

图解光纤激光器入门

解説

ファイバーレーザー

(日)住村和彦 西浦匡则 著

—基礎編—

宋 鑫 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

图解光纤激光器入门

(日) 住村和彦 著
西浦匡则
宋 鑫 译



机械工业出版社

本书以图解的方式详细地介绍了光纤激光器的基础知识,内容包括:激光基础、光纤的特性、各种光纤介绍、光纤激光器用的光学元件、光纤激光器基础等5章。

本书从最基础的激光原理开始进行浅显易懂的解说,适合通信技术的初学者和自学者学习阅读,也可供通信行业从业人员参考,同时也可作为大专院校相关专业学生和教师的参考书。

解説ファイバーレーザー-基礎編

Copyright C 2011 by Kokyo. LLC

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the publisher.

The Chinese edition Copyright C 2013 by China Machine Press.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字01-2011-3866号

图书在版编目(CIP)数据

图解光纤激光器入门/(日)住村和彦,(日)西浦
匡则著;宋鑫译. —北京:机械工业出版社,2013.8
ISBN 978-7-111-43121-3

I. ①图… II. ①住… ②西… ③宋… III. ①光纤器
件-激光器-图解 IV. ①TN248-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第146250号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:张沪光 郑彤

版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟

封面设计:赵颖喆 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013年9月第1版·第1次印刷

148mm×210mm·6印张·191千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-43121-3

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

21 世纪是光的时代。在光学技术中显著发展之一的就是激光技术。虽然从激光发明到今年恰好经过了 50 年，但仍然在不断开拓新的应用领域。近年来激光的研究和产品开发中进展最快的就是光纤激光器。光纤激光器和以前的激光器相比，具有体积小、重量轻，不需要维护，光束质量好，优良的长期稳定性，宽增益幅度、高增益、高效率，容易实现高输出功率，可进行长距离传输等特点。

最初光纤激光器的实用化是从光通信中使用掺铒（Er）光纤激光放大器（EDFA）开始的。因为不需要光电转换就可以对光信号进行直接放大，所以使光通信市场得到了迅速发展。随着泵浦用半导体激光器的普及和高性能化的发展，高输出功率光纤激光器的研究开发也得到了快速的发展。现在，掺镱（Yb）单模光纤激光器 CW（连续波输出）可以达到 10kW，多模可达 50kW 的水平。除印字、打标记之外，汽车的金属焊接、加工等也得到了广泛应用。此外，也开始在 LASIK（视力矫正）手术用光源，生物体和眼底的断层成像用光源等领域中得到应用。

虽然光纤激光器在研究和工业领域中备受关注，但相关书籍并不多。因此，笔者认为为了光学技术的发展，对信息进行收集是有必要的，所以就着手写了这本书。关于光纤激光器的知识，在调查收集网络信息的同时，也集中了笔者 7 年间积累的资料、信息和知识。为了使初学者也能理解光纤激光器的知识，本书从最低限度的激光原理开始进行浅显易懂的解说。本书是定位于光纤激光器的基础知识，对于应用知识，如有需要笔者将进行执笔编写。

本书和单纯的书籍有所不同，针对 PC 版本、电子书等将来的形式进行了考虑。对于电子版本，为了能够简单地进行检索，更加深入地对知识进行了解，参考文献中收集了很多的引用地址和论文网址。读过本书后有什么疑问，或者对光学知识有不理解的地方，可以在光响（有限公司）的 Q&A（问与答）网址上进行询问。虽然我们也有很多不知道的地方，但我们尽可能地进行解答。读过此书和看过光响的网站以后，我们希望读

者可以理解光纤激光器的装配知识。同时，如果读者有想购买的元件，可以和 info@symphotony.com 联系。为了光学技术的发展，光响愿意为技术人员和研究人员提供支援。本书如果能对读者的技术理解起到作用，将是作者的荣幸。

为了使 21 世纪真正成为光的时代

2010 年 12 月 1 日

面向技术人员和研究者的公司：光响
住村和彦、西浦匡则

目 录

前言

第1章 激光基础	1
1.1 什么是激光	1
1.1.1 特性	1
1.1.2 振荡工作和参数	1
1.2 激光的基础原理	3
1.2.1 能级	4
1.2.2 光的吸收和发射	4
1.2.3 增益和反转分布	6
1.2.4 3能级模型和4能级模型	8
1.3 激光器的振荡特性	13
1.3.1 谐振条件	14
1.3.2 振荡条件	16
1.3.3 振荡光谱	19
1.3.4 脉冲激光器	20
1.4 各种激光器	22
1.4.1 液体激光器	23
1.4.2 气体激光器	23
1.4.3 半导体激光器	28
1.4.4 固体激光器	30
1.4.5 光纤激光器	37
1.5 光纤激光器的特征	40
参考文献	42
第2章 光纤的特性	51
2.1 光纤的构造	51
2.1.1 临界角和相对折射率差	52
2.1.2 数值孔径	52
2.1.3 光纤的被覆	53

2.2 光纤的传播特性	55
2.2.1 基本模式和高次模式	56
2.2.2 模式色散	56
2.2.3 单模光纤和多模光纤	57
2.2.4 归一化传播常数和波导参数	59
2.2.5 模场直径和截止波长	62
2.3 光纤的损耗特性	63
2.3.1 材料的固有损耗	63
2.3.2 杂质吸收所致的损耗	64
2.3.3 构造不完全所致的损耗	65
2.4 光纤的色散特性	65
2.4.1 相速度和群速	65
2.4.2 波长色散	66
2.4.3 色散参量	67
2.4.4 各种色散抑制光纤	70
2.4.5 色散的测定方法	71
2.5 光纤的非线性特性	74
2.5.1 光纤的非线性光学效应	74
2.5.2 非线性折射	75
2.5.3 非线性散射	79
2.5.4 光孤子效应	84
2.5.5 数值分析	87
参考文献	92
第3章 各种光纤介绍	96
3.1 偏振保持光纤	96
3.1.1 什么是偏振光	96
3.1.2 偏振保持光纤的特性	98
3.2 双包层光纤	102
3.2.1 纤芯直接泵浦和包层泵浦的比较	102
3.2.2 高效率泵浦的方法	104
3.3 大模面积光纤	106
3.3.1 直线偏振模控制	108
3.3.2 新型大口径光纤	109
3.4 光子晶体光纤	111

3.4.1 PCF 的种类	112
3.4.2 PCF 的分析方法和制造方法	113
3.4.3 PCF 的操作方法	114
3.4.4 PCF 的应用领域	115
参考文献	115
第4章 光纤激光器用的光学元件	121
4.1 泵浦光源——激光二极管	121
4.1.1 光纤耦合 LD 的构成	123
4.1.2 光谱的稳定化	124
4.2 增益介质——掺稀土光纤	125
4.2.1 掺 Yb 光纤	127
4.2.2 掺 Er 光纤	130
4.3 反馈元件——光纤布拉格光栅	132
4.3.1 FBG 的构造	133
4.3.2 制作方法	134
4.3.3 LPG 和 CFBG	135
4.4 光隔离器	136
4.4.1 光隔离器的原理	136
4.4.2 带光纤的光隔离器	138
4.5 光循环器	139
4.6 光耦合器	141
4.6.1 按构造分类	141
4.6.2 光纤耦合器	142
4.7 偏振光(偏振)控制器	145
4.8 波长变换器件	146
4.8.1 波长变换过程	147
4.8.2 相位匹配方法	148
4.8.3 晶体的种类	149
参考文献	150
第5章 光纤激光器基础	155
5.1 光纤放大	155
5.1.1 掺稀土光纤放大器	155
5.1.2 光纤拉曼放大器	158
5.1.3 速率方程	158

5.1.4 沿光纤光轴的传播方程	159
5.2 啁啾脉冲放大 (CPA)	164
5.2.1 CPA 系统的构成	164
5.3 主控振荡器-功率放大器 (MOPA)	166
5.4 光束品质	168
5.5 光纤的光学损伤阈值	168
5.5.1 连续振荡激光器的场合	170
5.5.2 脉冲振荡激光器的场合	170
5.6 光纤的热分析	172
5.6.1 光纤的热负荷极限	172
5.6.2 DCF 断面的温度分布	175
5.6.3 光纤的热应力	176
5.6.4 光纤的热透镜效应	177
参考文献	179

第 1 章

激光基础

1.1 什么是激光

激光 (laser) 是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的第一个字母的略称, 受激辐射光放大的意思。激光是通过人工方式, 用光或者放电等强能量激发特定的物质而产生的光。

1.1.1 特性

激光和自然光相比有很多优点。激光的主要特征有以下 4 点。

- ①单色性: 光谱幅度很窄。
- ②方向性: 光束发散性小。
- ③相干性: 能够相互发生干涉现象。
- ④可控性: 输出光比较容易调制。

激光与自然光相比具有非常高的功率、良好的单色性和指向性, 所以可以通过透镜将激光束聚焦到衍射极限, 从而提高能量密度。这表现出激光具有集光性和高亮度性的优点。以上的激光特征如图 1-1 所示。

1.1.2 振荡工作和参数

激光器由光放大器和光谐振腔构成, 激光器输出由光在谐振腔内振荡而获得。激光器的振荡工作分为两大类, 连续波振荡工作 (Continuous Wave Operation: CW Operation) 和脉冲振荡工作 (Pulsed Operation), 被分别称为连续波 (CW) 激光和脉冲激光。CW 激光是连续地产生恒定输出功率并进行振荡, 脉冲激光是按照固定的重复频率产生脉冲输出功率并

进行振荡。连续波振荡和脉冲振荡的状态如图 1-2 所示。

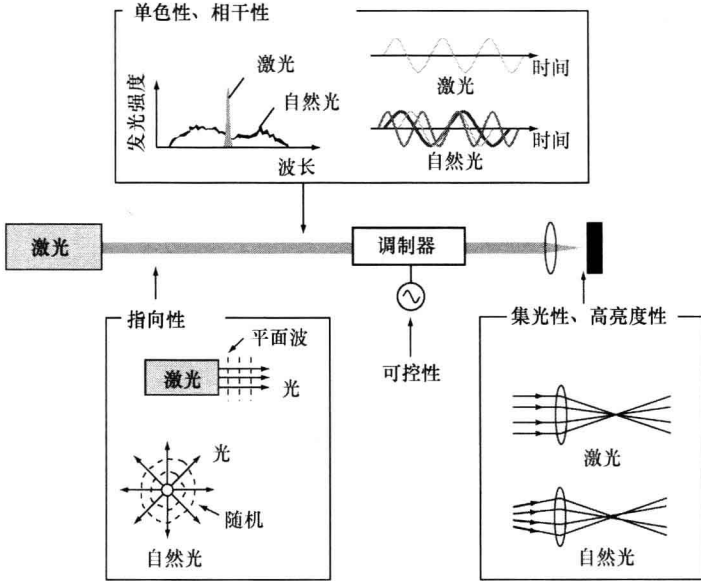


图 1-1 激光特征

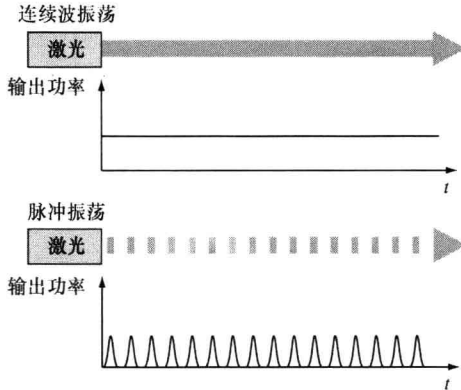


图 1-2 连续波振荡和脉冲振荡

CW 激光的特性由平均输出功率 (W) 来表示, 脉冲激光的场合由脉冲宽度 (s), 重复频率 (Hz), 脉冲能量 (J), 峰值输出功率 (W) 等来

表示，这些参数有以下关系。

平均输出功率 (W) = 脉冲能量 (J) × 脉冲重复频率 (1/s)

$$\text{峰值输出功率 (W)} = \frac{\text{脉冲能量 (J)}}{\text{脉冲宽度 (s)}}$$

脉冲激光的各种参数的关系如图 1-3 中所示，与激光有关的主要参数的单位见表 1-1。

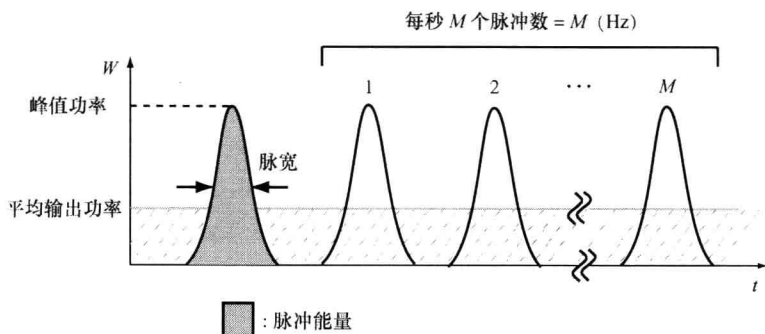


图 1-3 脉冲激光各种参数的关系

表 1-1 激光参数的单位

名 称	单 位
波长 (Wavelength)	m
光谱带宽 (Spectral bandwidth)	
平均输出功率 (Average output power)	W
脉冲峰值输出功率 (Peak power)	
脉冲重复频率 (Pulse repetition rate, PRR)	Hz
脉冲宽度或脉冲持续时间 (Pulse width or pulse duration)	S
脉冲能量 (Energy per pulse or pulse energy)	J
损耗 (Loss)	dB 或 dB/km
增益 (Gain)	
光束品质 M^2 (Beam quality)	

1.2 激光的基础原理

本节尽量不使用方程式，对光纤激光器的振荡原理进行最低限度理解所需要的基本事项进行阐述^[14]。

1.2.1 能级

笔者对从现在开始频繁使用的能级概念进行说明作为理解激光原理的预先准备。

原子如图 1-4 所示，由原子核和多个电子构成。电子存在于原子周围离散的轨道上，普通状态下，为达到原子的最小能量，电子从低能量轨道（接近原子核的轨道）开始填充。这种状态称作基态，基态的原子是稳定的。

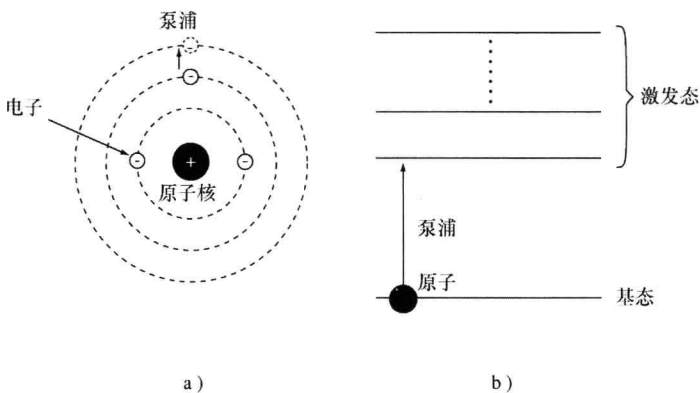


图 1-4 原子模型与能级图

a) 原子的构成 b) 能级图

基态原子接受光和热以后，最外侧轨道上的电子（具有高能量的电子）可以向更外侧的轨道上跃迁。这时，原子的能量增加。为描述这种状态，以基态作为基准，按照浅显易懂的形式对能量值进行作图，称作能级图。基态的能级称作基态能级，原子的能级从基态能级跃迁到高能级叫做激发（泵浦）。另外，激发态的能级称为激发能级。

还有，不仅仅限于原子，对于分子、离子等也有能级概念。作为激发方法，除了光以外，还有原子和分子的碰撞、化学反应等。

1.2.2 光的吸收和发射

为了理解激光的原理，就必须明白物质和光相互作用的吸收、自发发射、受激发射和非发射跃迁（和光没有直接关系）的关系。我们利用

原子分布密度 N_1 ，能级简并度 g_1 的能级 E_1 （基态能级）和原子分布密度 N_2 ，能级简并度 g_2 的能级 E_2 的过程进行说明。这时， E_2 是 E_1 的上能级（不一定是 E_1 的邻近能级）。这样的模型称为 2 能级模型。图 1-5 所示的是 2 能级模型的光的吸收和发射。

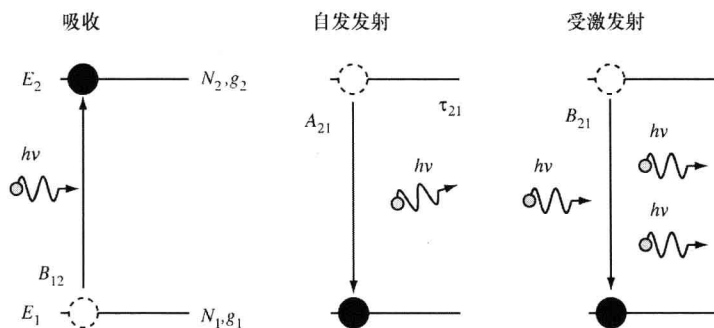


图 1-5 2 能级模型的光的吸收和发射

处在 E_1 状态的原子，受到玻耳条件式 $E_2 - E_1 = h\nu$ 的振动频率 ν 的光子的入射，此处， h 是普朗克常数。基于以上条件，对于和激光原理有直接相关的吸收、自发发射、受激发射和非发射跃迁进行描述。

(1) 吸收

处在能级 E_1 的原子以一定几率（受激）吸收（stimulated absorption）光子跃迁（吸收跃迁）到 E_2 。光子的吸收容易度参数用吸收的跃迁几率 B_{12} 来定义。 B_{ji} 也被称为爱因斯坦的 B 系数。

(2) 自发发射

被激发到能级 E_2 的原子，激发后经过一定时间（寿命 E_{21} ），自发的放射出频率为 ν 的光子（自发放射光），跃迁到能量较低而稳定的 E_1 能级。这种自发的光发射过程称为自发发射（spontaneous emission）。自发发射光由于具有随机的偏振光和相位而成为激光的杂波，但这种自发发射光是激光的种子光。光子发射的容易度参数用跃迁几率 A_{21} 来定义。 A_{ij} 也是称为爱因斯坦常数 A 系数。自发发射光的寿命和 A 系数是互为倒数的关系。

(3) 受激发射

被激发到能级 E_2 的原子，再被振动频率 ν 的光子激发（stimulated）

以后,沿入射光子方向,按同相位、同模式发射出光子。这种过程称为受激发射。受激发射是光放大(Light Amplification)的原理,是对激光的直接作用过程。受激发射的容易度参数用跃迁几率 B_{21} 来定义,与吸收的跃迁几率和简并度有 $g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$ 的关系。与激光振荡相关的受激发射跃迁被称作激光跃迁,这时的上能级称为激光上能级,下能级称为激光下能级。

(4) 非发射跃迁

从上能级到下能级的跃迁,除了放射出光子以外,还有通过晶格振动放出的能量,称为非发射跃迁。自发发射和非发射跃迁过程比较容易发生,随介质不同而不同。

1.2.3 增益和反转分布

原子(或者分子)被泵浦到激发态以后,同时发生吸收、自发发射、受激发射(和非发射跃迁)。这里,原子的发射光谱函数用 $g(\nu)$ 表示,入射到介质的光子振动频率为 ν ,强度用 $I_\nu = c\rho_\nu/n$ 表示, c 是光速, n 是介质的折射率, ρ_ν 是频率 ν 处的能量密度。这时,介质单位长度的光强度的增加用下式表示:

$$\frac{dI_\nu}{dz} = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) \frac{c^2 g(\nu)}{8\pi n^2 \nu^2 \tau_{21}} I_\nu = [N_2 - (g_2/g_1) N_1] \sigma(\nu) I_\nu = \gamma(\nu) I_\nu \quad (1-1)$$

式中, $\sigma(\nu)$ 是受激发射截面积; $\gamma(\nu)$ 是增益。它们可用下式表示:

$$\sigma(\nu) = \frac{c^2 g(\nu)}{8\pi n^2 \nu^2 \tau_{21}} \quad (1-2)$$

$$\gamma(\nu) = \sigma(\nu) [N_2 - (g_2/g_1) N_1] \quad (1-3)$$

受激发射截面积(吸收截面积)可以这样考虑,它是原子所具有的一个截面积,入射到这个截面积里面的光子引起受激发射(吸收)。对于单纯的2能级模型,吸收截面积和受激发射截面积是相等的。

这里,如果 $N_2 > (g_2/g_1) N_1$ (没有简并的2能级模型的情况($g_1 = g_2$)是 $N_2 > N_1$)成立,受激发射超过吸收,光被放大(见图1-6a)。另一方面,热平衡状态(见图1-6b)下,原子的分布密度按照玻耳兹曼分布, $N_2 < (g_2/g_1) N_1$,由于 $\gamma(\nu)$ 为负数,入射光在介质中传播时随指数衰减。此外,即使增大了入射光的强度,对单个原子而言,吸收和受激发射

的几率相等，向能级 E_2 跃迁增加的同时，由于向能级 E_1 的跃迁也增加，结果导致 $N_2 < (g_2/g_1) N_1$ 。

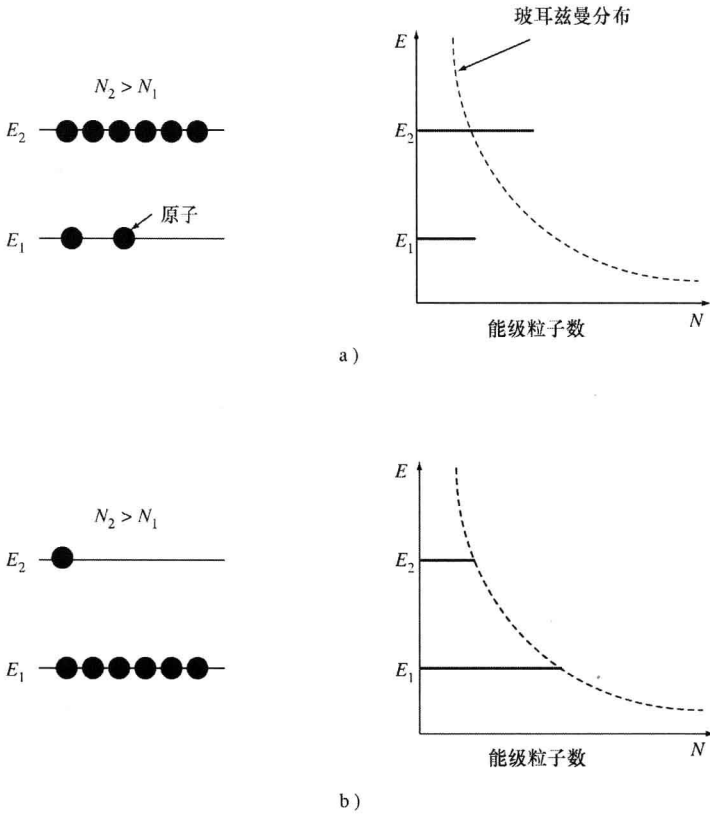


图 1-6 2 能级模型图
a) 反转分布状态和 b) 热平衡状态的能级图

$N_2 > (g_2/g_1) N_1$ 的状态称为反转分布状态。但即使用光激发 2 能级模型，也无法得到反转分布（负温度）。实际的激光器用以下两种方法实现反转分布：

- ①利用 3 能级、4 能级，用光来激发；
- ②利用注入电流、放电、化学反应来激发。

关于第一种方法，在 1.2.4 节中说明，应用在半导体激光器和气体激光器中的第二种方法，将在 1.4 节中说明。

玻耳兹曼分布

在绝对温度 T 的热平衡状态, 处在能级 E_i ($i=1, 2, 3, \dots$) 的原子密度 N_i 一般遵从玻耳兹曼分布 (Boltzmann distribution), N_i 和 E_i 有以下关系:

$$N_i = N_{\text{tot}} \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right) \quad (1-4)$$

式中, N_{tot} 是总原子密度; k_B 是玻耳兹曼常数。将上式变换成 N_1 和 N_2 的公式为

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right) \quad (1-5)$$

1.2.4 3 能级模型和 4 能级模型

关于 3 能级和 4 能级模型的介质, 我们利用实现反转分布的能级图来进行说明, 作为激光介质被放到谐振腔里面时的反转分布密度还有光子密度随时间的变化可用速率方程式来表示。

1. 3 能级模型

理想的 3 能级模型的能级如图 1-7 所示。在这种模型中, 激光下能级 E_1 和基态能级相同, 下能级总是存在原子数分布。还有, 激光上能级 E_2 的上面存在宽带幅的激发能级 E_3 。为了高效形成反转分布, 激发能级 E_3 的寿命要短些, 并且从激发能级 E_3 向激光上能级 E_2 跃迁的非发射跃迁的弛豫时间 τ_{32} , 要有足够短于从激发能级 E_3 向基态能级 E_1 回转的寿命。由此, 即使增强激发光, 也基本上不会引起从激发能级 E_3 向基态能级 E_1 的受激发射, 从而实现反转分布。在这种状态下, 利用从激光上能级 E_2 向基态能级 E_1 的受激发射实现激光振荡。被激发到激发能级的原子数中, 向激光上能级跃迁的比率称为激发量子效率 η_p , 用下式定义:

$$\eta_p = \left(1 + \frac{\tau_{32}}{\tau_{31}}\right)^{-1} \quad (1-6)$$

激发量子效率 η_p , 被激发从基态能级 E_1 向激光上能级 E_2 跃迁的几率 W_p , 被激发从基态能级 E_1 向激发能级 E_3 跃迁的几率 W_{13} 有 $W_p = \eta_p W_{13}$ 的关系。

这里, 因为激发能级的弛豫时间非常短, 总原子密度 $N_{\text{tot}} = N_1 + N_2$,