



全国高技术重点图书·光电子技术领域

# 光纤激光器 和放大器技术

聂秋华 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



全国高技术重点图书·光电子技术领域

# 光纤激光器和放大器技术

聂秋华 著

电子工业出版社

## 内 容 提 要

本书主要论述了在光通信、医学、传感器和光谱学领域,尤其是光通信领域中,掺稀土元素光纤激光器和放大器技术及其应用。本书共分十章。第一章综述光纤激光器和放大器的特点和发展;第二章论述光波导的基础理论,侧重于介绍弱导近似和线性偏振模的概念;第三章为激光理论基础,阐述了激光器的工作原理;第四章重点讨论锂离子在不同基质中的光谱特性;第五章讨论了几种光纤形式的谐振腔;第六章为本书重点,介绍了光纤激光器的几种理论分析方法,提出了填充因子分析法和高斯近似分析方法;第七章讨论了光纤激光器的调Q和锁模;第八章则主要讨论了利用掺钕或掺铒光纤激光器进行波长调谐输出的几种方案及其实验;第九章为超荧光激光光源的简单介绍;第十章则简要介绍了几种有应用前景的掺稀土元素氟化锆光纤激光器和放大器的特性以及实验研究结果。

本书可供从事光通信、医学、传感器和光谱学科研工作的工程技术人员使用,也可供相应专业的大学本科生和研究生作为教材阅读。

**书 名:** 光纤激光器和放大器技术

**著 者:** 聂秋华

**责任编辑:** 高平

**排版制作:** 电子工业出版社排版室

**印 刷 者:** 北京市顺义县天竺颖华印刷厂印刷

**出版发行:** 电子工业出版社出版、发行 URL: <http://www.phei.co.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 发行部电话 (010) 68214070

**经 销:** 各地新华书店经销

**开 本:** 850 × 1168 1/32 **印张:** 11.125 **字数:** 305 千字

**版 次:** 1997 年 3 月第一版 1997 年 3 月第一次印刷

**印 数:** 2000 册

**书 号:** ISBN 7-5053-3902-8

TN·1028

**定 价:** 20.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换  
版权所有·翻印必究

## 《全国高技术重点图书》出版指导委员会

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲

卢鸣谷

委员：(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	王守武	牛田佳	刘 仁
刘 杲	卢鸣谷	叶培大	朱丽兰	孙宝寅
师昌绪	任新民	杨牧之	杨嘉墀	陈芳允
陈能宽	罗见龙	周炳琨	欧阳莲	张钰珍
张效祥	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜	龚 刚
梁祥丰				

总干事：罗见龙 梁祥丰

## 《全国高技术重点图书·光电子技术领域》编审委员会

主任委员：周炳琨

委 员：王启明 孙宝寅 杜宝勋 陈益新  
吴金生 金国藩 张以模

# 前 言

掺稀土元素光纤激光器和放大器的研究和应用最近几年来受到了国际科技界的广泛重视,不仅因为其成本低,易于制作,而且其工作波长对目前和将来的某些应用尤其重要,例如在光通信、医学、传感器和光谱学等领域。写作《光纤激光器和放大器技术》一书的目的是论述这个领域中的最新发展,尤其侧重于在光通信领域中的应用。

本书第一章为工作在这一领域中的科技工作者和对该领域感兴趣的人们提供一个关于光纤激光器和放大器的综述,以期望对他们的学习和研究工作有所帮助,也更想藉此引起人们对这个领域的兴趣。综述中仅进行定性的描述,而不涉及理论分析。主要讨论什么是光纤激光器和放大器,它的特点及其发展简史,在后面的章节中再较为详细地讨论有关理论问题。第二章是光波导的基础理论,侧重于介绍弱导近似和线性偏振模的概念,有助于对本书后面章节的学习理解。第三章为激光理论基础知识,以速率方程理论为主讨论了有关激光理论的基本概念、定义和激光器的工作原理。由于铒离子在  $1.55\mu\text{m}$  处的跃迁谱线位于硅光纤极低损耗窗口,掺铒光纤激光器和放大器在长距离通信系统中的作用十分重要,所以在第四章中重点讨论铒离子在不同基质中的光谱特性,为深入理解掺铒光纤激光器的工作原理及特性奠定基础。第五章讨论了几种光纤形式的谐振腔,利用这些腔结构有利于制成体积小,易连接的光纤激光器和放大器。第六章为本书的重点,介绍了光纤激光器的几种理论分析方法,提出了填充因子分析方法和高斯近似分析方法,有助于读者理解对光纤形式的激光器和放大器如何进行理论分析以及在理论分析中要着重考虑的问题。第七章讨论了光纤激光器的调Q和锁模。第八章则主要讨论了利用掺铒或

掺铍光纤激光器进行波长调谐输出的几种方案和实验。第九章为超荧光激光光源的简单介绍。第十章则简要介绍了几种有应用前景的掺稀土元素氟化锆光纤激光器和放大器的特性以及实验研究结果。

虽然光波导和激光器方面的理论已经比较成熟,介绍光纤放大器和激光器方面的文章也不少,但有关系统介绍光纤放大器和激光器的专门书籍却少见。在参阅了大量文献资料和自己所进行研究工作的基础之上完成了本书。当然本书旨在抛砖引玉,使更多的科技工作者能进一步关注这一领域的研究工作,以推动国内光纤激光器和放大器的理论和实验研究。

限于作者的水平,本书难免有不当甚至错误之处,欢迎读者批评指正。

作者

1996年3月于宁波大学

# 目 录

第一章 掺稀土元素光纤激光器和放大器概述·····	(1)
1.1 引言·····	(1)
1.1.1 关于光纤激光器·····	(1)
1.1.2 光纤形式激光器的优点·····	(2)
1.1.3 光纤激光器的发展简史·····	(3)
1.2 光纤中的激光效应·····	(4)
1.2.1 光的吸收和发射·····	(5)
1.2.2 激光的产生·····	(5)
1.2.3 四能级和三能级激光器·····	(6)
1.2.4 稀土金属元素和离子·····	(7)
1.2.5 基质材料的影响·····	(8)
1.2.6 稀土金属离子的浓度·····	(9)
1.2.7 超荧光光纤激光器和放大器·····	(10)
1.3 制作掺稀土光纤·····	(10)
1.3.1 硅光纤:不掺杂情况下的 MCVD 光纤制作方法·····	(10)
1.3.2 在硅光纤中掺稀土元素:溶解法·····	(11)
1.3.3 在硅光纤中掺稀土元素:掺杂体载流子腔法·····	(11)
1.3.4 在硅光纤中掺稀土元素:烧结棒法·····	(12)
1.3.5 在硅光纤中掺稀土元素:气相轴向沉积法·····	(12)
1.3.6 在硅光纤中掺稀土元素:棒入管法·····	(12)
1.3.7 在氟化锆光纤中掺稀土元素:浇铸法·····	(13)
1.4 玻璃中稀土元素离子的光谱·····	(14)
1.4.1 吸收和荧光的测量·····	(14)
1.4.2 光谱细节·····	(14)
1.4.3 其它基质材料·····	(16)

1.5	硅光纤激光器	(18)
1.5.1	掺铈硅光纤激光器	(18)
1.5.2	掺铟硅光纤激光器	(22)
1.6	氟化锆光纤激光器	(23)
1.6.1	1050nm 和 1350nm 波长输出的掺铈氟化锆光纤激光器	(24)
1.6.2	1550nm 波长输出的掺铟氟化锆光纤激光器	(25)
1.6.3	其它波长输出的氟化锆光纤激光器	(26)
1.7	光纤激光器的谐振腔	(28)
1.7.1	Fabry-Perot 腔	(29)
1.7.2	基于定向耦合器的光纤激光器	(30)
1.7.3	光纤激光器波长调节输出	(33)
1.7.4	光纤激光器的窄谱线输出	(34)
1.8	调 Q 和锁模	(41)
1.8.1	光纤激光器的调 Q	(42)
1.8.2	锁模光纤激光器	(43)
1.9	掺稀土元素光纤放大器	(43)
1.9.1	光纤放大器的三种可能的应用	(43)
1.9.2	掺铟光纤中小信号增益的测量	(44)
1.9.3	掺铟放大器的激发态吸收	(46)
1.9.4	利用掺铟光纤进行放大	(47)
1.10	小结	(49)
<b>第二章</b>	<b>光纤波动理论基础</b>	<b>(58)</b>
2.1	概述	(58)
2.2	基本方程推导	(59)
2.2.1	直角坐标系的波动方程	(59)
2.2.2	柱坐标系中的波动方程	(62)
2.2.3	变量分解法求解方程	(63)
2.3	阶跃型折射率分布光纤中的波动现象	(65)
2.3.1	纤芯和包层中的电磁场	(65)



2.3.2	模的分类	(68)
2.3.3	模的传播常数(精确解)	(69)
2.3.4	传播常数和弱导近似	(71)
2.3.5	特征方程的统一表达式	(72)
2.3.6	模的传统命名方法	(73)
2.3.7	截止频率	(74)
2.3.8	线性偏振(LP)模	(76)
2.4	LP模的横向场分布	(77)
2.5	小结	(83)
<b>第三章 激光理论基础</b>		<b>(85)</b>
3.1	概述	(85)
3.2	自发发射,受激吸收和受激发射	(85)
3.2.1	自发发射	(85)
3.2.2	光谱线型函数	(86)
3.2.3	光谱线加宽机制	(88)
3.2.4	光的受激吸收和受激发射	(91)
3.3	速率方程组	(94)
3.3.1	三能级系统的速率方程组	(95)
3.3.2	四能级系统的速率方程组	(97)
3.4	稳态粒子数反转及饱和效应	(98)
3.4.1	小信号情况下的粒子数反转	(98)
3.4.2	均匀加宽介质中粒子数反转分布的饱和效应	(100)
3.5	激光振荡理论	(102)
3.5.1	光在介质中的增益、增益系数和增益饱和	(102)
3.5.2	激光振荡形成的阈值和相位条件	(106)
3.5.3	四能级系统均匀加宽激光器稳态运转的建立	(108)
3.5.4	三能级系统均匀加宽激光器稳态运转的建立	(114)
3.6	小结	(117)
<b>第四章 掺钕玻璃材料的光学特性</b>		<b>(118)</b>
4.1	概述	(118)

4.2	放大器效率 .....	(120)
4.2.1	能量消耗过程 .....	(121)
4.2.2	硅中稀土元素的溶解性 .....	(126)
4.3	1500nm 处的截面和光谱 .....	(128)
4.3.1	电子结构和跃迁速率 .....	(128)
4.3.2	吸收和受激发射截面 .....	(131)
4.3.3	带宽 .....	(136)
4.4	泵浦波长 .....	(139)
4.4.1	980-nm 泵浦带 .....	(140)
4.4.2	800-nm 泵浦带 .....	(142)
4.4.3	1480nm 泵浦带 .....	(147)
4.5	小结 .....	(153)
<b>第五章</b>	<b>光纤形式的反射器和谐振腔</b> .....	<b>(163)</b>
5.1	概述 .....	(163)
5.2	光纤圈反射器 .....	(163)
5.2.1	光纤圈反射器的基本工作原理 .....	(164)
5.2.2	理论分析 .....	(167)
5.2.3	实验和理论结果 .....	(172)
5.2.4	波长响应 .....	(174)
5.2.5	光纤圈反射器的应用 .....	(177)
5.3	横向耦合光纤 Fabry-Perot 谐振腔 .....	(178)
5.3.1	结构和优点 .....	(179)
5.3.2	场方程方法 .....	(179)
5.3.3	复电场分析 .....	(180)
5.3.4	光纤耦合器的宏电场表示法 .....	(181)
5.3.5	I 型 TCFFP 谐振腔 .....	(183)
5.3.6	II 型 TCFFP 谐振腔 .....	(191)
5.4	小结 .....	(195)
5.5	附录 .....	(197)
<b>第六章</b>	<b>光纤激光放大器和振荡器理论分析</b> .....	<b>(201)</b>

6.1	概述 .....	(201)
6.2	基本理论 .....	(202)
6.3	自由空间激光器 .....	(208)
6.4	光纤激光器 .....	(212)
6.4.1	光纤激光器的结构 .....	(212)
6.4.2	系数 $F_{\text{point}}$ 的意义 .....	(212)
6.4.3	增益和阈值 .....	(215)
6.4.4	斜率效率 .....	(217)
6.4.5	光纤振荡器的设计 .....	(218)
6.5	泵浦模和掺杂分布对光纤激光器的影响 .....	(220)
6.5.1	掺杂光纤数学模型 .....	(220)
6.5.2	泵浦模和掺杂粒子分布形状的影响 .....	(224)
6.5.3	小信号放大器中激发态吸收(ESA)的影响 .....	(227)
6.6	用高斯近似方法分析光纤放大器的基本特性 .....	(230)
6.6.1	掺杂光纤行波放大器的基本原理 .....	(230)
6.6.2	光学泵浦下的粒子数反转——速率方程 .....	(232)
6.6.3	光纤放大器中信号的传播 .....	(234)
6.6.4	吸收和发射截面 .....	(235)
6.6.5	波导的影响 .....	(236)
6.6.6	简单解 .....	(237)
6.6.7	光纤放大器的增益特性测量 .....	(241)
6.6.8	增益饱和 .....	(242)
6.6.9	寄生效应 .....	(243)
6.6.10	泵浦带的选择 .....	(245)
6.6.11	存在 ESA 时的解析解 .....	(246)
6.6.12	噪声 .....	(247)
6.7	小结 .....	(250)
<b>第七章 光纤激光器的调 Q 与锁模 .....</b>		<b>(254)</b>
7.1	概述 .....	(254)
7.2	调 Q 的基本原理 .....	(255)

7.3	光纤激光器调 Q 的一般理论 .....	(256)
7.4	调 Q 光纤激光器特性 .....	(262)
7.4.1	振荡阈值 .....	(262)
7.4.2	随纤芯半径的变化 .....	(263)
7.4.3	能量和功率的转换 .....	(264)
7.4.4	随腔损耗的变化 .....	(266)
7.5	锁模基本原理 .....	(267)
7.6	锁模输出 .....	(270)
7.5	小结 .....	(272)
<b>第八章</b>	<b>可调谐单模光纤激光器 .....</b>	<b>(275)</b>
8.1	概述 .....	(275)
8.2	可调谐单模光纤激光器的基本理论分析 .....	(276)
8.3	常规单模光纤激光器调谐输出实验 .....	(279)
8.3.1	可调谐掺 Nd <sup>3+</sup> 光纤激光器 .....	(279)
8.3.2	掺 Er <sup>3+</sup> 离子光纤激光器 .....	(283)
8.4	具有波长调节和可变耦合输出光纤反射器的光纤激光器 .....	(284)
8.4.1	光纤圈反射器 .....	(286)
8.4.2	可调谐光纤圈反射器:结果 .....	(290)
8.4.3	波长调节 .....	(291)
8.4.4	可变耦合输出功率 .....	(292)
8.5	小结 .....	(295)
8.6	附录:具有一个光纤圈和一个反射镜的光纤谐振腔理论 .....	(296)
8.6.1	无源响应:腔谐振 .....	(296)
8.6.2	有源响应:振荡条件 .....	(297)
<b>第九章</b>	<b>超荧光光纤激光器理论 .....</b>	<b>(299)</b>
9.1	概述 .....	(299)
9.2	基本原理 .....	(300)
9.2.1	均匀泵浦的多模光纤 .....	(303)

9.2.2	单模光纤 .....	(305)
9.3	超荧光光纤激光器的特性 .....	(305)
9.3.1	增益和功率分布 .....	(305)
9.3.2	输出曲线 .....	(307)
9.3.3	阈值条件 .....	(308)
9.3.4	效率 .....	(311)
9.3.5	最佳输出功率 .....	(312)
9.3.6	线宽 .....	(313)
9.4	小结 .....	(314)
9.5	附录 .....	(315)
9.5.1	高增益极限下的输出功率 .....	(315)
9.5.2	阈值条件 .....	(316)
<b>第十章</b>	<b>掺稀土元素氟化锆光纤激光器和放大器</b> .....	<b>(319)</b>
10.1	概述 .....	(319)
10.2	掺铟离子氟化锆光纤放大器 .....	(320)
10.3	掺铟氟化锆光纤激光器在 $2.7\mu\text{m}$ 波长处的连续输出 .....	(326)
10.4	掺铈离子氟化锆光纤激光器 .....	(328)
10.5	掺铥氟化锆光纤激光器在 $2.3\mu\text{m}$ 处的脉冲发射 .....	(334)
10.6	掺钕氟化锆光纤激光器在 $2.08\mu\text{m}$ 和 $1.38\mu\text{m}$ 处的激光输出 .....	(336)
10.7	小结 .....	(339)

# 第一章 掺稀土元素光纤激光器和放大器概述

## 1.1 引言

掺稀土元素光纤激光器和放大器的研究和应用最近几年来受到了国际科技界的广泛重视,因为其成本低,易于制作,而且工作波长对目前和将来的某些应用尤其重要,例如在光通信,医学,传感器和光谱学等领域。

本书的目的是论述这个领域中的最新发展,尤其侧重于在光通信领域的应用。本章对工作在这一领域中的科技工作者和对该领域感兴趣的人们提供一个综述,以期望对他们的学习和研究工作有所帮助,也更想籍此引起人们对这个领域的兴趣。综述中仅进行定性的描述,而不涉及理论分析。在后面的章节中再较为详细地讨论有关理论问题。本节将讨论什么是光纤激光器和放大器,它的特点及其发展简史。

### 1.1.1 关于光纤激光器

在讨论光纤激光器的重要性之前,有必要了解光纤激光器的基本结构。一个纵向泵浦的光纤激光器的基本结构如图 1-1 所示。一段掺杂稀土金属离子的光纤被小心地放置在两个反射率经过选择的腔镜之间。泵浦光从光纤激光器的左边腔镜耦合进入光纤。光纤激光器是一个波导型的谐振装置,光波的传输由光纤所担负。这种结构实际上就是 Fabry-Perot 谐振腔结构,如图 1-1 所示。光纤激光器实际上是一个波长转换器。在泵浦波长上的光子被介质吸收,形成粒子数反转,最后在掺杂光纤介质中产生受激发射而输出

激光。

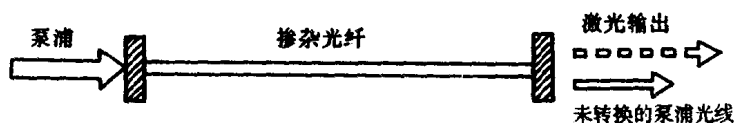


图 1-1 光纤激光器的基本结构示意图

### 1.1.2 光纤形式激光器的优点

光纤激光器具有波导式的结构,可以在光纤纤芯中产生较高的功率密度。它所基于的硅光纤的工艺现在已经非常成熟,因此可以制作出高精度,低损耗的光纤。如果光纤的选择使泵浦和信号波长均运行于单模工作状态,则泵浦和信号光场之间的重合性非常好。由于光纤的几何特点,使得这种结构具有较高的面积-体积比,因而其散热效果很好。以上这些特点就决定了硅为基质的光纤激光器可以在较低的功率泵浦下工作在连续的输出状态,而其它块状玻璃介质的激光器一般仅能工作在脉冲状态,常需要相当高的泵浦能量以获得激光输出。

光纤的圆柱形结构还具有下列两个优点,便于在光通信和医学中应用。首先,由于光纤激光器本质上是一种光纤结构,因此它可以以较高的耦合效率与目前的光纤传输系统连接。第二,由于光纤结构小巧便于操作,在医学的某些应用中是理想的,例如深入到人的胃中。

事实上,基于光纤结构的激光器使得某些器件成为可能。我们可以利用定向耦合器的优点得到光纤形式的分束器。这一点对避免光纤系统连接时的衍射损耗非常有利。这样就可以不离开光纤形式完成光波的分束,利用这一特点就可以形成全光纤反射器,干涉仪和谐振腔。这种光纤激光器的设计使得低阈值操作,波长调谐和窄谱线输出都成为可能。

掺稀土元素离子激光器的一个重要性质在于其输出光谱特性受到掺杂离子周围分子环境的显著影响。这种性质引起两个可利

用的特性。其一是可以通过改变基质玻璃的组份来调节输出波长。其二是当基质是玻璃时,可以观察到较宽的荧光。通过对图 1-1 所示的腔结构进行改进,例如加上一个波长选择反射器,就可以得到 50nm 或更宽范围内的可调谐激光输出。

光纤激光器可以提供许多输出波长,其中某些波长对于光通信是非常重要的。输出光波长由掺杂到纤芯中的稀土元素离子所决定。在光谱段上 1.33 $\mu\text{m}$  和 1.55 $\mu\text{m}$  波长的输出是最重要的,因为它们对应于光通信的两个低损耗窗口。1.55 $\mu\text{m}$  的输出操作可以利用半导体器件作为泵浦源,因此意味着用较低的成本即可实现有价值的激光输出。目前,利用光纤激光器得到了 2—3 $\mu\text{m}$  范围内的激光谱线输出,这个波段的输出在更低损耗的中红外通信中有着潜在的应用价值。

### 1.1.3 光纤激光器的发展简史

光纤激光器并不是什么新的器件,尽管到目前才引起广泛研究和重视。可以毫不夸张地说光纤激光器的历史和激光器本身的历史几乎一样长。第一个光纤激光器的荣誉应归于 Snitzer 和 Koester,他们在 1963 年和 1964 年分别发表了多组份玻璃光纤中的光放大结果<sup>[1,2]</sup>,当时他们正为美国光学公司(American Optical Corporation)工作。不久以后,光纤激光器被用于光学信息处理方面的工作<sup>[3]</sup>。在光纤放大器方面的早期工作还有前苏联的 Letokhov 和 Pavlik<sup>[4]</sup>。令人感兴趣的一篇非常重要的文章是属于高锟和 Hockham 的<sup>[5]</sup>,他们在 1966 年首先讨论了利用光纤作为通信介质的可能性。在光纤激光器发展的最初阶段就考虑了用半导体光源进行泵浦的可能性<sup>[6]</sup>。在 70 年代,Bell 实验室(现在的 AT&T)的一个小组也开展了这方面的研究工作。

在 1975~1985 这十年中有关这个领域的文章较少,不过在这十年中许多发展光纤激光器所必须的工艺技术趋于成熟。低损耗的硅单模光纤和半导体激光器都已商品化并得到了广泛的应用,而且还进行了氟化锆光纤的制作和完善了基于硅光纤的定向耦合



器的制作。这些都为光纤激光器的研制铺平了道路。半导体激光器,尤其是高功率输出的半导体激光器作为泵浦源在光纤激光器中极为重要。而熔硅型定向耦合器则对全光纤的激光器的设计起着举足轻重的作用。

在 80 年代中后期的几年中,英国南安普敦大学的电子工程系和物理系也卷入了这个领域的研究<sup>[8,9]</sup>,他们在其中扮演了非常重要的角色,是他们演示了用 MCVD 方法制作的单模光纤所构成的激光器的运行,从而再度唤起人们对这个研究领域的兴趣。此后该校的这两个研究小组先后报导了光纤激光器的调 Q,锁模,单纵模输出以及光纤放大器方面的研究工作。英国通信研究实验室(BTRL)于 1987 年首次报导了其研究成果<sup>[10,11]</sup>。BTRL 的研究人员展示了用各种定向耦合器制作的精巧的光纤激光器装置,他们在增益和激发态吸收等研究领域中也作了大量的基础工作,在用氟化锆光纤激光器获得各种波长的激光输出谱线方面做了开拓性的工作,最重要的是制成了利用半导体激光器作为泵浦源的光纤激光器和放大器。其它在这个领域内发表过研究成果的研究机构还有德国汉堡的技术大学<sup>[12]</sup>,NTT<sup>[13]</sup>,Hoya<sup>[14]</sup>,日本的三菱<sup>[15]</sup>,美国的 Polaroid Corporation<sup>[16]</sup>,斯坦福大学<sup>[17]</sup>和 GTE<sup>[18]</sup>等。当然世界上还有许多研究机构活跃于这个研究领域。

国内从 80 年代末和 90 年代初开始这个领域的研究工作,并取得了一些阶段性的成果。例如清华大学,中国科技大学,上海科技大学以及邮电部和电子部所属的一些研究单位在光纤激光器,放大器和相关器件的研究中都取得了一定的进展。但是由于工艺条件和加工技术以及相关器件的制备方面还与国外有明显的差距,所以从总体上讲在这个领域还没有实用化的产品。

## 1.2 光纤中的激光效应

这一节将讨论光纤中激光产生的基础,包括物理机制和实际应用中的一些问题。这里仅定性地处理光纤中激光产生的机理,有