

半导体科学与技术丛书

半导体光放大器 及其应用

黄德修 张新亮 黄黎蓉 编著



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

半导体光放大器及其应用

黄德修 张新亮 黄黎蓉 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

半导体光放大器是一种处于粒子数反转条件下的半导体增益介质对外来光子产生受激辐射放大的光电子器件,和半导体激光器一样,是一种小体积、高效率、低功耗和具有与其他光电子器件集成能力的器件。尽管掺铒光纤放大器(EDFA)后来居上,在光纤通信中获得应用,但半导体光放大器在光纤通信网络中应用前景仍不容置疑。

本书共分9章,前4章介绍半导体光放大器的原理、器件结构、性能参数和可能产生的应用。第5章介绍半导体光放大器增益介质的不断改进和相应的性能改善,特别介绍低微量子材料的性能对半导体光放大器性能提高的影响。第6~8章分别阐述半导体光放大器在全光信号处理的几个不同方面的应用研究结果。第9章介绍半导体光放大器作为一个重要器件参与光电子集成的关键技术。

该书可供从事半导体光放大器研究和应用的研究生或工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

半导体光放大器及其应用/黄德修,张新亮,黄黎蓉编著. —北京:科学出版社, 2012

(半导体科学与技术丛书/夏建白主编)

ISBN 978-7-03-033531-9

I. ①半… II. ①黄… ②张… ③黄… III. ①半导体-激光放大器
IV. ①TN722.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第021180号

责任编辑:钱俊/责任校对:鲁素

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年3月第一次印刷 印张:20

字数:377 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有抖

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

序 一

早在 1983 年黄德修同志从美国结束进修回国，与我讨论光纤通信中的关键光电子器件时，正值我主持由武汉邮电科学研究院于 1982 年完成我国第一条光纤通信示范系统（即所谓“八二工程”）后不久。该系统只是一条从武昌跨越长江大桥经汉阳至汉口江岸区、全长 13km 和传输速率仅 8Mb/s 的市内通信线路，连接武汉市 2、5、4、7 总局和分局。接着在光纤通信国家项目“34Mbps 长途光纤通信线路”中，为了保证光信号到终端有足够的强度，在一定距离需要设立中继站把光信号放大。当时采用的是光-电-光中继站，在中继站中需用光探测器将光信号变成电信号，然后对电信号放大，再将电信号调制半导体激光器又变成光信号下传。这是一个繁琐的信号再生过程，迫切需要能直接补偿光纤损耗的光放大器来取代中继站。因此我建议黄德修同志进行半导体光放大器的研究，他接受了我的建议，这几乎是与国际上同步进行的一个研究课题，并无相关经验可以借鉴。然而，黄德修同志和他领导的课题组运用半导体光电子学、光学等方面的知识，很快于次年就研制出半导体光放大器并用其对光信号进行直接放大的原理性试验，黄德修同志领导的课题组也是国内最早进行半导体光放大器研究的一个团队。他们的研究成果很快得到当时由叶培大先生领导的国家关于光纤通信攻关计划的支持。此后，他们不断获得一些半导体光放大器的研究成果，又持续得到国家“863”计划的支持。我一向提倡高等学校与企业优势互补地合作进行科学研究，积极促进黄德修教授与武汉邮电科学研究院电信器件公司合作研究半导体光放大器，他们取得了不少合作成果。

目前在光纤通信中广泛使用的是掺铒光纤放大器，在超长距离传输中还用到了光纤拉曼放大器。然而，由于半导体光放大器具有体积小、功耗低、价格便宜和具有光子集成的能力等特点，它在光纤通信网络中特别是光信号处理方面的应用具有独特的优势，尤其是在光交换、集成光器件的应用方面，其潜力还有待深入挖掘。

黄德修教授长期不懈坚持研究半导体光放大器，不断开拓半导体光放大器在光纤通信网络应用的研究。欣闻《半导体光放大器及其应用》即将由科学出版社出版，

这是黄德修教授和他的课题组 20 多年对半导体光放大器研究成果的总结。我相信这是我国迄今为止关于半导体光放大器方面的第一部学术专著,定有阅读和参考价值。

赵梓森

2010 年 3 月

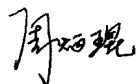
序 二

华中科技大学黄德修教授主持撰写的著作《半导体光放大器及其应用》即将由科学出版社出版,我非常高兴。这是他和他的领导的团队对半导体光放大器长期坚持、不懈努力研究的结晶。

半导体光放大器是一种颇具研究意义和实用价值的光电子器件,是通过半导体材料中电子与光子相互作用而对外来光信号进行放大的器件。在掺铒光纤放大器(EDFA)实用以前,人们曾期待半导体光放大器用于光纤通信传输系统,对经光纤损耗而减弱的光信号直接放大,试图取代光-电-光的中继方式,这是很有意义的。因此在“863”计划启动后,当时的“863-307”专家组于1987年就立项支持了黄德修教授课题组承担该项目的研究。该课题组朝气蓬勃、努力创新,取得了不少好的成果,并于1991年被当时的国家科学技术委员会(现国家科技部)以创新群体的荣誉称号对该课题组予以表彰。1992年至1996年黄德修教授也受聘为“863-307”专家组成员,我们有较长时间的愉快合作与共事。他工作认真负责,治学严谨。

由于EDFA在光纤通信中的成功应用,半导体光放大器的应用前景曾一度受到质疑。但与此同时,半导体光放大器在光纤通信网络中的全光信息处理方面却显示了它新的生命力,诸如全光波长变换、光开关阵列、全光2R或3R再生、光子逻辑和码型变换等。黄德修教授课题组在国家“863”计划、“973”计划和国家自然科学基金等的持续支持下,除了通过用量子阱、量子点半导体材料不断提高半导体光放大器本身性能外,还较广泛地探索了其在全光信号处理方面的应用,取得了诸多成果和贡献,在国内外学术刊物上发表了多篇研究论文。

现在,半导体光放大器及其应用已受到国内外广泛关注。该书的出版必将推动我国光电子器件的研发和应用的发展,该书对从事半导体光放大器方面研究的科学工作者都是具有参考价值的。



2010年4月

前 言

1981 年我有幸作为访问学者去美国俄勒冈研究中心进修，原来对方给我的任务是研究激光散斑，但在查找资料时我深感光纤通信颇具发展前景，而其中半导体光电子器件是关键和基础。依据我出国前在半导体电子学和固体激光研究的一点基础，经对方同意将我的研究方向转到半导体光电子学，具体研究高速半导体光导开关。1983 年回国后在寻找相关研究项目时，我有幸见到了时任武汉邮电科学研究院系统部总工程师赵梓森院士。他当时正主持我国第一条商用光纤通信系统，在武汉这条仅 13km 长的市话光纤通信系统中就用了两个“光-电-光”中继站。在赵梓森院士和我的交谈和讨论中我深感直接放大光信号取代“光-电-光”中继的重要意义，他建议我研究半导体光放大器，并很快得到时任武汉邮电科学研究院总工程师杨恩泽教授的支持，在院科研基金中立项资助 6 万元以启动该项研究。

1993 年底，当时国家科委高技术司马俊如司长和翼复生副司长听取我的汇报后，立即决定从国家“六五”攻关剩余经费中拿出 4 万元并在叶培大院士领导的光纤通信“六五”攻关课题组中立项研究半导体光放大器。当时国际上关于半导体光放大器方面的研究也刚起步，无多少公开发表的文献可供参考。我们只是从半导体激光器能放大内部光子、也应能对外来光子产生增益这一简单的概念出发，在一无所有的情况下开始构建相关实验。通过层层审批从美国进口一台光功率计，从上海买了一台较便宜的示波器，利用武汉电信器件公司无偿提供的半导体激光器芯片，用固定在微调架上的透镜耦合输入和输出光信号，后来又进一步对光纤微透镜处理进行耦合。从开始进行法布里-珀罗型半导体光放大很快就转到研究具有实用价值的行波型放大，不断取得进展，得出有关半导体光放大器的一些规律性认识。点滴成绩得到了国家“六五”攻关的总结表彰，并得到国家“七五”攻关计划的进一步支持。1987 年国家“863”计划开始实施，我们的研究在专家委员会成员实地考察和调研后得以立项支持。在当时由周炳琨院士领导的“863-307”专家组的鼓励和支持下，我们的研究工作不断取得进展。由简单地观察光放大作用到对光放大器性能参数进行优化，并创造性地提出和实施单端耦合输入与输出的新结构，申请了发明专利，并于 1991 年获国家发明三等奖。“忆往昔，峥嵘岁月稠”。当时课题组仅有我和刘德明、余思远、刘雪峰、周宓、黄菊仙几位年轻人。大家团结合作，经常工作到深夜凌晨，克服一个又一个现在看来简单而当时需要不断摸索的困难。我们课题组被国家科委“863”领导小组表彰为创新群体。其中刘德明同志在 1984

年于电子科技大学获硕士学位后就加盟我们课题组,他工作刻苦、勤于思考、敢于创新,起到了很好的模范带头和骨干作用,曾获得“863”计划先进个人的表彰。

尽管1994年后由于EDFA在光纤通信系统中获得成功应用,而对半导体光放大器的前景产生质疑,但历届“863”计划专家组高瞻远瞩,仍积极支持与鼓励我们不断进取至今。期间,我们还参加了以罗毅教授为首席的“973”课题,进行了半导体光放大器用于光信号处理方面的研究。

20多年来,我们从FP-SOA到TW-SOA,增益介质由最初的GaAlAs(增益峰值波长为850nm)到InGaAsP(1310nm、1550nm),从体材料到量子阱、量子点材料,从研究SOA器件到SOA在全光信号处理等方面的应用进行了较广泛的探索和研究,取得了点滴成果,获得国家、省部级多项科技奖励。在国内外发表相关学术论文近200篇。在研究过程中培养了数十名硕士和博士,其中包括刘德明和本书的其他两位作者张新亮和黄黎蓉同志,他们分别在半导体光放大器在全光信号处理方面的应用、半导体光放大器材料和器件方面取得了一些好的成绩,从获得博士学位到成为博士生导师,又到承担相关课题培养他们自己指导的博士生,都得益于我们承担的半导体光放大器课题。

本书共分9章,前4章由黄德修执笔,第6~8章由张新亮执笔,第5章和第9章由黄黎蓉执笔。

本书仅是我们多年承担半导体光放大器及其应用课题的一个粗浅的总结,定有不妥和疏漏之处,望同仁不吝指教!借此机会,感谢赵梓森院士、周炳琨院士长期以来的指教和为本书作序;感谢国家科技部的攻关计划、“863”计划和历届专家组的鼓励与支持;感谢国家自然科学基金委员会支持多项关于半导体光放大器的相关理论研究;感谢华中科技大学在我们承担课题过程中给予的条件保障;感谢中国科学院科学出版基金的支持和本书责任编辑钱俊同志的积极配合;感谢张哲民、黄志坚、段子刚、洪伟、李培丽、缪庆元、董建绩、余宇、周恩波、田芃等博士和其他许多硕士,他们在攻读学位期间勤奋工作的成果也丰富了本书内容;感谢赵茗博士和严莎女士为整理本人撰写的部分文稿所给予的帮助;感谢所有关心和爱护我们的朋友们!

黄德修

2011年9月于华中科技大学

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 半导体光放大器概述	1
1.1.1 半导体光放大器的出现和发展	1
1.1.2 光纤通信的需求拉动了半导体光放大器的发展	3
1.1.3 半导体光放大器受到光纤放大器的严重挑战	7
1.2 半导体光放大器的发展机遇	11
1.3 半导体光放大器在光信号处理方面的应用	14
参考文献	19
第 2 章 半导体光放大器的基本原理	21
2.1 引言	21
2.2 半导体物理基础概要	22
2.3 光子态密度	26
2.4 半导体增益介质粒子数反转条件与增益系数	26
参考文献	32
第 3 章 半导体光放大器的性能	33
3.1 引言	33
3.2 半导体光放大器的增益特性	34
3.3 半导体光放大器的噪声特性	40
3.4 半导体光放大器的增益动力学	43
参考文献	45
第 4 章 半导体光放大器主要制造工艺	47
4.1 概述	47
4.2 减少芯片端面剩余反射的影响	48
4.3 半导体光放大器与光纤的耦合与封装	52
参考文献	56

第 5 章 基于低维量子结构和应变效应的半导体光放大器	58
5.1 低维量子结构	58
5.1.1 超晶格、量子阱、量子线和量子点的概念	58
5.1.2 超晶格、量子阱、量子线和量子点的制作	66
5.1.3 量子短线	70
5.2 应变效应	71
5.2.1 压应变、张应变	72
5.2.2 应变对能带结构和增益偏振相关性的影响	73
5.3 增益偏振无关的 SOA	76
5.3.1 增益偏振无关的应变量子阱及超晶格 SOA	77
5.3.2 增益偏振无关的张应变体材料 SOA	81
5.4 量子点 SOA	84
5.4.1 QD SOA 的特点	84
5.4.2 1.3 μm 和 1.5 μm 的 QD SOA	91
5.5 量子短线 SOA	94
5.6 宽增益谱的 QW SOA	96
5.7 宽增益谱的 QD SOA	100
参考文献	103
第 6 章 SOA 中非线性效应及理论分析模型	107
6.1 SOA 中的基本方程	107
6.1.1 基本传输方程	107
6.1.2 载流子速率方程	110
6.1.3 非线性极化过程理论描述	111
6.2 SOA 中的非线性效应	114
6.2.1 常用三种非线性效应过程	114
6.2.2 超快非线性效应过程	115
6.3 SOA 的小信号分析解析模型	117
6.3.1 Davies 的小信号分析模型	117
6.3.2 Mecozzi 的模型	119
6.3.3 Marcenac 的模型	121
6.4 SOA 非线性应用理论分析模型及数值求解	123
6.4.1 常用 SOA 应用的理论模型	123
6.4.2 考虑端面反射和宽带 ASE 谱的 SOA 动态和静态分析模型求解	127
6.5 SOA 载流子恢复特性改善	135

6.5.1 常规载流子恢复加速方案	136
6.5.2 端面反射率对 SOA 动态特性的影响	139
参考文献	141
第 7 章 基于 SOA 的全光波长转换	143
7.1 概述	143
7.2 交叉增益调制型全光波长转换器	144
7.3 交叉相位调制型全光波长转换器	147
7.4 FWM 型全光波长转换器	151
7.5 瞬态交叉相位调制型全光波长转换器	155
7.5.1 增益恢复加快机理	156
7.5.2 同相和反相波长转换的理论分析	157
7.5.3 40Gbit/s 同相和反相波长转换器的实验研究	162
7.6 全光波长转换器中滤波过程的优化	164
7.6.1 优化模型	165
7.6.2 实验验证	168
参考文献	170
第 8 章 SOA 及波长转换器的典型应用	173
8.1 基于 SOA 的全光逻辑门	173
8.1.1 基于 XGM 效应的全光逻辑门	173
8.1.2 基于 XPM 效应的全光逻辑门	175
8.1.3 基于 SOA 中 T-XPM 效应及 FWM 效应的多功能全光逻辑门	180
8.1.4 基于 T-XPM 效应的全光加法器	182
8.1.5 基于延时干涉仪和 SOA 的全光最小项	186
8.2 基于 SOA 的全光码型转换	191
8.2.1 基于 XPM 效应实现 NRZ 到 RZ 的码型转换	192
8.2.2 基于 SPM 效应实现 NRZ 到 PRZ 的码型转换和脉冲整形	196
8.2.3 基于 SOA 和 DI 的全光码型转换	198
8.2.4 基于 SOA 和 DI 的多信道再生型全光码型转换	201
8.3 基于 SOA 的全光 UWB 信号产生	207
8.3.1 基于 SOA 的 XPM 效应产生 monocycle 信号	208
8.3.2 基于 SOA 的增益饱和特性产生 monocycle 信号	211
8.3.3 利用 XGM 效应产生 monocycle 信号的改进方案	214
8.3.4 基于 SOA 的超宽带 doublet 产生方案	217
8.4 基于 SOA 的微波光子学滤波器	219

8.4.1 基于 ASE 的单级高 Q 微波光子学滤波器	219
8.4.2 基于 IIR 和 FIR 的混合型级联滤波器方案	221
8.4.3 基于两个 IIR 级联的高 Q 微波光子学滤波器	225
8.5 SOA 的其他方面应用概述	229
8.6 SOA 应用总结	231
参考文献	234
第 9 章 光电集成中的 SOA	236
9.1 光电集成概述	236
9.1.1 光电集成概念	236
9.1.2 光电集成分类	237
9.1.3 光电集成的技术挑战	239
9.2 光电集成的典型制作工艺	241
9.2.1 概述	241
9.2.2 对接再生长	242
9.2.3 选区外延生长	242
9.2.4 量子阱混合	243
9.2.5 键合	245
9.3 光子集成中的光波导及其耦合	246
9.3.1 光子集成中的光波导	246
9.3.2 有源波导和无源波导之间的耦合	248
9.4 SOA 在光电集成中的应用概述	249
9.5 旨在改善 SOA 性能的集成	250
9.5.1 SOA 和模斑转换器的集成	250
9.5.2 增益钳制 SOA	256
9.5.3 多段式 SOA	259
9.6 多个 SOA 之间的集成	261
9.6.1 SOA 光开关阵列	261
9.6.2 基于 SOA 集成的波长转换器	264
9.7 SOA 与半导体激光器的集成	269
9.7.1 利用 SOA 线性放大作用提高 LD 的输出光功率	269
9.7.2 SOA 作为调制器, 与 LD 集成构成调制光源	271
9.7.3 SOA 和 LD 集成应用在波长转换中	273
9.7.4 SOA 作为光开关, 消除可调谐 LD 波长切换中的瞬态模式	275
9.8 SOA 与电吸收调制器的集成	276

9.9 SOA 与激光器、调制器的高功能集成	278
9.10 SOA 与超辐射发光管的集成	280
9.11 SOA 与光探测器的集成	282
9.12 SOA 与阵列波导光栅的集成	284
9.13 SOA 与微环谐振器的集成	288
9.13.1 微环谐振器简介	289
9.13.2 微环与 SOA 的集成	292
参考文献	295

第 1 章 绪 论

1.1 半导体光放大器概述

1.1.1 半导体光放大器的出现和发展

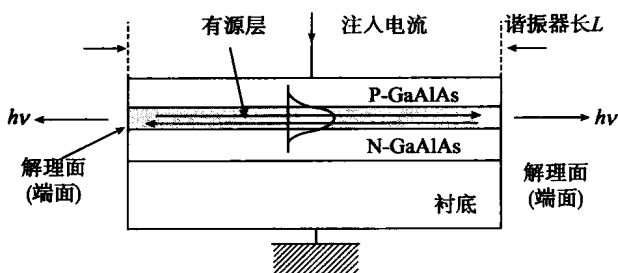
半导体光放大器(semiconductor optical amplifiers, SOA)曾被称为半导体激光放大器(semiconductor laser amplifiers, SLA)或激光二极管放大器(laser diode amplifiers)。顾名思义,半导体光放大器是以半导体材料作为增益介质、能对外来光子进行放大或提供增益的光电子器件。

激光器(laser, light amplification by stimulated emission of radiation)也曾被称作光放大器,是对增益介质内部产生的光子的谐振放大,即光子在谐振腔内谐振过程中不断放大,故后来将 laser 称为激光振荡器或激光器,以区别于对外来光子进行放大的光放大器。激光器和光放大器的共同特点是都需有增益介质;都能使光子在增益介质内引起高效的受激辐射;都需要为受激辐射所满足的粒子数反转条件提供所需的能源(电能和光能)。因此,无论是激光器还是光放大器,粒子数反转都是必要条件。粒子数反转与光增益是同一过程的两种不同描述。增益是用来衡量增益介质内部粒子数反转程度这一物理概念的技术表征。

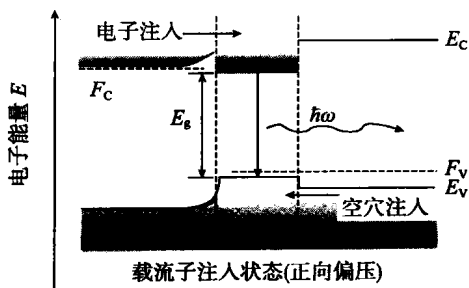
既然光放大器与激光器的本质区别只是所要放大的光子的来源上的差别,因此对光放大器的研究完全可以在激光器的基础上进行。1960 年美国贝尔实验室的肖洛(A. L. Schawlow)和唐斯(C. H. Townes)研究出以红宝石为增益介质的世界上第一台激光器,它是以前出现的微波量子放大器(maser)向光频领域的延伸。在科学家们广泛探索其他固体介质(钕玻璃、掺钕钇铝石榴石即 Nd:YAG)、气体介质(He-Ne、CO₂等)的同时,前苏联的列别捷夫物理研究所和美国的 4 个单位(MIT 的林肯实验室、IBM 和通用电器(GE)的两个研究所)于 1962 年几乎同时研究出以半导体 GaAs 为增益介质的半导体激光器。虽然那时采用具有直接带隙(理论上能高效产生受激辐射)的 GaAs 增益介质,但都是对 GaAs 不同部分分别掺入施主和受主杂质所构成的 pn 结,即两部分都具有相同的禁带宽度或带隙(E_g)的所谓同质结,这种结构对注入的电子和由其辐射跃迁产生的光子都无有效的限制,致使这种 pn 结激光器的阈值电流密度达 10^4A/cm^2 量级。极低的量子效率使它只能在液氮工作温度下(77K)通过抑制注入载流子的扩散才能勉强工作,甚至是昙花一现(最短的工作时间只有

数秒)。尽管德国西门子公司的研究工作者也曾在这种激光器基础上进行过光放大的基础试验,但同样不可能取得好的结果。

需求的拉动永远是社会发展和技术推动的力量源泉。正当同质结半导体激光器历经 5 年陷入绝境、原来发明半导体激光器的几个单位一筹莫展而纷纷退出的时候,英籍华人高锟(Charles Kao, 2009 年诺贝尔物理学奖获得者)和乔治·何克汉(George Hockham)在 1966 年提出用石英玻璃纤维传输光载波所携带的信息,以解决双绞铜线的电话通信容量问题。显然,仅有灰尘大小的半导体激光器被期待为光纤通信的理想光源。以通信技术著称的美国贝尔实验室固体研究室的主任高尔特(Galt)注意到了这一重大的需求,组织科学家研究异质结半导体激光器,在同质 pn 结的基础上,在 p 型 GaAs 面上再外延生长一层比 GaAs 带隙更宽的 P 型 GaAlAs 层,利用 GaAs 与 GaAlAs 之间的带隙差所构成的异质结及由此形成的异质结势垒对注入电子进行限制;同时异质结两边半导体材料的折射率差所产生的光波导效应对所产生的光子也进行了一定的限制。这一科学的思路非常奏效,科学家于 1967 年一举将这种单异质结半导体激光器的阈值电流降低了一个数量级(10^3 A/cm^2),从而可以在室温下脉冲工作。在这一成果的鼓舞下,人们进一步将原来同质结的 n-GaAs 也由宽带隙 N-GaAlAs 替代,形成有助于电子注入(超注入)的另一异质结(N-GaAlAs/p-GaAs),从而形成分别如图 1.1.1(a)和(b)的双异质结构和相应的能带



(a) 沿光轴方向的截面图



(b) 能带图

图 1.1.1 双异质结结构和相应的几何空间能带