



光放大器及其应用

杨祥林 等编著

TN722.3



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

TN722.3

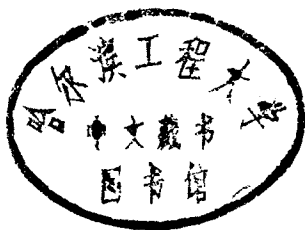
Y28

465415

高等学校电子信息类规划教材

光放大器及其应用

杨祥林 等编著



00465415

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系全国电子信息类专业九五出版规划中的重点教材,是在作者十余年来教学和科研基础上总结整理而成。全书共分10章,重点讨论掺杂光纤放大器的理论及其在光纤通信领域的应用。第1、2章概述光放大器的理论与技术基础,第3、4章阐述掺铒光纤放大器的基本理论、基本特性与结构设计,第5章掺铒与掺镨光纤放大器,第6章为分布式光纤放大器,第7章为半导体光放大器,第8章到第10章介绍光放大器的应用,内容分别为光放大器在数字光纤通信系统中的应用、光放大器在模拟光纤通信系统中的应用、光放大器在光纤通信网中的应用。

本书概念清晰、论述严谨、内容新颖、重点突出、图文并茂。既重视基本概念的阐述,又有系统深入的理论分析,并密切联系各类放大器的结构特性和各类应用系统,使用专业范围广。本书既是研究生和高年级学生学习光信息科学技术的好教材,也可作为科技书供科技人员阅读与参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

光放大器及其应用/杨祥林等编著. - 北京:电子工业出版社,2000.6

高等学校电子信息类规划教材

ISBN 7-5053-5686-0

I. 光… II. 杨… III. 激光放大器-高等学校-教材 IV. TN722.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 76241 号

丛 书 名: 高等学校电子信息类规划教材

书 名: 光放大器及其应用

编 著 者: 杨祥林 等

责任编辑: 连潮东

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者:

装 订 者: 北京李史山胶印厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.75 字数: 326.4 千字

版 次: 2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-5686-0
G·483

印 数: 2500 册 定价: 25.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;
若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校,中等专业学校,出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办经与各专指委、出版社协商后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

序

在信息和通信技术的发展过程中,为了提高通信容量和改善传输性能,要求产生和传输电磁波的新机制和新方案,希望能从电通信进化至光通信。60年代,发现了半导体材料中的光受激发射现象,导致发明半导体激光器。1966年,华裔发明家高锟(Charles K. Kao)博士和他的同事发表有关介质光波导的著名文章,从理论上证明了石英光纤实现光信号传输与通信的可行性,促使光纤通信开始发展。70年代初起,多模和单模光纤相继拉制成功,运用于 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 几个红外光波长。80年代初,这些波长的半导体光放大器制成。同时,开始进行光纤放大器的理论和实验研究,发现它们在增益、功率和带宽等方面都有明显优点,从而形成光纤放大器的国际研究浪潮。80年代末至90年代初,研制成掺铒光纤放大器(EDFA),并开始用于波长 $1.55\mu\text{m}$ 的光纤通信系统,推动了光纤通信向全光传输方向发展。近年来,光纤放大器又进一步扩大增益带宽,配合密集波分多路(DWDM)系统,为光纤传输线路向大容量、长距离方向发展作出显著贡献。

为适应光放大器及其应用的发展,杨祥林教授和他的研究小组多年来从事这方面的教学与科研工作,在他们实践经验积累的基础上,并参考国外相关的现代科技文献,整理撰写了这本高科技新书,对各类光放大器的理论基础、分析方法、基本特性作了系统全面的阐述,并且对光放大器在各类光纤通信系统中的应用也进行了系统全面的分析,介绍了许多应用实例。我们通信科技教育工作者为杨教授等能为本专业大学生、研究生和相关领域科技工作者提供这样一本高新科技的教科书或参考书而感到庆幸,相信此书的出版将对我国光纤通信技术和应用继续快速发展以及培养高级科技人才产生积极影响。



1999年5月

前 言

本教材系按《1996~2000年全国电子信息类专业教材编制的编审出版规划》,由物理电子技术教学指导委员会编审、推荐出版。

本教材由南京邮电学院杨祥林教授担任主编,浙江大学周文教授担任主审,责任编委为清华大学应嘉年教授。

本教材的参考学时为60学时。全书共分10章。

第1章导论,是全书的基础和预备知识。第2章有源光纤,主要介绍各种掺杂光纤放大介质的基本特性。第3章掺铒光纤放大器的理论基础,主要介绍掺铒光纤放大器的理论模型、分析方法与基本特性的数学表示。第4章介绍掺铒光纤放大器的特性与结构设计,在第3章的分析基础上,给出了一些典型的计算与实验特性参数,也给出了典型的光纤放大器的基本结构和一些特种光纤放大器结构特性。第5章掺铋与掺镨光纤放大器,主要介绍1.3 μm 波长的掺铋与掺镨光纤放大器的理论、结构与基本特性。第6章分布式光纤放大器,介绍低掺杂铒光纤放大、受激喇曼散射和受激布里渊散射放大等三种分布式光纤放大器的原理、结构、特性及一些典型应用。第7章半导体光放大器,主要介绍两种半导体光放大器的基本结构、原理与基本特性。第8章光放大器在数字光纤通信系统中的应用,主要介绍掺铒光纤放大器在数字光纤通信系统中的应用方案,光放大器对数字光纤通信系统性能的影响分析,光放大器在高速、大容量、长距离数字通信系统、光纤孤子通信系统中的应用。第9章光放大器在模拟光纤通信系统中的应用,主要介绍光放大器对模拟光纤通信和分配系统特性的影响及典型的CATV系统中的应用。第10章光放大器在光纤通信网中的应用,简要介绍光放大器在总线、环形与星形无源光网及全光开关、全光信号处理与全光网中的应用。

使用本教材时应注意切实掌握基本物理概念和分析方法,并在比较和联系实际中加深理解。本科生使用本教材可以学的浅一些,研究生使用本教材时可学得深一些,并可进一步阅读各章所附的一些参考文献。

本教材由陈健副教授编写第2章和第9章初稿,温扬敬副教授编写第3章,毛庆和副教授编写了第4章和第8章部分初稿,陈海涓博士编写了第5章初稿。其余各章的编写和各章的修改及全书的统编定稿,由杨祥林教授完成。

本书是在作者十余年来教学与研究积累基础上,并参考国外文献总结整理而成,是国内首次系统介绍光放大器理论及其应用技术的述著,在本书酝酿和写作过程中,曾得到东南大学和南京邮电学院相关部门的大力支持。教学指导委员会主任、清华大学张克潜教授,责任编委、清华大学应嘉年教授对本书的编写与出版提出了许多有益建议,浙江大学周文教授认真审阅了书稿并提出许多有价值的意见和建议,研究生邱亮、刘寅和陈德华在录入文稿和打印等方面做了许多工作,在此一并表示感谢。

20年前,张煦先生和叶培大先生引导作者进入了光纤通信领域,在本书问世之际,谨对两位先生的指导表达诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作 者

1999年12月

目 录

第1章 导 论	(1)
1.1 光放大器的类型与发展	(1)
1.2 受激辐射光放大器的理论基础	(3)
1.2.1 爱因斯坦发射系数与粒子数反转	(3)
1.2.2 受激辐射放大的增益系数	(4)
1.2.3 受激辐射光放大器的增益谱特性	(4)
1.3 受激散射光放大器的理论基础	(6)
1.3.1 受激喇曼散射的增益系数	(6)
1.3.2 受激布里渊散射的增益系数	(8)
1.4 光放大器的应用	(10)
第2章 有源光纤	(13)
2.1 石英与氟化物玻璃基质中的稀土离子	(13)
2.1.1 稀土元素及其原子结构	(13)
2.1.2 能级结构及其跃迁特性	(14)
2.1.3 掺杂玻璃激光基质的特性	(15)
2.1.4 掺稀土离子玻璃的吸收和荧光特性	(16)
2.1.5 影响稀土掺杂玻璃特性的因素	(18)
2.2 掺杂光纤的制造与特性测量	(19)
2.2.1 掺杂光纤的制造	(19)
2.2.2 掺杂光纤特性参数的测量	(21)
2.3 掺杂光纤的特性参数	(24)
2.3.1 吸收截面和发射截面	(24)
2.3.2 吸收系数和发射系数	(26)
第3章 掺铒光纤放大器的理论基础	(28)
3.1 本地速率方程及其稳态解	(29)
3.1.1 三能级激光系统的原子速率方程	(29)
3.1.2 掺铒光纤放大系统的原子速率方程	(30)
3.2 光纤放大系统的传输方程	(32)
3.2.1 功率传输方程	(32)
3.2.2 简化的功率传输方程	(35)
3.3 光纤放大器的小信号放大特性	(37)
3.3.1 小信号增益特性	(38)
3.3.2 小信号放大时的噪声系数	(40)
3.4 光纤放大器的近似分析	(41)
3.5 光纤放大器的瞬态增益效应	(43)
3.5.1 输入端的动态增益特性	(44)
3.5.2 输出端的动态增益特性	(46)

3.6	密度矩阵理论	(47)
3.6.1	密度矩阵方程及其稳态解	(47)
3.6.2	复极化率与放大器增益	(50)
第4章	掺铒光纤放大器的特性与结构设计	(53)
4.1	掺铒光纤放大器的增益特性	(53)
4.1.1	小信号增益特性	(53)
4.1.2	增益谱特性与放大器带宽	(53)
4.2	增益饱和与饱和输出功率	(56)
4.3	放大自发辐射噪声与噪声系数	(58)
4.4	掺铒光纤放大器的参数设计考虑	(60)
4.4.1	EDFA 长度和泵浦功率的确定	(60)
4.4.2	EDFA 光纤波导参数的选取	(62)
4.4.3	EDFA 泵浦波长的选取	(63)
4.5	掺铒光纤放大器的基本结构和结构配件	(68)
4.5.1	EDFA 的基本结构	(68)
4.5.2	EDFA 的结构配件	(68)
4.6	特种结构 EDFA	(70)
4.6.1	分段组合高增益 EDFA	(70)
4.6.2	低噪声 EDFA	(70)
4.6.3	双向放大 EDFA	(72)
4.6.4	反射型 EDFA	(73)
第5章	掺钕与掺镨光纤放大器	(74)
5.1	掺钕光纤放大器的理论基础	(74)
5.1.1	掺钕光纤的能级结构与速率方程	(74)
5.1.2	功率传输方程	(76)
5.2	掺钕光纤放大器的特性与设计考虑	(78)
5.2.1	掺钕光纤的物理参数	(78)
5.2.2	掺钕光纤放大器的基本特性	(78)
5.3	掺钕光纤放大器的结构设计 with 性能提高	(80)
5.3.1	接入光滤波器的 NDFA 设计与性能提高	(80)
5.3.2	掺钕光纤参数对放大器性能的影响	(82)
5.4	掺镨光纤放大器的理论基础	(82)
5.4.1	掺镨光纤的能级结构与光谱特性	(83)
5.4.2	掺镨光纤中的功率传输方程	(83)
5.5	掺镨光纤放大器的结构与特性	(85)
5.6	掺镨光纤放大器的应用举例	(87)
第6章	分布式光纤放大器	(89)
6.1	分布式掺铒光纤放大器	(89)
6.1.1	d-EDFA 的原理与结构	(89)
6.1.2	d-EDFA 的传输放大特性	(90)
6.2	d-EDFA 的设计考虑	(92)
6.2.1	铒光纤的设计考虑	(92)
6.2.2	泵浦方式和泵浦功率	(94)
6.2.3	准分布式掺铒光纤放大器	(95)

6.2.4	超长距离 d-EDFA 传输系统设计举例	(96)
6.3	光纤喇曼放大器	(96)
6.3.1	光纤受激喇曼增益系数与喇曼脉冲的输出功率	(96)
6.3.2	光纤喇曼放大器的增益与饱和特性	(99)
6.3.3	光纤喇曼放大器的性能与应用	(100)
6.4	光纤布里渊放大器	(101)
6.4.1	光纤受激布里渊增益系数	(101)
6.4.2	光纤布里渊放大器的增益与饱和特性	(102)
6.4.3	光纤布里渊放大器的性能与应用	(103)
第 7 章	半导体光放大器	(105)
7.1	半导体光放大器的结构、原理与增益特性	(105)
7.2	半导体光放大器的饱和特性	(107)
7.3	半导体光放大器的噪声特性	(110)
7.3.1	半导体光放大器噪声的基本方程	(110)
7.3.2	行波半导体光放大器的噪声	(111)
7.3.3	F-P 腔半导体光放大器的噪声	(112)
7.4	半导体光放大器的瞬态放大特性	(112)
7.4.1	瞬态放大方程与瞬态增益	(113)
7.4.2	增益饱和与脉冲形变	(114)
7.4.3	频率啁啾与脉冲压缩	(114)
7.4.4	增益恢复时间与图形失真	(115)
7.5	半导体光放大器的多信道放大特性	(116)
第 8 章	光放大器在数字光纤通信系统中的应用	(119)
8.1	光放大器在数字光纤通信系统中的应用方案	(119)
8.2	光放大器对数字光纤通信系统性能的影响	(120)
8.2.1	光放大器对直接检测数字光纤通信系统噪声特性的影响	(120)
8.2.2	光放大器对数字光纤通信系统接收信噪比和灵敏度的影响	(121)
8.2.3	光放大器对直接检测数字光纤通信系统误码特性的影响	(124)
8.3	级联光放大数字通信系统	(128)
8.3.1	级联光放大数字通信系统的噪声特性	(128)
8.3.2	级联光放大数字通信系统的接收灵敏度和传输距离	(132)
8.3.3	光放大器在多信道光通信系统中的应用	(134)
8.4	光放大器在光孤子通信系统中的应用	(137)
8.4.1	光孤子通信的基本概念	(138)
8.4.2	光纤损耗与光孤子的能量补偿放大原理	(139)
8.4.3	光放大器 ASE 噪声对光孤子通信系统通信容量的限制	(140)
8.5	光放大器的自动增益与功率控制	(141)
8.5.1	自动增益控制	(141)
8.5.2	自动功率控制	(142)
第 9 章	光放大器在模拟光纤通信系统中的应用	(145)
9.1	模拟光纤通信系统的特性参量	(145)
9.1.1	AM 和 FM 调制格式	(145)
9.1.2	模拟副载波调制系统的载噪比	(146)
9.1.3	模拟副载波复用系统的互调分量	(147)

9.2 模拟调制信号放大对 EDFA 性能的要求	(148)
9.2.1 模拟光放大分配系统的载噪比	(148)
9.2.2 模拟光放大分配系统的功率预算	(150)
9.2.3 EDFA 的增益饱和特性与模拟光放大分配系统的二阶失真	(153)
9.3 模拟光纤通信系统的设计考虑	(155)
9.3.1 光放大系统性能限制因素	(155)
9.3.2 光放大系统的信噪比与分配能力	(156)
9.4 EDFA 在模拟 CATV 系统中应用举例	(157)
第 10 章 光放大器在光纤通信网中的应用	(162)
10.1 光纤通信网的类型与特点	(162)
10.1.1 通信网的分层	(162)
10.1.2 光纤用户网的结构	(163)
10.1.3 光纤用户网的接入方法	(164)
10.2 光放大器在总线和环形网中的应用	(165)
10.2.1 在非再生双总线光子网中的应用	(165)
10.2.2 在非再生 WDM 环形网中的应用	(168)
10.2.3 在双向 WDM 自愈光环形网中的应用	(170)
10.3 光放大器在无源星形网和全光网中的应用	(172)
10.3.1 广播网	(172)
10.3.2 交互式 PON 和全光传送网	(174)
10.4 光放大器在全光开关和选通门中的应用	(177)
10.4.1 EDFA 选通光开关	(177)
10.4.2 NALM 选通光开关	(178)
10.5 光放大器在光信号处理中的应用	(179)
10.5.1 在波长变换器中的应用	(179)
10.5.2 在全光再生器中的应用	(180)
10.5.3 在全光时分复用中的应用	(181)
10.5.4 在光延时线与光纤存储环中的应用	(181)
参考文献	(183)

第 1 章 导 论

在电子学的发展过程中,利用荷电粒子的运动实现了电磁波的放大,当设置适当的反馈机构后,获得了单色的相干电磁辐射。在近一个世纪中,人们利用这种相干电磁波发展了电子工业,在工业经济与科技现代化过程中发挥了巨大的作用。激光的问世及其发展将现代社会从电子时代推向了光子时代。产生激光的先导和基础是相干光的放大^{[1][2]}。当 1954 年第一台 NH_3 分子微波量子放大器研制成功时,人们发现,可通过原子或分子中的受激放大来获得单色的相干电磁波,称为脉塞(Maser——Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)。1958 年肖洛(Schawlow)和汤斯(Townes)将 Maser 原理推广到光频段,1960 年梅曼(Maiman)利用红宝石介质的受激放大原理研制成第一台红宝石激光器,称为莱塞(Laser——Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)或称激光。不管是 Maser 还是 Laser,其产生相干电磁波辐射的机理都是基于电磁波的受激放大。自 1960 年以来激光器已得到了飞跃的发展和广泛的应用,然而作为激光器先导的光放大器的发展却比较缓慢,直到 80 年代,在光纤通信发展的推动下,才开始引起足够的重视。进入 90 年代后光纤放大器的问世已引起了光纤通信技术的重大变革,因此本书专门讨论光放大器及其在光纤通信中的应用。本章首先介绍光放大器的基本概念,作为全书的预备知识。

1.1 光放大器的类型与发展

一般,光放大器都由增益介质、能源、输入输出耦合结构组成。根据增益介质的不同,目前主要有两类光放大器,一类采用活性介质,如半导体材料和掺稀土元素(Nd, Sm, Ho, Er, Pr, Tm 和 Yb)的光纤,利用受激辐射机制实现光的直接放大,如半导体激光放大器和掺杂光纤放大器;另一类基于光纤的非线性效应,利用受激散射机制实现光的直接放大,如光纤喇曼放大器和光纤布里渊放大器。图 1.1(a)、(b)、(c)给出了这种放大器的基本结构示意图。

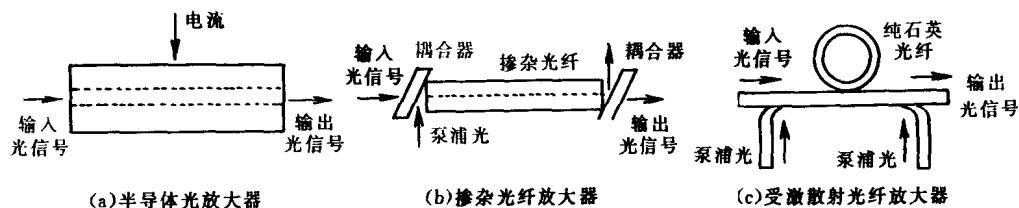


图 1.1 光放大器的基本结构示意图

半导体光放大器利用半导体材料固有的受激辐射放大机制,实现相干光放大,其原理和结构与半导体激光器相似。当偏置电流低于振荡阈值时,激光二极管对输入的相干光具有线性放大作用^[3]。当偏置电流高于振荡阈值时,通过注入锁定,激光二极管可以作为非线性放大器。线性放大器可分为两类:法布里-珀罗(F-P)光放大器和行波(TW)光放大器,两者的区别在于两

个端面的反射率不同,F-P腔光放大器端面反射率高,光在两端面间来回反射,产生共振放大。TW光放大器端面反射率很低,光在沿介质行进过程中被放大,然后由输出端面输出,而不产生反射。在60年代半导体激光二极管尚未成熟,但已在77K下,首先进行了GaAs同质结行波半导体放大器的研究,开创了半导体光放大器研究的先河,确立了半导体光放大器的基本理论。至1970年,双异质结结构(DH)激光器问世后,又实现了TW半导体光放大器的室温连续工作。在1973年至1975年间,开始从光纤通信应用要求出发,研究双异质结结构TW和F-P光放大器的特性并取得重要进展。80年代初,采用消除反射光的光隔离器和精确的光频率调谐技术,深入研究了AlGaAs F-P光放大器的增益、带宽、饱和增益与噪声特性及其对光纤通信系统性能的影响。同时开始研究半导体放大器的注入锁定现象、机理、设计和放大特性。随着光纤通信技术的发展,80年代中期开始研究适用于 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 波长的InGaAsP半导体光放大器^[4]。

60年代初,与半导体光放大现象研究的同时,也对掺稀土元素的光纤的光谱特性进行了研究,Koesker发现了掺钕(Nd)光纤的激光辐射现象,Snitzer发现了掺铒光纤在 $1.5\mu\text{m}$ 处的激光辐射特性^[5],当时这些研究都是期望研制稀土光纤激光光源而不是光纤放大器,由于稀土光纤的热淬灭效应难以解决,而半导体激光器发展迅速并日趋成熟,因此稀土光纤放大器的研究处于停步不前状态。直至80年代初,在光纤中发现了受激喇曼效应,人们又开始恢复了对光纤放大器研究的兴趣,期望能用于光纤通信系统中。但这种放大方案效率低,需要高功率的泵浦光源,无法在通信系统中应用。当时光纤通信的研究重点集中在高性能再生中继器和高灵敏度相干检测技术。但是在1985~1986年间,英国南安普顿大学的Payne等人有效地解决了掺铒光纤(EDF)的热淬灭问题,首次用MCVD方法研制成纤芯掺杂的铒光纤,并实现了 $1.55\mu\text{m}$ 低损耗窗口的激光辐射^{[6][7]},1987年他们采用650nm染料激光器作为泵浦光源,获得了28dB小信号增益。同年AT&T Bell实验室的Desurvire等人,采用514nm氩离子激光器作为泵浦光源,也获得了22.4dB的小信号增益。接着在1989年,利用 $1.49\mu\text{m}$ 半导体激光器作为泵浦源获得了37dB小信号增益,Laming等利用980nm、11mW泵浦功率也得到24dB小信号增益,同年日本NTT实验室首次利用 $1.48\mu\text{m}$ 半导体激光泵浦的掺铒光纤放大器作为全光中继器放大5Gb/s孤子脉冲,实现了100km的无误码传输。980nm和1480nm半导体激光泵浦的掺铒光纤放大器具有增益高、频带宽、噪声低、效率高,连接损耗低,偏振不灵敏等特点,在90年代初得到了飞速发展,成为当时光放大器研究发展的主要方向,极大地推动了光纤通信技术的发展。自此以后,掺铒光纤放大器的研究在多方面开展,建立了多种理论分析模型,提出了增益均衡和扩大增益带宽的方案和方法,进行了多种系统应用研究,同时进行了氟化玻璃铒光纤放大、分布式光纤放大器和双向放大器的研究,使掺铒光纤放大器及其应用得到了飞速发展。此外又开展了掺镨(Pr)、掺镱(Yb)、掺铥(Ho)、掺铪(Tm)等光纤放大器的研究,使光纤放大器的研究全面发展。

60年代初,在激光技术发展起来后,以高强度单色光照射光学介质,开辟了非线性光学的研究领域,揭示了受激喇曼散射、受激布里渊散射、四波混频和参量过程的物理机制^{[8][9]}。1972年Stolen等首先在光纤喇曼激光器的实验中发现了喇曼增益,初期的研究主要侧重于制成光纤喇曼激光器,直到80年代才在光纤通信应用的推动下开始研究光纤喇曼放大器。1981年Tkeda采用 $1.017\mu\text{m}$ 的泵浦光放大 $1.064\mu\text{m}$ 的信号光,经1.3km单模光纤放大获得30dB小信号增益。1983年Desurvire等用2.4km单模光纤放大 $1.24\mu\text{m}$ 的光信号,获得45dB的小信号增益。1986年Olsson用光纤喇曼放大器作为光纤通信系统接收机的前置放大器。1987年

Edagawa 研究了光纤喇曼放大器的宽带多信道放大特性。1989 年 Mollenauer 采用 41.7km 的光纤环和 1.46 μm 的色心激光器泵浦源,利用喇曼增益放大脉宽 55ps、波长 1.56 μm 的孤子脉冲稳定传输 6 000km。

受激布里渊增益特性的研究始于 1979 年,其增益带宽一般小于 100MHz,1986 年 Olsson 和 Atkns 等研究低泵浦功率的光纤布里渊放大器,采用几毫瓦的泵浦功率达到小信号增益 (20~40)dB 的窄带光放大,可作为选频光放大器用于频分复用光信道的解复用。

利用光纤喇曼增益和布里渊增益可作成相干光放大器,是二类受激散射的有益应用。但是在光纤通信系统中,这两种效应常引起光纤通信系统性能的退化,如引起非线性串音、非线性损耗、限制通信距离和速率等,近年来许多研究工作都是围绕消除这些限制因素而开展的,但是,1997 年 Masuda 等研制成铒光纤放大与喇曼放大混合结构的宽带放大器,3dB 带宽达 67nm,1996 年 Stentz 等研制成 1.3 μm 光纤喇曼放大器。1995 年 Grubb 等实现了 4 $\times$ 10Gb/s WDM 多信道放大,表明光纤喇曼放大在 WDM 光纤通信系统中亦将有重要应用。

1.2 受激辐射光放大器的理论基础

基于受激辐射机制的光放大器是用某种(电的或光的)方法将激光介质激发达到粒子数反转时产生的增益实现光放大的。一般,增益与介质的性质、结构、泵浦方式和强度及入射光场参数有关。下面首先利用爱因斯坦提出的受激辐射概念,讨论光放大介质的受激辐射特性。

1.2.1 爱因斯坦发射系数与粒子数反转

在图 1.2 所示二能级激光系统中,存在受激吸收、自发辐射和受激辐射三种跃迁过程,分别为 $N_1 B_{12} \rho(\nu)$ 、 $N_2 B_{21} \rho(\nu)$ 和 $N_2 A_{21}$, N_2 和 N_1 分别为上、下能级的粒子数(原子或分子数), $\rho(\nu)$ 为光能量密度。

在动态平衡时,

$$N_1 B_{12} \rho(\nu) = N_2 B_{21} \rho(\nu) + N_2 A_{21} \quad (1.2.1)$$

$$\begin{aligned} \rho(\nu) &= \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{(N_1 B_{12}/N_2 B_{21}) - 1} \\ &= \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{(B_{12}/B_{21}) e^{-h\nu/kT} - 1} \end{aligned} \quad (1.2.2)$$

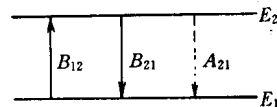


图 1.2 光的受激吸收、受激辐射和自发辐射

其中利用了关系 $\frac{N_1}{N_2} = \exp(-h\nu/kT)$ 。

当 $T \rightarrow \infty$ 时,应有 $\rho(\nu) \rightarrow \infty$,因而有

$$B_{12} = B_{21} = B \quad (1.2.3)$$

当 $h\nu \ll kT$ 时,式(1.2.2)变为

$$\rho(\nu) = kT A_{21} / (B_{21} h\nu) \quad (1.2.4)$$

然而,由瑞利-金斯公式可知,当 $h\nu \ll kT$ 时,

$$\rho(\nu) = (8\pi/c^3) \nu^2 kT \quad (1.2.5)$$

从式(1.2.4)与(1.2.5),则得

$$A_{21} = 8\pi h \nu^3 B_{21} / c^3 \quad (1.2.6)$$

式(1.2.3)与(1.2.6)即为爱因斯坦关于自发辐射系数 A_{21} 、吸收系数 B_{12} 和受激辐射系数 B_{21} 的

著名关系。

在动态平衡时,爱因斯坦受激辐射系数等于吸收系数,即 $B_{21}=B_{12}$,若考虑能级 E_1 和 E_2 的简并度 g_1 和 g_2 ,则为使受激辐射超过吸收,要求

$$N_2 > \frac{g_1}{g_2} N_1 \quad (1.2.7)$$

在热平衡时, N_2 总是小于 N_1 ($N_2 < N_1$),因此把 $N_2 > N_1$ 的状态称为粒子数反转或负温度状态。实现粒子数反转的方法有二类,在图 1.1(a)的半导体光放大器中采用注入电流的方法,在(b)所示掺杂光纤放大器中采用光学的方法。一般,为了在二个能级间形成粒子数反转,其上能级应是亚稳态,能级寿命长,有利于在该能级上积累粒子数。

1.2.2 受激辐射放大的增益系数

激光介质一旦形成了粒子数反转,便可实现光的放大。由于受激辐射产生的光与入射光的光子一样,而自发辐射是噪声,所以评价放大器的放大能力或增益时,一般只考虑受激辐射,而在评价放大器的噪声特性时,则要研究自发辐射。

设入射光能量密度为 $\rho(\nu)$,光强为 $I=\rho(\nu)c$, $h\nu=E_2-E_1$ 。 E_2 与 E_1 间形成了粒子数反转,上、下能级粒子数分别为 N_2 和 N_1 ,单位时间、单位体积内产生的光子数增加为

$$\frac{dn}{dt} = (N_2 - N_1)B_{21}\rho(\nu) \quad (1.2.8)$$

由 $\rho(\nu)=nh\nu$, n 代表受激辐射光子数, $I=\rho(\nu)c$ 为光强, $dz=cdt$,则有

$$\frac{dI}{dz} = \frac{1}{c} I(N_2 - N_1)B_{21}h\nu \quad (1.2.9)$$

由此可得光强放大的增益系数为

$$g = \frac{1}{I} \frac{dI}{dz} = \frac{1}{c} (N_2 - N_1)B_{21}h\nu \quad (1.2.10)$$

若粒子数不随 z 变化,则增益系数 $g(z)$ 为常数 g_0 ,称为线性或小信号增益系数。光强为

$$I(z) = I_0 \exp(g_0 z) \quad (1.2.11)$$

式中, I_0 为初始输入光强。

光强的增大是上能级粒子向下能级受激跃迁的结果,亦即以粒子数差 $[N_2(z)-N_1(z)]$ 的减小来达到的,光强越强, $[N_2(z)-N_1(z)]$ 越小。因此增益系数 $g(z)$ 将随 z 而减小,称为增益饱和。而粒子数差亦可表示为光强的函数:

$$N_2(z) - N_1(z) = \frac{N_2(0) - N_1(0)}{1 + (I/I_s)} \quad (1.2.12)$$

式中 $N_2(0)-N_1(0)$ 为 $I=0$ 时的初始粒子数差, I_s 为饱和光强。由此出发可将式(1.2.10)改写为

$$g(I) = \frac{g_0}{1 + (I/I_s)} \quad (1.2.13)$$

式中 $g_0=g(0)$,即小信号增益系数。若沿放大器长度始终满足 $I \ll I_s$,则 $g(I)=g_0$ 为常数,且不随 z 而变,当不满足 $I \ll I_s$ 时, $g(I)$ 称为大信号或饱和增益系数。

1.2.3 受激辐射光放大器的增益谱特性

以上讨论中假设原子能级 E_2 和 E_1 是无限窄的,因而自发辐射和受激辐射是单色的,全部

辐射功率都集中在一个单一的频率 $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ 上。实际上由于各种因素的影响,自发辐射和受激辐射并不是单色的,而是分布在中心频率 ν_0 附近的一个频率范围内,称其为谱线加宽。考虑 $E_2 \rightarrow E_1$ 跃迁的谱线加宽,通常用线型函数 $g(\nu)$ 描述,定义为谱线强度随 ν 分布的归一化函数,于是式(1.2.10)可改写为

$$g(\nu) = \frac{1}{I} \frac{dI}{d\nu} = \frac{1}{c} (N_2 - N_1) \int h\nu' B_{21} g(\nu') d\nu' \quad (1.2.14)$$

利用式(1.2.6),则

$$g(\nu) = (N_2 - N_1) \frac{c^2}{8\pi\nu^2} A_{21} g(\nu) \quad (1.2.15)$$

有时采用受激辐射截面 σ 表示辐射强度,则

$$\sigma = g/(N_2 - N_1) = \frac{c^2}{8\pi\nu^2} A_{21} g(\nu) \quad (1.2.16)$$

由此可知受激放大导致的光强与光子数变化为

$$\frac{dI}{dz} = I(N_2 - N_1)\sigma \quad (1.2.17)$$

$$\frac{dn}{dz} = n(N_2 - N_1)\sigma \quad (1.2.18)$$

光子数随时间的变化为

$$\frac{dn}{dt} = c \frac{dn}{dz} = (N_2 - N_1)\sigma cn = W D n \quad (1.2.19)$$

式中, D 为模密度 $D(\nu)$, W 为受激辐射速率:

$$W = \sigma c = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} A_{21} g(\nu) \quad (1.2.20)$$

根据激光放大介质的不同,通常有两类典型的谱线线型,分别由均匀加宽和非均匀加宽引起,如图 1.3 所示。均匀加宽的特点是激光放大介质各原子的辐射频率和线型都相同,加宽是由于原子发光时的阻尼或激发态衰减和原子间的碰撞引起的,其线型为洛伦兹线型。非均匀加宽的特点是各个原子的辐射频率和线型都不同,整个谱线是各个原子线型的包络,每个原子辐射时都有自己的中心频率和线型,其线型仍是洛伦兹线型,而由许多原子组成的系统的总的线型则是这些分立的洛伦兹线型的包络,该包络线是高斯函数,称为高斯线型。

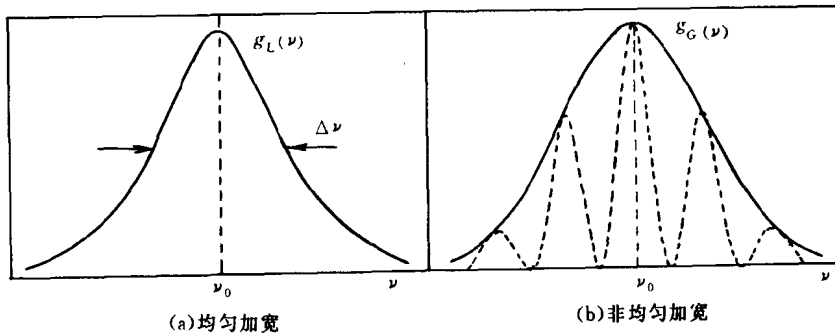


图 1.3 激光放大介质的谱线线型

洛伦兹线型函数和高斯线型函数分别为 $g_L(\nu)$ 和 $g_G(\nu)$:

$$g_L(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2} \quad (1.2.21)$$

$$g_G(\nu) = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta\nu_D \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2 \ln 2\right] \quad (1.2.22)$$

$$\Delta\nu_D = 7.612 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{m}\right)^{1/2} \nu_0 \quad (1.2.23)$$

式中, $\Delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau}$ 为自然加宽, τ 为上能级粒子寿命。 $\Delta\nu_D$ 为静止原子的中心频率, m 为原子质量, T 为绝对温度。

显然, 在中心频率 $\nu = \nu_0$ 处, 有

$$g_L(\nu_0) = 2/(\pi\Delta\nu) \quad (1.2.24)$$

$$g_G(\nu_0) = 2(\ln 2)^{1/2}/(\sqrt{\pi} \Delta\nu_D) \quad (1.2.25)$$

将此代入式(1.2.14), 则得中心频率处的增益系数为

$$g_L(\nu_0) = \left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1}\right) \frac{c^2}{4\pi^2 \nu^2 \Delta\nu} A_{21} \quad (1.2.26)$$

$$g_G(\nu_0) = \left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1}\right) \frac{c^2}{4\pi \nu^2 \Delta\nu_D} \sqrt{\pi \ln 2} A_{21} \quad (1.2.27)$$

显然, $\left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1}\right)$ 越大, $\Delta\nu$ 或 $\Delta\nu_D$ 越小, 上能级寿命越长, 增益系数越大。

1.3 受激散射光放大器的理论基础

光信号通过介质时, 都有一部分能量偏离预定方向而向空间其他方向弥散, 称为光的散射。光的散射现象因造成散射的物理原因不同而有多种形式和类型, 一般由传输介质中的感应电极化特性的空间起伏或折射率的不均匀性引起, 如果介质的折射率或感应电极化按时空分布是绝对均匀的, 即纯净介质, 则光信号通过这种介质时是不会产生光的散射的。

从表现形式看, 受激散射与受激辐射两种光辐射是相同的, 两者都具有明显的产生阈值, 都具有输出的高定向性, 高单色性和高亮度性。从产生机理看, 受激散射与受激辐射过程亦极为相似, 两者在开始时均起源于一种自发过程, 然后依靠某个(或某些)特定波型内光子的选择性增大而获得雪崩式的受激放大。最后以高光子简并度的定向辐射形式从介质系统输出。唯一的区别是前者并不要求工作物质(散射介质)处于粒子数反转状态, 而后者则要求工作物质必须处于粒子数反转状态。本节主要介绍利用受激喇曼和受激布里渊散射效应的光纤放大器机理。

1.3.1 受激喇曼散射的增益系数

当散射介质的分子具有分立的本征能级结构, 而单色输入光的频率 ν_0 与分子任何一个共振吸收频率不相等时, 分子本身不能对入射光子产生真正的共振吸收, 但能对入射光产生散射作用。如图 1.4 所示, 设散射分子的两个最低能级分别为 a 和 c , 能量间隔为 $h\Delta\nu$, 在入射光作用下, 原处于较低能级 a 上的分子[图(a)]在散射后先跃迁到一种中间状态(虚能级)之上, 然后又跃迁返回至另一个较高的能级 c , 分子内能增加, 而散射光子的频率则向低频方向移动了 $\Delta\nu$, 这种过程产生的散射光称为斯托克斯光。与此类似, 图(b)的散射光称为反斯托克斯光, 其

特点是散射分子回到了较低能级,内能减少,而散射光子的频率向高频方向移动了 $\Delta\nu$ 。

由量子电动力学理论,可求得单位时间内受激散射的总光强的增加速率为

$$\frac{d}{dt}[I(\nu)] = N_a c \sigma I_0 \frac{\lambda^2}{h\nu\Delta\nu} \cdot I(\nu) \quad (1.3.1)$$

式中, N_a 为能级 a 上的分子密度, c 为光速, σ 为分子的喇曼散射微分截面, I_0 和 I 分别为入射光和受激散射光的总光强, $\Delta\nu$ 为受激散射光平均谱线宽度。

在稳态条件下,可令 $dt=dz/c$,则可将 $I(\nu)$ 随时间的变化转化为光沿行进方向距离的变化,即

$$\frac{d}{dz}[I(\nu, z)] = N_a \sigma \frac{\lambda^2}{h\nu\Delta\nu} \cdot I_0 \cdot I(\nu, z)$$

(1.3.2)

对上式积分,可得

$$I(\nu, z) = I(\nu, 0) \exp(g_R z) \quad (1.3.3)$$

式中 g_R 称为受激喇曼散射增益因子,即

$$g_R = N_a \sigma \frac{\lambda^2}{h\nu\Delta\nu} \cdot I_0 \quad (1.3.4)$$

可见,受激喇曼散射的增益因子与散射过程初始能级上的分子密度 N_a 、分子微分散射截面 σ 与总泵浦光强 I_0 的乘积成正比,而与受激喇曼散射谱线宽度 $\Delta\nu$ 成反比。

式(1.3.4)是对能级 a 为较低能级时求得的,对应于斯托克斯散射[图(a)]。设较高能级 c 上的分子密度为 N_c ,同样可求得反斯托克斯喇曼散射的增益因子为

$$g'_R = N_c \sigma \frac{\lambda^2}{h\nu\Delta\nu} I_0 = \frac{N_c}{N_a} g_R \quad (1.3.5)$$

通常开始时有 $N_a \gg N_c$, 因此 $g_R \ll g'_R$, 亦即斯托克斯散射过程总是首先产生,但在某些情况下,随着受激斯托克斯散射过程的不断增强,被输运到较高能级 c 上的分子数不断增加,如果分子在该能级上的停留时间足够长,使得 N_c 达到可与 N_a 相比的程度,则有可能进一步产生受激反斯托克斯散射。

以上讨论中尚未考虑受激喇曼散射的光谱结构或线型问题,而简单用一平均谱线宽度 $\Delta\nu$ 处理。一般情况下,受激喇曼散射的线型 $g_R(\nu)$ 分析比较复杂,但在入射泵浦光谱线宽度远小于自发喇曼散射谱线宽度时(实际情况大都如此),受激喇曼散射的线型和谱线宽度主要由自发喇曼散射谱线的线型分布决定,因而式(1.3.4)可改写为

$$g_R(\Delta\nu) = N_a \sigma \frac{\lambda^2}{h\nu} I_0 \cdot S(\Delta\nu) \quad (1.3.6)$$

式中, $S(\Delta\nu)$ 为自发喇曼散射谱分布的归一化线型因子,其量纲与 $(1/\Delta\nu)$ 的相同,而 $\Delta\nu = \nu - \nu_0$ 为相对于自发喇曼谱线中心频率 ν_0 的偏移。

若入射泵浦光谱线宽度远大于自发喇曼谱线宽度时,受激喇曼散射的线型和谱线宽度主要由入射泵浦光的谱线的线型分布决定,式(1.3.6)中的 $S(\Delta\nu)$ 为入射泵浦光谱线分布的归一化线型因子。

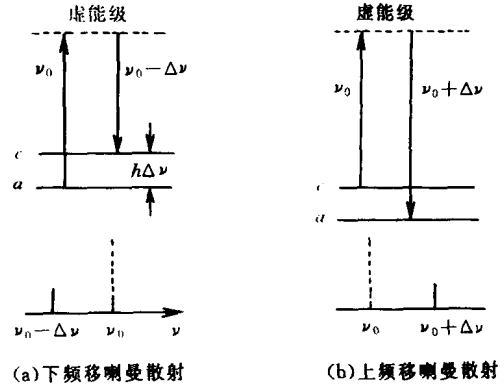


图 1.4 分子散射的跃迁过程