎勇(Isamu Akasaki)、天野浩(Horishi Amano)和中村修二(Shuji Nakamura,美国籍)对Ⅲ-V族氮化物材料的生长技术进行了突破性的研究,取得了蓝-紫外波段的发光管和激光器的成功^[16],被授予2014年的诺贝尔物理学奖。

半导体激光器与其他激光器一样,具有高亮度、高相干性的优点。不同于常规的气体、固体激光器中受激发射发生在原子的能级之间,半导体中的受激发射发生在导带和价带之间,因此半导体激光的物理过程与半导体中电子的运动密切相关。这样的机理使它与其他激光器相比又具有突出的优点和特点:

(1) 直接电流注入泵浦、使用方便。不同于其他激光器的高压放电方法和固体激光器的光泵方法。

(2) 直接电流调制,调制速率极高。是其他激光器通过外部的体光学调制器实现调制所不能比拟的。

(3) 体积小、重量轻。与其他半导体电子学器件相同,具有低成本、大批量生产的优势。

(4) 波长覆盖从紫外到中红外波段、几乎连续可选的广阔波段。

与其他激光器相比,半导体激光器的缺点也是明显的:

(1) 发散角大,而且在水平和垂直方向不对称。以单位面积和单位立体角发射的功率衡量,它的亮度其实与其他激光器相当,但是发散角大带来使用时准直和聚焦等技术问题。

(2) 光谱线宽大,易受工作电流波动的影响。这也带来了调谐简单易行的优点。

(3) 输出光功率小。但是其发光效率高,体积小可以组合,增大输出功率。

半导体激光器在广泛的应用领域中发挥着十分重要的作用,尤其是在信息技术领域。通信网络是人类信息社会的神经网络。以半导体激光器为光源的光纤通信网络,包括骨干网、城域网和接入网,覆盖全球。光通信与无线通信相结合,使人和人之间可以即时联络,人人都可以享受各种信息资源。更不用说通信网络对于生产、服务、经济活动、文化生活以至政治军事各个领域的重要作用。

半导体激光器也成为信息社会的大脑和眼睛中的一个不可或缺的元件。光盘信息的写入和读取,激光显示技术,各种光电传感器都有半导体激光器的身影。

在科学技术的前沿研究领域,如激光致冷、频率标准、空间科学、精密测量等领

域,半导体激光器被广泛使用。在国防军事、医疗保健等方面,它的作用也越来越明显。

它的应用还在不断地向社会生活的各个角落渗透。

半导体激光器在信息技术的发展中显示了巨大的社会效益和经济效益。激光技术应用的发展日新月异,一系列前沿科研领域对激光器的性能提出了越来越高的要求。大体来说两个方向引人注目:一是向大功率激光器组件发展。在固体激光器的泵浦光源、大型激光工程、材料加工、医疗等方面不断拓展它的应用。半导体激光器的高能量转换效率、宽的可选波长、具有高性价比、批量生产等特点,受到人们的重视。二是极大地改善和提高半导体激光器的相干性与光束质量。激光器相干性的主要标志是极窄的线宽。另一个重要标志是极低的噪声。阐明窄线宽、低噪声单频半导体激光器的原理和提高这些性能的方法、技术,就是本书的目的。

1.2 单频半导体激光器及其应用

激光的主要特点是它的高相干性,包括空间相干性和时间相干性。前者表征光束极好的方向性,在同样的输出功率下意味着高亮度,即单位面积、单位立体角发射的光功率高。后者表征光波极高的单色性,也就是极窄的线宽。光的单色性具有相对性。日常生活中,源于太阳光和热辐射的自然光不是单色光;从棱镜或单色仪分解出来的光具有人眼可区分的颜色。基于原子、分子能级跃迁的光谱线,显示出极好的单色性。激光的发明大大提高了光谱线的单色性。对激光的稳频又进一步将光频提纯到极致。现代科学技术已获得频宽小于赫兹的激光。激光的单色性用它的线宽 $\delta\lambda$ 或频宽 $\delta\nu$ 衡量。光的相干时间 τ_c 是频宽 $\delta\nu$ 的倒数,光在 τ_c 时间内传输的距离为它的相干长度 L_c ,即

$$\tau_c = \frac{1}{2\pi\delta\nu} = \frac{1}{c} \frac{\lambda^2}{2\pi\delta\lambda} = \frac{L_c}{c} \quad (1-1)$$

在光干涉仪中,如迈克耳孙干涉仪,干涉臂的最大光程就是光的相干长度。超过这个长度,干涉条纹将开始变得难以辨别,测量精度下降。干涉仪长度测量的基本分辨率为波长量级。相干长度越大, $\lambda/L_c = \delta\lambda/\lambda$ 越小,意味着测量的分辨率越高。单频半导体激光器众多应用的基本要求,就是激光的高时间相干性。光干涉测量的精度体现为干涉条纹的清晰度,或称之为可视度(Visibility),它与相干时间的关系可以表示为

$$V = \exp(-\tau/\tau_c) \quad (1-2)$$

式中, $\tau = L_{\text{OPD}}/c$ 为干涉仪光程差(Optical Path Difference, OPD)的时延。可见,

光波的相干时间越长,干涉的可视度越接近于 1。

激光器的线宽与它的纵模结构有关。激光光波在其两个腔面之间来回传输必须满足相位差为 2π 整数倍,这一要求决定了它的纵模。显然,单频激光器必须单纵模工作。在垂直于振荡光束方向的平面上,激光光波也必须形成稳定的光强分布,也就是说要建立一个稳定的横模。基横模是接近高斯分布的基本模式。如果不对激光器的横向结构做仔细的设计和控制,激光器多个横模就可能同时存在,或者处于竞争状态。与光纤中的高阶模式相似,激光器高阶横模可以视为在腔内走三角形的光路,导致不同横模有不同的有效折射率;从而使纵模频率出现相应的旁瓣,使激光线宽增大、单频性能劣化。因此,要实现激光器单频工作,必须保证激光器处于单纵模、单横模(一般为最低阶横模,即基横模)工作状态。

20 世纪 60~70 年代是半导体激光器从出生到婴幼儿的时代。1970 年代得益于异质结,大大降低了阈值电流,实现了常温连续运转。1980 年代大体上解决了横模结构的设计和生长制备;在垂直于 P-N 结方向上采用载流子和光波分别限制结构,在侧向采用异质掩埋条形、脊型波导等方法,获得基横模运转的激光器。单纵模激光器的获得基本上决定于净增益的谱宽与纵模间隔之比。半导体介质的增益谱很宽,这就要再引入纵模选择措施。DFB 将光栅引入激光器的有源区,其纵模选择作用远远高于其他方法,并且具有高速调制下的动态单纵模性能,满足光通信的需要。在世纪之交全球光纤通信发展的高潮中,DFB 激光器研发成熟,已投入商用。

进入 21 世纪以来,许多新的应用,特别是科学技术前沿学科,提出了更高的性能要求。

相干通信。光纤通信和计算机将人类社会的信息技术及其作用推到了空前的高度。然而人们享用信息的需求从未满足。相干通信利用光波的频率、相位、偏振态等所有参数作为信息载体,成倍地提高信息系统的容量。这就不仅要求半导体激光的输出功率、调制速率和频率间隔满足系统要求,更要求高的相干性^[17]。

冷原子物理研究。原子的激光冷却是激光技术的一大成果。这一成果将频率标准和时间基准提高了数个量级。由于在激光冷却和陷俘原子领域的研究成果,美籍华裔科学家朱棣文(Steven Chu)、法国学者塔诺季(Claude Cohen-Tannoudji)和美国学者菲利普斯(William D. Phillips)共同获得了 1997 年诺贝尔物理学奖^[18]。

冷原子钟的发展进一步形成了以光频率梳(Optical Frequency Comb)作为计数手段的光钟的概念。光频率梳和相关的激光精密光谱学技术是激光的又一大成果。对此做出贡献的美国科学家 John L. Hall 和德国科学家 Theodor W. Hänsch 共同获得了 2005 年诺贝尔物理学奖^[19]。冷原子物理和光梳这两大成果的研究工

作运用了许多光学和激光的器件与技术,也包括高性能的半导体激光器。由于半导体激光器使用方便、性价比高,在这些前沿技术的实用化仪器中将得到越来越多的应用。

高精度、超长距离的干涉测量和光谱测量。光学干涉测量是计量学的一个高峰。迈克耳孙干涉仪企图测量光波在“以太”中速度的变化,成为爱因斯坦相对论的实验基础。现在,人们正在用超长距离的干涉仪测量引力波。以半导体激光器为光源的干涉仪已经在许多场合得到应用。一个典型例子是水听器 and 地听器。从海洋科学、地球科学的基础学科,到航海、海洋渔业、地震预报,到海疆防卫,人们越来越重视水听器和地听器的研发与应用^[20]。在这些基于干涉测量的技术中,要求测量的分辨率低于波长数个量级。以半导体激光器为光源的干涉仪和各种测量、监控仪器,正在成为空间有效载荷的一个组成部分。这些应用对激光器的线宽和其他更多的性能提出了更高的要求。

(1) 线宽。DFB 激光器的频宽大致在数兆赫兹量级,能够充分满足波分复用(WDM)光纤通信的需求。在许多高精度光谱技术中,要求线宽低于千赫兹,甚至小于赫兹。激光器的本征线宽是光波相位噪声的反映,激光线宽等主要来源于激光中的自发辐射成分。激光发明人肖洛(Schawlow)和汤斯(Townes)在提出激光基本概念的论文中,就给出了线宽的公式^[21]:

$$\delta\nu = 2\pi h\nu(\delta\nu_c)^2/P \quad (1-3)$$

式中, $\delta\nu_c$ 为激光腔的本征线宽,它是腔内光子寿命的倒数。可见,线宽主要决定于两个因素,一个是腔内光子寿命,另一个是输出功率,它标志着受激辐射相对于自发辐射的水平。激光器腔长越长,腔内损耗越小,端面反射率越高,光子寿命就越长。激光输出功率越大,其自发辐射所占比例越低。

半导体激光器在这两方面都有弱点。它的腔长短、腔面反射率低,因而光子寿命短。它的增益谱宽远大于其他固体和气体激光器,输出光功率中的荧光成分很高。进一步压缩线宽是单频半导体激光器的首要任务。为此发展了多种外腔半导体激光器结构,其功能是延长激光器的腔长、降低自发辐射成分的含量、提高腔面反射率、增大光子寿命,并提高边模抑制比,扩大调谐范围。目前,先进的外腔单频半导体激光器的线宽水平可以与其他激光器媲美,从而可以在要求窄线宽的应用中替代气体和固体激光器。

(2) 稳频。许多应用不仅要求窄线宽,还要求激光频率的长期稳定性。光频随时间的漂移带来应用装置性能退化和失效。在许多应用中,特别是在冷原子物理和技术、激光光谱技术等研究中,激光频率必须对准原子、分子的吸收线。激光发明不久,肖洛就深入地研究了吸收谱线多普勒展宽的消除方法。由于对饱和吸