

# 半导体激光器及其应用

黄德修 刘雪峰 编著

Semiconductor Lasers  
and Their Applications

国防工业出版社

# 半导体激光器及其应用

## Semiconductor Lasers and Their Applications

黄德修 刘雪峰 编著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

半导体激光器及其应用 / 黄德修, 刘雪峰编著. —北京:  
国防工业出版社, 1999. 5

ISBN 7-118-02064-8

I. 半… II. ①黄… ②刘… III. 半导体激光器 IV. TN  
248. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 01329 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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{5}{8}$  221 千字

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 18.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾铎

秘书长 崔士义

委员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

# 前 言

信息技术已成为当今全球性的战略技术。以光电子和微电子为基础所支持的通信和网络技术已成为高技术的核心,正在深刻影响着国民经济、国防建设的各个领域。其中,半导体激光器起着举足轻重的作用。

1962年出现的半导体激光器,以其转换效率高、体积小、重量轻、可靠性高、能直接调制以及与其它半导体器件集成的能力强等特点而成为信息技术的关键器件。其发展速度之快、应用范围之广、波长覆盖范围之宽都是其它任何类型激光器所不能比拟的。它的出现使得作为“信息基础设施”主体的光纤通信成为现实并得以迅速发展;使得以光盘为主体的信息存储技术及光复印技术不断更新换代。随着它的输出功率、相干性的不断提高,新材料和新结构的不断涌现,半导体激光器的应用已不再局限于信息领域,它也在材料加工、精密测量等方面一展宏图,显示出巨大潜力,正在迅速占领过去由气体和固体激光器所占据的一些市场。半导体激光器作为相干光泵浦源将使固体激光器发生革命性变革,获得新的生命力。

半导体激光器的一些独特优点使之非常适合于军事上的一些应用,如测距、致盲、对潜通信、制导、引信等,是光电对抗中的有生力量。

正是由于半导体激光器具有从紫外到近红外的一个极为宽广的范围内有着大量不同波长的激光输出,有着易维护、易操作、可靠性高等特点,很适合于在生物和医学方面的应用。尽管在这方面的应用还刚开始,但其应用前景是肯定的。

尽管半导体激光器已有相当辉煌的历程,但仍是当今光电子学中最活跃的研究领域,大有方兴未艾之势。新的有源材料和新的

器件结构仍不断涌现,使半导体激光器的性能不断提高;其激光波长继续向红外和紫外两个方向延伸,以满足对其日益增加的需要。半导体激光器也将是在下一世纪中获得重要发展的光子集成(PIC)和光电子集成(OEIC)中的核心器件。半导体激光器适合于大批量生产,这必然使生产成本和价格不断下降,从而进一步推动其应用。面对半导体激光器如此迅速的发展,面对其不断扩大的应用领域,我们有理由相信“半导体激光器及其应用”是一个“永无止境的命题。”限于作者的水平和该书的篇幅,只能就此搁笔。其中定有不足乃至错误之处,恳望有关专家与读者批评指正,以共同促进我国半导体激光器及其应用的发展。

作者深深感谢周炳琨院士、王启明院士和赵梓森院士对本书的撰写所给予的鼓励。感谢国防工业出版社基金评委会的专家们对本书初稿所提出的一些宝贵意见。感谢作者的博士生黄志坚、杨建良等在本书图表整理方面所给予的帮助。

作者  
于华中理工大学  
1998.8



# 目 录

第一章 半导体激光器的物理基础 .....	( 1 )
§ 1.1 半导体激光器的发明与发展 .....	( 1 )
§ 1.2 半导体中能带的基本概念及电子在能带之间的跃迁 .....	( 8 )
§ 1.3 半导体激光器的基本工作原理 .....	( 20 )
§ 1.4 光子反馈谐振 .....	( 28 )
第二章 半导体激光器的基本结构 .....	( 35 )
§ 2.1 概述 .....	( 35 )
§ 2.2 异质结半导体激光器 .....	( 40 )
§ 2.3 量子阱半导体激光器 .....	( 46 )
§ 2.4 表面发射激光器 .....	( 56 )
第三章 半导体激光器的主要性能 .....	( 67 )
§ 3.1 半导体激光器的阈值特性 .....	( 67 )
§ 3.2 半导体激光器的效率 .....	( 71 )
§ 3.3 半导体激光器的空间模式 .....	( 75 )
§ 3.4 半导体激光器的纵模 .....	( 83 )
§ 3.5 半导体激光器的线宽 .....	( 93 )
§ 3.6 半导体激光器的动态特性 .....	( 96 )
§ 3.7 半导体激光器的热特性 .....	( 102 )
§ 3.8 半导体激光器的可靠性 .....	( 107 )
第四章 半导体激光器在光纤通信中的应用 .....	( 113 )
§ 4.1 概述 .....	( 113 )
§ 4.2 光纤通信系统对半导体激光器的要求 .....	( 119 )
§ 4.3 高速光纤通信中的半导体激光器 .....	( 137 )
§ 4.4 半导体激光放大器(SLA)及其应用 .....	( 149 )
第五章 可见光半导体激光器及其应用 .....	( 161 )
§ 5.1 概述 .....	( 161 )

§ 5.2	可见光半导体激光器的材料体系和器件结构·····	(164)
§ 5.3	可见光半导体激光器的应用·····	(175)
<b>第六章</b>	<b>大功率半导体激光器及其应用</b> ·····	<b>(185)</b>
§ 6.1	概述·····	(185)
§ 6.2	大功率半导体激光器·····	(188)
§ 6.3	大功率半导体激光器泵浦固体激光器·····	(197)
§ 6.4	大功率半导体激光器泵浦光纤放大器·····	(210)
§ 6.5	大功率半导体激光器在生物和医学上的应用·····	(215)
<b>第七章</b>	<b>半导体激光器的光输出技术</b> ·····	<b>(221)</b>
§ 7.1	概述·····	(221)
§ 7.2	半导体激光器与单模光纤耦合的基本原理·····	(222)
§ 7.3	半导体激光器与单模光纤的光功率耦合·····	(229)
§ 7.4	半导体激光器的其它光耦合技术·····	(243)
<b>第八章</b>	<b>半导体激光器的安全使用和电源</b> ·····	<b>(247)</b>
§ 8.1	正向浪涌·····	(247)
§ 8.2	半导体激光对人身安全的影响·····	(253)
§ 8.3	半导体激光器的驱动电源·····	(255)

# Contents

Chapter 1 Physical Fundamental of Laser Diodes .....	( 1 )
1. 1 Development of Laser Diodes .....	( 1 )
1. 2 Basic Concept of Energy Band and Electron Transition between Bands .....	( 8 )
1. 3 Operational Principle of Laser Diodes .....	( 20 )
1. 4 Photon Oscillation in Cavity .....	( 28 )
Chapter 2 Basic Constructure of Laser Diodes .....	( 35 )
2. 1 Introduction .....	( 35 )
2. 2 Heterostructure Laser Diodes .....	( 40 )
2. 3 Quantum Well Laser Diodes .....	( 46 )
2. 4 Surface Emission Laser Diodes .....	( 56 )
Chapter 3 Principal Characterization of Laser Diodes .....	( 67 )
3. 1 Threshold of Laser Diodes .....	( 67 )
3. 2 Efficiencies of Laser Diodes .....	( 71 )
3. 3 Optical Beam Divergence of Laser Diodes .....	( 75 )
3. 4 Longitudinal Mode in Laser Diodes .....	( 83 )
3. 5 Linewidth of Laser Diodes .....	( 93 )
3. 6 Dynamic Characteristic of Laser Diodes .....	( 96 )
3. 7 Thermal Characteristic of Laser Diodes .....	( 102 )
3. 8 Reliability of Laser Diodes .....	( 107 )
Chapter 4 Applications of Laser Diodes in Fiber Communication .....	( 113 )
4. 1 Introduction .....	( 113 )
4. 2 Requirements for Laser Diodes in Fiber Communication .....	( 119 )
4. 3 Laser Diodes in High Rate Fiber Communication .....	( 137 )
4. 4 Semiconductor Laser Amplifiers(SLA)and Their Applications .....	( 149 )

<b>Chapter 5 Visible Laser Diodes and Their Applications</b> ...	(161)
5.1 Introduction .....	(161)
5.2 Materials and Configurations of Visible Laser Diodes .....	(164)
5.3 Applications of Visible Laser Diodes .....	(175)
<b>Chapter 6 High-Power Laser Diodes and Their Applications</b> .....	(185)
6.1 Introduction .....	(185)
6.2 High-Power Laser Diodes .....	(188)
6.3 Solid-State Lasers Pumped with High-Power Laser Diodes ...	(197)
6.4 Fiber Amplifiers Pumped with High-Power Laser Diodes .....	(210)
6.5 Biological and Medical Applications of High-Power Laser Diodes .....	(215)
<b>Chapter 7 Coupled Optics for Laser Diode Output</b> .....	(220)
7.1 Introduction .....	(221)
7.2 Basic Principle Coupling Laser Diodes with Single-mode Fiber .....	(222)
7.3 Coupled Optics between Laser Diodes and Single-mode Fiber .....	(229)
7.4 Other Coupling Technologies Coupling Output from Laser Diodes .....	(243)
<b>Chapter 8 Security Operation and Electrical Drive Source of Laser Diode</b> .....	(247)
8.1 Electrical Surge Damage for Laser Diode .....	(247)
8.2 Laser Safety for Human .....	(253)
8.3 Electrical Drive Source of Laser Diode .....	(255)

# 第一章 半导体激光器的物理基础

## § 1.1 半导体激光器的发明与发展

在分析半导体激光器的有关物理基础之前,回顾一下它的发展历程是有益的,其中的一些主要论点也将是本书内容的基础。

### 一、半导体激光器出现的理论基础

尽管一些文献的作者强调各自在开创半导体激光器中所起的重要作用,但事实上没有一个人对半导体激光器的出现提出完整的理论依据,也没有一个早期的研究工作者为实现半导体激光器而解决了所有的工艺技术问题。因此,可以认为,半导体激光器的出现和发展是许多研究工作者共同智慧的结晶。

早在 1953 年 9 月,美国的冯·纽曼(John Von Neumann)在他一篇未发表的论文手稿中第一个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;计算了在两个布里渊区之间的辐射跃迁速率。巴丁(J. Bardeen)在总结冯·纽曼关于半导体激光器的基本理论后认为,通过各种方法(例如向 PN 结注入少数载流子)扰动导带电子和价带空穴的平衡浓度,致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。这应该说是激光器(Laser)的最早概念,这比戈登(Gorden)和汤斯(Towes)所报告的微波量子放大器(Maser)的概念还要早一年。

Ecole Normale Superieure 的 Pierre Aigrain 在 1956 年就曾鼓励美国无线电公司(RCA)的 Pankove 着手制造半导体激光器。

1107903

1958年6月他在布鲁塞尔的一次国际会议上的发言中,第一个公开发表了半导体中得到相干光的观点,但直到1964年他才公开发表文章论述半导体激光器的理论与实验工作。

苏联列别捷夫物理研究所的巴索夫(Basov)等对半导体激光器的杰出贡献,在于他于1958年首次公开发表文章提出在半导体中实现负温态(即粒子数反转)的理论论述。他们又于1961年最先公开发表将载流子注入半导体PN结以实现“注入激光器”的论述,并论证了在如隧道二极管中那样高度简并的PN结中实现粒子数反转(这是产生受激发射的必要条件)的可能性,而且还认为有源区周围高密度的多数载流子造成有源区边界两边的折射率有一差值,因而产生光波导效应。这些理论对其后半导体激光器的出现起了积极的促进作用,巴索夫因此而得到诺贝尔奖金。然而,1963年前,巴索夫等所发表的关于半导体激光器的理论与实验的文章多是以半导体Ge为有源材料的。而腊克斯(Lax)在1959年曾提出直接带隙半导体(如GaAs、InP等)是比间接带隙半导体(如Ge、Si等)更适合于产生受激发射的材料。这一重要论断的正确性为后来所出现的半导体激光器所证实。

1960年贝尔实验室的布莱(Boyle)和汤姆逊提出了用半导体的平行解理面作为产生光反馈的谐振腔,这对加强受激光发射来说是必需的。光学谐振腔是激光器不可缺少的组成部分。

1961年伯纳德(Bernard)与杜拉福格(Duraffourg)利用准费米能级的概念推导出在半导体有源介质中实现粒子数反转的条件。这一条件对次年半导体激光器的研究成功起到了重要的理论指导作用。

综上所述,理论上认为半导体激光器应该是在直接带隙半导体PN结中,用注入载流子的方法实现由伯纳德—杜拉福格条件所控制的粒子数反转;由高度简并的电子和空穴复合所产生的受激辐射在光学谐振腔内振荡并得到放大,最后产生相干激光输出。

## 二、1962 年出现半导体激光器

在上述理论的直接和间接影响,以及 1960 年产生的红宝石激光器的推动下,美国和苏联的科学家加紧了对半导体激光器的研究。特别是 1962 年元月,梅贝格(S. Mayburg)报告了可以从 GaAs PN 结中得到 100%的荧光量子效率,致使在 1962 年后期美国的四个实验室几乎同时宣布研制成功 GaAs 同质结半导体激光器,如表 1.1.1 所示。

1963 年巴索夫也报导研制成 GaAs PN 结半导体激光器。

表 1.1.1 有关“第一代”半导体激光器所发表的文献情况

论文题目	作者(所在单位)	收稿日期	发表杂志及日期
1. Coherent light emission from GaAs junction	R. N. Hall, G. E. Fenner, et al (通用电气, Schenectady)	1962. 9. 24	Phys. Rev. Lett., 1962. 11. 1
2. Stimulated emission of radiation from GaAs PN junction	M. I. Nathan, W. P. Dumke, et al (国际商业机械公司)	1962. 10. 6	Appl. Phys. Lett., 1962. 11. 1
3. Coherent ( visible ) light emission from Ga(As <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> ) junction	N. Holcyak, Jr. and S. F. Bevacqua (通用电气, Syracuse)	1962. 10. 17	Appl. Phys. Lett., 1962. 12. 15
4. Semiconductor Maser of GaAs	T. M. Quist, R. H Rediker, R. J. Key, et al (林肯实验室)	1962. 10. 23	Appl. Phys. Lett., 1962. 12. 1

以上提及的“第一代”半导体激光器的研究工作者作出了重要的贡献。因为在他们之前为数极少的有关在半导体材料中产生受激发射的公开论述,并未使他们得到足够的启示。在围绕着使用什么样的半导体材料来得到高效率的受激光发射,如何形成光学谐振腔,如何检验是否产生激光输出和如何评价半导体激光器的输出特性等问题上,他们作了有成效的探索和实践。例如,选用直接带隙半导体 GaAs 作有源材料;用晶体的自然解理面作光学谐振腔;从输出光束光谱线宽的变窄和远场特性的变化来判断激光的产生等。尽管上述“第一代”半导体激光器均为同质结构,只能在液氮温度下脉冲工作,因而毫无实用价值,但他们的一些基本理论与实践至今仍是具有意义的。

### 三、实现半导体激光器在室温下连续工作(1962—1970年)

上述同质结构的半导体激光器经历了5年时间的徘徊,人们对半导体激光器的前途曾一度产生怀疑,甚至一些早期半导体激光器的开创者也因当时的半导体激光器一直不能在室温下工作而中途退却。但当时的贝尔实验室固体研究室主任高尔特(Golt)科学地预见到,室温连续工作的半导体激光器将在未来的光通信上发挥重要作用。1967年在半导体激光发展史上一个重要的突破是一反过去用扩散法形成同质PN结的惯例,而用液相外延的方法制成了单异质结激光器,从而实现了在室温下脉冲工作的半导体激光器。时隔3年(1970年),贝尔实验室的研究工作者又一举实现了双异质结构的半导体激光器,使半导体激光器出现了划时代的进展——在室温下连续工作。这也许是使贝尔实验室至今在光纤通信上处于领先地位的基点之一。

在这一期间,半导体激光器的研究工作主要集中在以下几个方面:

(1) 围绕着实现 GaAs 注入半导体激光器在室温下连续工作,对其结构进行了深入的研究,异质结构是一大突破。为改善半导体激光器的工作特性,在对注入有源区的载流子和其内由辐射复合所产生的光子进行了限制,研究了多元固溶体形成良好结晶的外延生长方法。

(2) 寻找新的半导体激光材料,扩展激光的波段范围和改善激光器的发射特性。在几年之内,从远紫外到远红外的一个广阔波段范围内探索了不少能产生受激光发射的材料,其中包括至今仍广泛使用的  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  和  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ 。

(3) 为了使半导体激光器得到实际应用,对激光器的动态特性进行了研究。

### 四、半导体激光器的飞速发展

自1970年后,半导体激光器得到了突飞猛进的发展。其发展速度之快,应用范围之广,发展潜力之大是目前任何其它激光器所无法比拟的。其所以如此,有两个重要的原因。



### 1. 半导体激光器有许多突出的优点

(1) 半导体激光器是直接的电子—光子转换器,因而它的转换效率很高。理论上,半导体激光器的内量子效率可接近 100%,实际上由于存在某些非辐射复合损失,其内量子效率要低许多,但仍可以达到 70%以上。

(2) 半导体激光器所覆盖的波段范围最广。可以通过选用不同的半导体激光器有源材料或改变多元化合物半导体各组元的组分,而得到范围很广的激射波长以满足不同的需要。

(3) 半导体激光器的使用寿命最长。目前用于光纤通信的半导体激光器,其工作寿命可达数十万乃至百万小时。

(4) 具有直接调制的能力是半导体激光器有别于其它激光器的一个重要特点。

(5) 半导体激光器的体积小、重量轻、价格便宜,这也是其它激光器无法比拟的。

### 2. 实际应用与半导体激光器的发展相互促进

早在 1967 年单异质结激光器出现以前,当时的英籍华裔学者高锟博士于 1965 年首先提出了用光导纤维来传输信息的理论与初步实验。但当时光纤的损耗为 1000dB/km,和当时的同质结半导体激光器只能在液氮温度工作的处境一样,如此大损耗的光纤也是毫无实用价值的。但人们注意到了用光纤代替同轴电缆的明显优越性,贝尔实验室更是认识到半导体激光器在光纤通信中的重要作用,从而开始了半导体激光器与光纤技术并驾齐驱发展的年代。在半导体激光器实现室温下连续工作的 1970 年,光纤的损耗也大幅度下降到 20dB/km。其后,发展了各种各样的条形半导体激光器,使其阈值电流或所需的工作电流不断降低,从而工作的稳定性和器件的寿命不断提高。与此同时,光纤的损耗也不断下降,致使 1978 年在美国亚特兰大实现世界上第一条商用光纤通信线路。这种发展速度在通信史上也是空前的。

最早进入实用的半导体激光器,其激射波长为  $0.83 \sim 0.85 \mu\text{m}$ 。这对应于光纤损耗谱的第一个窗口,多模光纤的损耗达