



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

高功率半导体激光器

王立军 宁永强 等编著

High Power Semiconductor Laser



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

高功率半导体激光器

王立军 宁永强 等编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍半导体激光器的基础理论,并着重对应用技术进行了分析。全书共11章。第1章回顾了半导体激光器的发展历史,对其基本理论进行了讲解,并对高功率半导体激光器设计和制备中的要点进行概述。第2章~第11章分别对半导体激光器在光通信、激光成像与显示、军事、工业、医疗、测量与监测、生物和农业、泵浦源、垂直腔面发射激光领域和其他新领域中的应用进行了详细阐述。

本书可供从事激光技术、半导体激光器制造和应用的广大科技工作者研究参考,可作为高等院校学生教学参考书,也可供激光技术、凝聚态物理等专业的技术人员、大专院校师生阅读参考,也可以作为有关企业和事业单位对半导体激光器应用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高功率半导体激光器/王立军等编著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 11
(现代激光技术及应用)
ISBN 978 - 7 - 118 - 11181 - 1

I. ①高… II. ①王… III. ①半导体激光器
IV. ①TN248. 4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第298942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印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17 字数 316千字

2016年11月第1版第1次印刷 印数1—2500册 定价78.00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

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很大进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划并组织编写了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会。为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会。这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分人是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家。编辑委员会成员以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整,组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为“十二五”国家重点出

版规划项目和国家出版基金项目。丛书本身具有鲜明特色：①丛书在内容上分三个部分，激光器、激光传输与控制、激光技术的应用，整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用；②丛书的写法注重了系统性，为方便读者阅读，采用了理论—技术—应用的编写体系；③丛书的成书基础好，是相关专家研究成果的总结和提炼，包括国家的各类基金项目，如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等，书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项；④丛书作者均来自国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校，包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等，这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目，取得了丰硕的成果，有的成果创造了多项国际纪录，有的属国际首创，发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文，代表了国内激光技术研究的最高水平，特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年，积累了丰富的研究经验，丛书中不仅有科研成果的凝练升华，还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述，相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献，同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助！

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严，编写及组织工作难度大，作为丛书的学术委员会主任，很高兴看到丛书的出版，欣然写下这段文字，是为序，亦为总的前言。

金国藩 周如琨

2015年3月

半导体激光有着长达 50 余年的发展历史, 研究范围涵盖半导体内光子和电子相互作用的物理过程、器件工艺和应用技术。随着信息时代的到来, 以半导体激光器为代表的光电子和微电子技术所支撑的网络和通信技术, 已经深深影响着国民经济、国防建设、社会发展和科技进步。当前, 半导体激光正处于新一阶段的快速发展时期, 我国的半导体激光技术基本保持了与国际同步的发展态势。从国家竞争性发展的角度出发, 在社会全面发展、提升产业经济、维护国防安全和经济结构转型等各方面均对半导体激光器的全面创新和产业应用的转型提出了更为明确的需求。

伴随着国际上的科学研究突飞猛进的发展, 和各类相关技术、材料与工艺等的突破性进步, 半导体激光器作为一个世界前沿的研究方向, 在国际和国内范围内, 受到了高度的重视和关注, 不仅在基础科学领域的研究不断深化、技术水平不断提升, 而且在应用领域上也不断拓展新的研究方向, 应用技术和设备层出不穷, 技术水平同样取得大幅度的提升, 在我国乃至世界各国的国民经济发展中, 均起到重大的作用。面对日益增长的半导体激光器应用领域和市场需求, 市面上缺乏比较全面介绍高功率半导体激光器及其应用的书籍。本书不仅从基本概念上对半导体激光器的基本原理进行提纲挈领式的介绍, 更对各行各业所需要的半导体激光器, 针对其应用原理进行了详尽的分析和阐述, 填补了高功率半导体激光器应用方面的空白。本书汇集了研究团队长期的理论基础与实践经验, 重视理论知识和实践应用的结合。首先在自身研究基础上, 引用了国内外该领域成熟的基本理论和观点; 其次, 结合自身实践经验, 重点阐述了半导体激光器在应用领域的广阔发展前景, 广泛应用价值以及所需的新材料、新工艺和新技术; 然后再将实践经验升华到理论以利于进一步指导实践。力争在上述几个方面形成自身的特色。本书具有指引半导体激光器发展方向、推动产业转型和全

面普及光制造的积极社会经济价值。

半导体激光器的波段从紫外到红外、中红外,有着出光效率高、调制简单、便于系统集成、体积小、质量轻、成本低等优点。本书第1章简单回顾了半导体激光器的发展历史,对其基本理论进行了简单讲解,并对高功率半导体激光器设计和制备中的要点进行了概述。第2章~第11章分别对半导体激光器在光纤通信、激光成像与显示、军事、工业、医疗、测量与监测、生物和农业、泵浦源、垂直腔面发射激光领域和其他新领域中的应用进行了详细阐述。目的是为了有志进入本领域开拓的科研工作者、教师、学生和广大技术人员提供参考。

本书的撰写得到了金国藩院士、周炳琨院士的大力支持。从事半导体激光器行业的专家王立军院士也是本书的作者之一,他作为我国半导体激光技术方面的专家,身体力行,不仅为半导体激光器的技术和应用研究投入了自己毕生的精力,为我国半导体激光技术的发展做出了重要的贡献,而且他对学术研究孜孜不倦的追求和严谨求实的治学风格,已经成为我们这一代的楷模。另外,本书成果也是团队成员共同努力的结晶,全书由王立军、宁永强统稿,负责本书编写的人员有:陈泳屹(第1章),张建(第2章),张建伟(第3章),彭航宇(第4章),朱洪波、韩金樑、单肖楠(第5章),王彪(第6章),曹军胜(第7章),梁雪梅、秦莉(第8章),付喜宏(第9章),张星(第10章),张俊(第11章)。为了本书的系统性和完整性,也引用了国内外同行专家发表的论文或专著的部分内容,在此一并表示衷心的感谢。

作者深深感谢国防工业出版社给予本书出版工作的大力支持以及对本书所提出的宝贵意见。限于作者水平,书中的不足之处在所难免,敬请各位专家、读者指正。

作者 宁永强
2016年5月

第1章 半导体激光器基础

1.1	半导体激光器发展历史	1
1.2	半导体激光器的工作原理	4
1.2.1	粒子数反转	4
1.2.2	谐振腔和光波导的基本特性	9
1.2.3	阈值条件	18
1.3	半导体激光器的主要性能指标	23
1.3.1	半导体激光器的微分量子效率	23
1.3.2	半导体激光器的动态特性	24
1.3.3	半导体激光器的功率效率	28
1.3.4	半导体激光器的远场	29
1.4	高功率边发射半导体激光器	32
1.4.1	高功率量子阱激光器外延结构的优化设计	33
1.4.2	高功率半导体激光器的可靠性	37
1.4.3	高功率半导体激光器的封装技术	39
1.4.4	高功率半导体激光器的温度特性和热管理技术	40
1.4.5	高功率激光器 bar 条的优化设计	41
	参考文献	41

第2章 半导体激光器在光通信中的应用

2.1	半导体激光器用于光纤通信	42
2.1.1	光纤通信网络对半导体激光器的要求	43
2.1.2	F-P 激光器	44
2.1.3	集成光栅窄线宽半导体激光器	45
2.1.4	电吸收型调制器集成激光器	46
2.1.5	波长可选择激光器	47
2.1.6	高速调制半导体激光器	50
2.2	半导体激光器在空间通信中的应用	53

2.2.1 空间激光通信系统及其优势	53
2.2.2 空间通信用半导体激光光源的发展	54
2.2.3 800nm 波段半导体激光器用于空间激光通信演示	55
2.2.4 半导体激光器泵浦的固体激光器用于工程化空间激光通信	56
2.2.5 1550nm 超窄线宽激光器用于发展新一代空间激光通信	59
2.2.6 新型半导体光源用于空间激光通信	61
参考文献	64

第3章 半导体激光器在成像、显示和照明领域的应用

3.1 激光成像技术	67
3.1.1 半导体激光雷达系统	67
3.1.2 激光多光谱成像	69
3.1.3 光学相干成像	70
3.2 激光显示	71
3.2.1 蓝、绿光半导体激光光源	72
3.2.2 红光半导体激光光源	75
3.3 激光照明	77
参考文献	79

第4章 半导体激光器在国防军事中的应用

4.1 激光雷达	82
4.2 激光近炸引信	84
4.3 激光点火	86
4.4 激光干扰	87
参考文献	88

第5章 半导体激光器在工业中的应用

5.1 半导体激光加工技术在国内外的的发展	89
5.2 半导体激光加工设备	90
5.3 半导体激光加工光源	91
5.4 半导体激光加工技术及其应用	94
5.4.1 半导体激光熔覆技术及其应用	94
5.4.2 半导体激光切割及其应用	97

5.4.3 半导体激光金属焊接及其应用	98
5.4.4 半导体激光塑料焊接及其应用	100
5.4.5 半导体激光3D打印技术及其应用	102
参考文献	104

第6章 半导体激光器在医疗领域的应用

6.1 激光诊断	106
6.1.1 激光诊断背景介绍	106
6.1.2 激光诊断的机理	106
6.1.3 激光诊断应用	107
6.2 激光手术	108
6.2.1 激光手术背景介绍	108
6.2.2 激光手术的机理	109
6.2.3 半导体激光器在手术中的应用	109
6.3 激光美容	111
6.3.1 激光美容的背景介绍	111
6.3.2 激光美容的机理	112
6.3.3 半导体激光器在激光美容领域的应用	113
6.4 激光牙科	114
6.4.1 激光牙科背景介绍	114
6.4.2 激光牙科治疗机理	114
6.4.3 半导体激光器在激光牙科领域的应用	115
6.5 激光眼科	116
6.5.1 眼科领域半导体激光器简介及作用机理	116
6.5.2 半导体激光器眼科应用	116
6.6 激光针灸	118
6.6.1 激光针灸简介	118
6.6.2 物理理论基础和原理	119
6.6.3 主要物理效应	119
参考文献	121

第7章 半导体激光器在测量与监测领域的应用

7.1 激光测量距离	122
7.2 激光测量速度	125

7.2.1	激光多普勒测速技术	126
7.2.2	基于激光测距的测速技术	130
7.3	激光测量角度	131
7.4	激光测量温度	134
7.5	激光地貌测绘	138
7.6	激光气体监测	141
7.7	激光液体监测	144
7.8	激光生化监测	148
7.9	车载激光雷达	150
	参考文献	153

第8章 半导体激光器在生物和农业中的应用

8.1	激光育种	155
8.1.1	激光培育果胶酶高产菌株	155
8.1.2	半导体激光培育小麦幼苗,提高抗紫外辐射性能	157
8.1.3	激光培育作物种子	159
8.1.4	提高种子活力	159
8.2	激光防治病虫害	160
8.3	激光检测果实成熟度	163
8.4	激光培育蔬菜	165
8.4.1	半导体激光培育新品质番茄	165
8.4.2	半导体激光器栽培莴苣	166
8.5	激光除草	166
8.6	激光储藏保鲜	168
8.6.1	水果保鲜	169
8.6.2	He-Ne激光辐照山药储存保鲜技术	169
8.7	激光诱变	169
8.7.1	激光诱变酵母菌	170
8.7.2	激光诱变螺旋藻	170
8.8	激光在水产养殖中的应用	172
8.9	应用于基因工程研究	172
8.9.1	激光应用于园艺和林木花卉遗传基因	173
8.9.2	半导体激光辐照脱氧核糖核酸	173
8.9.3	激光辐照蓖麻蚕蚕卵基因	174

8.9.4	激光选择家畜精子性别	175
8.10	激光在农业生产中的应用	175
8.10.1	激光处理饲草	175
8.10.2	激光剪羊毛	175
8.10.3	激光品酒	175
8.10.4	激光催陈	176
8.11	激光在生物领域的应用	176
8.11.1	半导体激光对细胞的生物刺激作用	176
8.11.2	半导体激光对血液的影响	177
8.11.3	半导体激光照射对机体影响	178
8.11.4	生物大分子的能量转移过程	178
8.11.5	DNA 分子的选择激发	179
8.11.6	生物大分子的结构分析	179
8.11.7	激光生物多普勒技术	179
8.11.8	激光捕获	180
	参考文献	180

第9章 半导体激光泵浦源应用

9.1	半导体激光泵浦固体激光器	183
9.1.1	半导体激光泵浦固体激光器优点及发展	183
9.1.2	半导体激光泵浦固体激光器的泵浦方式	186
9.1.3	半导体激光泵浦碟片激光器	192
9.2	半导体激光泵浦光纤激光器	196
9.2.1	半导体激光泵浦光纤激光器的特点	196
9.2.2	光纤激光器包层泵浦及耦合技术	197
9.3	半导体激光泵浦碱金属蒸气激光器	201
9.3.1	半导体激光泵浦碱金属蒸气激光器原理	201
9.3.2	半导体激光泵浦碱金属蒸气激光器泵浦耦合技术	203
9.3.3	半导体激光泵浦碱金属蒸气激光器研究	204
	参考文献	205

第10章 垂直腔面发射激光器及应用

10.1	垂直腔面发射激光器的基础知识	207
10.1.1	VCSEL 的发展历史	207

10.1.2	VCSEL 的主要特点	209
10.1.3	VCSEL 的研究现状	210
10.2	VCSEL 在光通信领域的应用	224
10.2.1	光通信系统对光源性能的基本要求	224
10.2.2	VCSEL 在不同光通信系统中的应用	225
10.3	VCSEL 在传感领域的应用	228
10.3.1	基于 VCSEL 技术的气体传感	229
10.3.2	基于 VCSEL 的原子传感	230
10.4	VCSEL 在生物成像及微粒操纵方面的应用	232
10.4.1	基于 VCSEL 的生物成像技术	232
10.4.2	基于 VCSEL 的“光镊”技术	233
10.5	VCSEL 在雷达与照明方面的应用	234
10.5.1	VCSEL 用于激光雷达	234
10.5.2	VCSEL 用于激光照明	235
10.6	总结	235
	参考文献	236

第 11 章 半导体激光新应用

11.1	激光无线能量传输技术	241
11.2	激光推进技术	244
11.3	激光太空碎片清理	249
	参考文献	253

第1章

半导体激光器基础

1.1 半导体激光器发展历史

早在20世纪50年代末,苏联物理学家Basov就提出了粒子数反转理论,1961年首次公开发表论文,认为可以通过向PN结注入载流子实现受激辐射的可能性,同时论证了有源区附近,由于高密度的载流子可以造成有源区与周围的折射率有差值,从而产生光波导效应。这些理论为半导体激光器的出现奠定了基础,Basov也因此于1964年获得诺贝尔奖。

同一时期,关于采用GaAs、InP等直接带隙半导体取代Ge、Si等间接带隙半导体作为有源材料,更适合于产生受激辐射的理论也被Lax验证成功。半导体自然解理面可以作为光学谐振腔的光反馈镜面,加强受激辐射的现象也被美国贝尔实验室的Boyle等验证。1961年,Bernard与Duraffourg通过准费米能级的推导,建立了半导体有源介质中粒子数反转的条件。自此,在直接带隙半导体材料的PN结中,通过载流子注入的方法实现粒子数反转,通过电子和空穴复合所产生的受激光辐射,以及光学谐振腔影响下受激辐射的振荡和放大,激光器的三大基本条件全部凑齐。

1962年,美国四个实验室的科学家几乎同时宣布成功研制出了第一代半导体激光器——基于GaAs的PN同质结构注入型半导体激光器。由于此结构的激光器受激辐射的阈值电流密度非常高,需要 $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$,因此它只能在77K液氮制冷下才能以低频脉冲状态工作。尽管低温脉冲工作的同质结半导体激光器几乎没有实用价值,但是,作为半导体激光器的第一发展阶段,其诞生过程中构建的粒子数反转的基本理论、基于如何能够实现高效率受激辐射的材料体系的研究探讨、围绕如何形成光学谐振腔所进行材料解理和分析等大量的实验和探索工作,至今仍有着深远的意义和影响。从此开始,半导体激光器的研制与开发利用成为人们关注的焦点。截止到1963年12月,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国科学院半导体研究所分别采用精密研磨技术,突破了激光器谐振腔镜面的制作难关,成功在液氮(20K)冷却下实现了

GaAs 的 PN 同质结半导体激光辐射,与国际发展差距不到一年,是我国半导体激光发展的奠基和开始。

1963 年,美国的 Kroemer 和苏联的 Alferov 提出,通过把一个窄带隙的半导体材料夹在两个宽带隙半导体之间,可以构成单异质结的结构,从而在窄带隙半导体中可以获得高效率的辐射复合。早期的半导体同质 PN 结的制备工艺一直使用扩散法,直到新技术的诞生,如气相外延(VPE)、液相外延(LPE)等的发展。1967 年,成功利用 LPE 制备了世界上第一台室温脉冲下工作的半导体激光器。1970 年,美国贝尔实验室成功研究了 AlGaAs/GaAs 单异质结激光器,室温连续工作阈值电流密度为 $8.6 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$,比同质结激光器降低了 1 个数量级。单异质结注入型半导体激光器标志着半导体激光器的发展进入了可实用化的第二发展阶段,即半导体激光器的工作条件,从初始阶段的低温脉冲电流条件下工作发展到室温连续电流条件下工作,这是半导体激光器发展历史上划时代的进展,为半导体激光器能够实用化铺平了道路。

半导体激光器的第三发展阶段始于 1970 年双异质结结构的诞生。苏联和美国的科学家分别报道了双异质结激光器实现室温连续激射,其阈值比单异质结的半导体激光器低 1 个数量级。主要原因如下:

(1) 有源区材料的折射率大于两边包层材料的折射率,包层材料和有源区共同形成了光波导结构,使得大部分光能量限制在有源区,提高了光限制因子。

(2) 有源区两侧的包层材料采用的是比有源区材料带隙更宽的宽带隙半导体,有利于双异质结半导体激光器的载流子被有效地限制在有源区内产生高的增益。

双异质结构激光器的问世标志着半导体激光器的发展进入了新时期,是半导体激光器发展历史的第一次飞跃。自此,半导体激光器获得了突飞猛进的发展,其发展速度越来越快,应用范围也更加广泛,应用领域不断更新,主要表现在以下五个方面:

(1) 阈值电流密度不断降低。通过侧向增益波导结构和折射率导引的波导结构,进一步降低了阈值电流密度。

(2) 室温连续电流工作条件下,激射功率不断增加。

(3) 半导体激光器寿命不断延长。

(4) 不同波段的半导体激光器相继涌现。为适应同一时期发展起来的光纤通信技术,半导体激光器的波段从一开始进入应用的 $0.83 \sim 0.85 \mu\text{m}$,又拓展到 $1.55 \mu\text{m}$ 。

(5) 为满足单纵模,窄线宽、可调谐波长和动态单模工作等应用,分布布拉格反射(DBR)激光器和分布反馈布拉格(DFB)激光器等相继出现。

半导体激光器发展历史中的第四发展阶段,也是半导体激光器发展历史上的第二次飞跃,受益于量子阱激光器的诞生。

量子阱激光器拥有很低的阈值电流和比较高的微分增益。这是因为当有源区的窄带隙材料厚度降低到小于电子在该材料中的德布罗意波长时,两侧的宽带隙材料就成为势垒区,有源区就成了势阱区。受尺寸限制,势阱中的载流子状态在垂直阱壁的方向呈量子化分布,不需要很高的注入电流就可以实现粒子数反转。同时,在势阱的小尺寸材料中,电子和光子的耦合时间更短,因而具有很好的高速调制特性。

随着新材料、新结构的不断涌现,半导体激光器的电学性能和光学性能有了很大的提高。20世纪80年代以后,由于引入了半导体物理研究的新成果——能带工程理论,同时晶体外延材料生长新工艺如分子束外延(MBE)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)和化学束外延(CBE)等取得重大成就,制备量子阱的技术手段日趋成熟。

量子阱激光器的有源区尺寸很小,通常不到20nm,这限制了有源区中的光限制因子。因此,为了提高输出功率,提高动态增益谱宽,由多个量子阱和足够厚的势垒交替构成的多量子阱结构被引入半导体激光器中。

如果通过调整阱和势垒的晶格常数,在有源层厚度小于弹性形变的临界厚度的情况下引入一定的晶格失配产生的结构性压应变或张应变,则可以利用这个内建应力来改变能带结构,从而进一步改善量子阱激光器的性能。这种量子阱激光器又称为应变量子阱激光器。

1977年,日本东京工业大学的Kenichi Iga提出了垂直腔面发射激光器(VCSEL)的概念。由于这种激光器的光学谐振腔与半导体芯片的衬底垂直,因此能够实现芯片表面的激光发射。它具有低阈值电流、稳定单波工作时间长、可高频调制、容易二维集成、没有腔面阈值损伤等优点,因此受国内外学者的广泛关注。随着材料生长工艺的成熟和器件结构的优化,VCSEL在低阈值电流及室温工作等方面取得了一系列进展,并于1988年实现了室温连续激射。目前,VCSEL已经广泛应用于光通信、光互连、激光引信、激光显示、光信号处理以及芯片级原子钟等领域。

随着理论研究和制备工艺的发展,尤其是在美国超高效率半导体激光源(SHEDS)和高能半导体激光系统构架(ADHEL)、德国高能半导体激光(BRIOLAS)等项目的支持下,半导体激光器芯片结构、外延生长和器件封装等技术均有了很大的发展。半导体激光器以转换效率高、寿命长、体积小、质量小、可靠性高、能直接调制且易与其他半导体器件集成等特点,在军事、工业加工、激光医疗、光通信、光存储和激光打印等领域中有着非常广泛的应用。半导体激光器的发展已经进入历史新时期,各种新型激光器和新波段激光器层出不穷,大大推动了社会的发展和人类科学技术的进步。