

激光空间应用建模与仿真

李小将 张东来 杨业伟 等著
徐浩东 刘天华 黄 勇 王卫杰



科学出版社

激光空间应用建模与仿真

李小将 张东来 杨业伟 等 著
徐浩东 刘天华 黄 勇 王卫杰

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是关于激光空间应用建模与仿真研究的专著,主要内容是三篇组成,共12章。第1章为绪论,主要介绍激光及其空间应用的概念、原理和国内外相关研究现状。第2~5章为第一篇内容,主要研究激光对飞行靶的辐照效应。第6~8章为第二篇内容,主要研究地基激光清除空间碎片建模与仿真。第9~12章为第三篇内容,主要研究激光空间输能光电转换建模仿真与实验。

本书新颖性、前沿性、应用性较强,可供从事激光空间应用的工程技术人员参考和使用,也可作为高等院校相关专业的教师和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

激光空间应用建模与仿真/李小将等著. —北京:科学出版社,2016.9
ISBN 978-7-03-049924-0

I. ①激… II. ①李… III. ①激光辐照-光电效应-系统建模-计算机仿真-研究②激光应用-系统建模-计算机仿真-研究 IV. ①TN249

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第220588号

责任编辑:张海娜/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张倩/封面设计:蓝正设计

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年9月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:370 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

激光自问世以来,以其方向性好、单色性好和亮度高等特点,备受各国的重视和支持,使激光技术得到迅猛发展,已渗透到众多领域,对民用和军事技术等都产生了深刻的影响。目前,有关激光的基础理论知识已日趋完善,随着不同功率、能量和满足不同任务需求的激光器的研制成功,学者逐渐将研究重点转向激光在不同领域的应用。激光应用特别是其在空间领域的应用,已引起世界各国的关注,成为当前激光应用中具有代表性的研究方向之一。

激光空间应用是指应用激光作为载体服务某种空间任务的技术,如激光空间通信、激光空间测量等。目前,随着激光在空间领域应用的进一步拓展,激光辐照飞行靶、激光清除空间碎片和激光空间输能等新型激光空间应用也越来越成为大家研究的热点。激光辐照飞行靶是指利用激光器发射的高能激光束传输能量,辐照作用在空间飞行靶上,产生热学、力学以及等离子体等效应。激光清除空间碎片是指利用连续激光烧蚀空间碎片产生的热效应使其汽化或利用脉冲激光烧蚀空间碎片产生的冲量耦合效应使其减速降轨进入大气层烧毁,实现对空间碎片的清除。激光空间输能实际上是一种远距离无线能量传输手段,本质上是通过激光器将某种形式的能量转换为光能,然后以激光束为载体,将能量以光能的形式传输到远距离目标上,目标再将激光光能转换为某种其他可以利用或存储的能量,从而实现能量的远距离无线传输。激光的上述三种空间应用前沿性、探索性强,科技含量高,对改进航天器防护设计、净化空间环境、提高航天器使用寿命等具有重要意义。

本书内容分为三篇,共12章。第1章为绪论,介绍激光概念及产生机理、激光器组成、工作机理及分类,阐述激光空间应用概念与原理,总结相关国内外研究现状与趋势。第一篇(第2~5章)介绍飞行靶激光辐照参数建模,其中第2章设定飞行靶描述模型和激光器参数模型,设定激光辐照交汇场景,给出激光辐照参数求解模型;第3章建立地基激光辐照水平匀速飞行靶热传导模型,阐述基于有限容积法的温度场分布数值求解方法;第4章建立地基激光辐照俯冲加速飞行靶热传导模型,阐述基于有限容积法的热烧蚀效应数值求解方法;第5章设计并实现激光辐照飞行靶分布式仿真系统。第二篇(第6~8章)介绍地基激光清除空间碎片建模与仿真研究,其中第6章介绍地基激光空间碎片清除系统的功能组成、工作流程和仿真模型框架,并对所涉及的关键技术进行分析;第7章设计与实现地基激光空间碎片清除仿真模型,包括空间碎片模型、激光站布站模型、激光传输

模型、推力产生模型和降轨捕获模型；第 8 章分析激光参数对空间碎片降轨清除效果影响，研究不同任务规划模式和策略，对不同规划策略下地基激光空间碎片清除效果进行仿真分析。第三篇（第 9~12 章）介绍激光空间输能光电转换建模仿真与实验研究，其中第 9 章设计激光空间输能任务执行流程和激光空间输能系统组成及各部分功能，分析激光空间输能所需的关键技术和整个激光输能过程的效率；第 10 章构建空间激光输能光电转换模型，包括激光空间输能光电转换效率数学模型和用户星姿态指向控制模型；第 11 章仿真分析激光空间输能光电转换效率参数影响，包括等效串联电阻、常温下的反向饱和电流、光电池温度、激光辐照功率密度和激光入射角等参数的影响；第 12 章设计激光空间输能实验方案，验证前文所建模型及其仿真结果。

本书涉及多学科知识，覆盖面广、内容新颖，限于作者水平，书中疏漏在所难免，恳请专家和读者批评斧正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 激光概念及产生机理	1
1.1.1 激光概念	1
1.1.2 激光产生机理	1
1.2 激光器组成、工作机理及分类	4
1.2.1 激光器组成与工作机理	4
1.2.2 激光器分类	5
1.3 激光空间应用概念与原理	6
1.3.1 激光辐照飞行靶	6
1.3.2 激光清除空间碎片	7
1.3.3 激光空间输能	9
1.4 激光空间应用研究现状与趋势	11
1.4.1 激光辐照飞行靶研究现状与趋势	11
1.4.2 激光清除空间碎片研究现状与趋势	14
1.4.3 激光空间输能研究现状与趋势	21
参考文献	27

第一篇 激光对飞行靶辐照效应研究

第 2 章 飞行靶激光辐照参数建模	34
2.1 飞行靶描述模型	34
2.1.1 结构等效模型	34
2.1.2 运动模型	35
2.2 激光器参数描述模型	36
2.3 交汇场景设定	38
2.3.1 地基激光辐照水平匀速飞行靶	38
2.3.2 地基激光辐照俯冲加速飞行靶	40
2.4 辐照参数求解	44
2.4.1 水平匀速飞行靶辐照参数求解	44
2.4.2 俯冲加速飞行靶辐照参数求解	47

2.4.3 飞行靶旋转对辐照参数的影响	49
2.5 算例分析	50
2.5.1 目标参数设定	50
2.5.2 水平匀速飞行靶辐照参数算例	51
2.5.3 俯冲加速飞行靶辐照参数算例	54
2.5.4 辐照参数分析	58
2.6 小结	58
参考文献	58
第 3 章 激光辐照飞行靶温度场求解	59
3.1 热传导模型的建立	59
3.1.1 飞行靶表面的能量交换	59
3.1.2 热传导方程的建立	60
3.2 温度场分布的求解	62
3.2.1 飞行靶空间离散	62
3.2.2 激光能量输入离散	65
3.2.3 离散方程的建立	67
3.2.4 离散方程的求解	71
3.3 算例分析	73
3.3.1 参数设定	73
3.3.2 温度场求解结果	75
3.3.3 参数影响分析	83
3.4 小结	86
参考文献	86
第 4 章 激光辐照飞行靶热烧蚀效应求解	88
4.1 热烧蚀模型的建立	88
4.1.1 热烧蚀条件假定	89
4.1.2 固液相变分析	89
4.1.3 热传导方程的建立	90
4.2 热烧蚀效应的求解	92
4.2.1 激光能量输入离散	92
4.2.2 相变潜热的计算及烧蚀单元的处理	95
4.2.3 离散方程组的建立及求解	98
4.3 算例分析	104
4.3.1 参数设定	104
4.3.2 热烧蚀效应求解结果	104

4.4 小结	113
参考文献	113
第5章 激光辐照飞行靶仿真实现	114
5.1 总体设计	114
5.1.1 仿真环境设定	114
5.1.2 仿真系统需求分析	114
5.1.3 仿真系统组成	115
5.1.4 仿真成员信息交互设计	116
5.2 联邦设计	116
5.2.1 对象类设计	117
5.2.2 交互类设计	118
5.2.3 类的公布和订购	119
5.3 功能设计	121
5.3.1 任务流程设计	121
5.3.2 辐照效应求解	121
5.3.3 辐照效应综合分析	123
5.4 系统的实现与应用	123
5.4.1 应用环境	123
5.4.2 应用案例	123
5.5 小结	127
参考文献	127

第二篇 地基激光清除空间碎片建模与仿真

第6章 地基激光清除空间碎片需求分析与总体方案设计	128
6.1 空间碎片清除需求分析	128
6.2 地基激光空间碎片清除总体方案设计	130
6.2.1 地基激光空间碎片清除系统组成	130
6.2.2 地基激光空间碎片清除工作流程	130
6.2.3 地基激光空间碎片清除仿真模型框架设计	132
6.2.4 关键技术分析	135
6.3 小结	141
参考文献	141
第7章 地基激光空间碎片清除仿真模型	143
7.1 空间碎片模型	143
7.1.1 危险碎片组成分类	143

7.1.2	质量模型	143
7.2	激光站布站模型	144
7.2.1	模型设计	144
7.2.2	备选布站站点选择	145
7.2.3	空间碎片过境时间计算	146
7.2.4	基于 iSIGHT 的模型求解	147
7.2.5	应用实例	148
7.3	激光传输模型	153
7.3.1	激光大气传输分析	154
7.3.2	模型设计	157
7.3.3	应用实例	162
7.4	推力产生模型	164
7.4.1	激光辐照空间碎片产生推力机理	164
7.4.2	模型设计	164
7.4.3	应用实例	167
7.5	降轨捕获模型	168
7.5.1	空间碎片自然演化规律	168
7.5.2	激光辐照对空间碎片影响分析	171
7.5.3	速度增量作用位置对降轨影响	173
7.5.4	模型设计	176
7.5.5	应用实例	180
7.6	小结	182
	参考文献	183
第 8 章	地基激光空间碎片清除仿真结果分析	184
8.1	关键参数对空间碎片清除影响分析	184
8.1.1	激光参数对空间碎片降轨效果影响	184
8.1.2	提高激光参数指标的技术难度与可行性分析	186
8.2	空间碎片清除任务规划	188
8.2.1	空间碎片清除任务分析	188
8.2.2	单激光站多空间碎片清除规划	189
8.2.3	多激光站单空间碎片接力清除规划	190
8.2.4	多激光站多空间碎片优化清除规划	192
8.3	空间碎片清除仿真分析	193
8.3.1	单激光站多空间碎片清除仿真分析	193
8.3.2	多激光站单空间碎片清除仿真分析	197

8.3.3 多激光站多空间碎片清除仿真分析	202
8.4 空间碎片清除仿真可视化显示	205
8.5 小结	208
参考文献	209

第三篇 空间激光输能光电转换建模仿真与实验

第9章 空间激光输能系统工作机理	210
9.1 空间激光输能任务执行流程	210
9.2 空间激光输能系统组成	211
9.3 空间激光输能系统关键技术	214
9.3.1 高效、高质量激光器技术	214
9.3.2 激光束预处理技术	215
9.3.3 卫星姿态指向控制技术	216
9.3.4 目标捕获跟踪瞄准技术	216
9.3.5 目标捕获跟踪瞄准技术	217
9.4 空间激光输能系统效率分析	218
9.4.1 系统输能效率分析	218
9.4.2 光电转换效率分析	219
9.5 小结	219
参考文献	220
第10章 激光输能光电转换模型构建	222
10.1 光电转换基本原理	222
10.1.1 吸收作用	222
10.1.2 光生伏特效应	225
10.2 激光输能光电转换最大输出功率数学模型	226
10.2.1 光生电流 I_{ph} 求解	227
10.2.2 反向饱和电流 I_{os} 求解	229
10.2.3 光电转换最大输出功率求解	229
10.3 激光输能光电转换输入功率数学模型	230
10.4 激光输能光电转换效率数学模型	232
10.5 激光输能光电转换效率 Simulink 仿真模型	234
10.6 激光输能输入角控制器设计	236
10.6.1 用户星相关模型	237
10.6.2 控制任务描述	239
10.6.3 基于反步法的自适应鲁棒控制器设计	240

10.6.4 基于 Lyapunov 第二方法的系统稳定性证明	243
10.7 小结	245
参考文献	246
第 11 章 激光输能光电转换效率参数影响仿真分析	248
11.1 仿真参数设置	248
11.2 激光输能光电池输出特性分析	249
11.3 光电池自身参数对光电转换效率影响分析	250
11.3.1 等效串联电阻对光电转换效率影响分析	250
11.3.2 常温下的反向饱和电流对光电转换效率影响分析	251
11.4 外部参数对光电转换效率影响分析	252
11.4.1 光电池温度对光电转换效率影响分析	253
11.4.2 辐照功率密度对光电转换效率影响分析	254
11.4.3 激光入射角对光电转换效率影响分析	255
11.5 激光入射角控制器有效性仿真分析	256
11.5.1 用户星期期望姿态解算	256
11.5.2 任务参数设置	258
11.5.3 仿真结果分析	259
11.6 小结	261
参考文献	262
第 12 章 实验设计及验证	263
12.1 实验系统组成	263
12.1.1 系统硬件平台	263
12.1.2 系统软件平台	265
12.2 实验方案设计	266
12.2.1 实验内容确定	266
12.2.2 光电池材料选取	267
12.2.3 光电转换装置设计	268
12.2.4 光束调节方法	269
12.2.5 激光辐照功率密度测量方法	270
12.2.6 光电池温度控制方法	270
12.3 实验及结果分析	271
12.3.1 激光输能基本原理和过程演示实验	271
12.3.2 激光输能光电转换相关模型可用性验证	272
12.3.3 激光输能光电转换效率数学模型的优势验证	274
12.3.4 等效串联电阻对激光输能光电转换效率影响验证	275

12.3.5 光电池温度对激光输能光电转换效率影响验证	277
12.3.6 辐照功率密度对激光输能光电转换效率影响验证	278
12.3.7 激光入射角对激光输能光电转换效率影响验证	280
12.4 小结	282
参考文献	282

第 1 章 绪 论

激光是 20 世纪 60 年代初期诞生和发展起来的一项重大技术。经过 50 多年的快速发展,国际上先后突破了诸多关键技术,研制出了多类激光器。激光领域所取得的关键技术突破和科研成果也促进和推动了其他研究领域的快速发展。特别是激光技术在空间领域的应用,已引起世界各国的关注,必将对未来的空间应用产生革命性的影响。

1.1 激光概念及产生机理

1.1.1 激光概念

激光(LASER)一词是由英语“light amplification by stimulated emission of radiation”的字头缩写,意思是“通过受激辐射实现光放大”,现已成为公认的学术性专业用语^[1]。具体定义如下:激光是利用光能、热能、电能、化学能或核能等外部能量来激励物质,使其发生受激辐射而产生的一种特殊的光。作为 20 世纪的重大发明之一,激光具有方向性强、单色性好、亮度高和相干性好等特点,已被应用于工业、军事、通信、医学和科学研究等诸多领域。而产生激光的装置称为激光器。

1.1.2 激光产生机理

1. 原子能级

原子是由一个带正电荷的原子核和一个或若干个带负电荷的电子组成的,原子核所带的正电量与各个电子所带的负电量之和相等,整个原子呈电中性。电子总是围绕着原子核不停地运动,这就使它有了动能。原子核与电子之间由于带不同极性的电荷,因而互相吸引,使电子带有位能。电子的动能和位能之和,称为原子的内能。原子内部各个电子绕原子核做轨道运动的同时,还做自旋运动。原子内部的电子可以通过与外界交换能量从一种运动状态改变为另一种运动状态,对于每一种运动状态,原子具有确定的且不连续的内部能量值,称原子的每一个内部能量值为原子的一个能级。同一元素的原子,能级情况相同。

图 1.1 以原子的两个能级 E_2 和 E_1 为例,纵坐标表示原子内部能量 E 的大小,将能量大的能级称为上能级,能量小的能级称为下能级,或称为激光上能级、激

光下能级。原子内部能量最小的能级称为基态,如图 1.1 中的能级 E_1 。一般情况下,绝大多数的原子处于基态。能量比基态高的其他能级都称为激发态,如图 1.1 中的能级 E_2 。产生激光的典型能级有三能级和四能级系统。

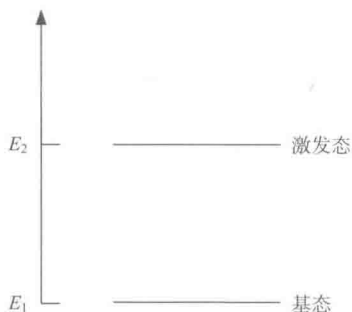


图 1.1 原子能级

2. 三能级系统

图 1.2 为三能级系统简图,其中 E_1 为基态与激光最终能级, E_2 为激光输出能级(亚稳态能级), E_3 为抽运能级。

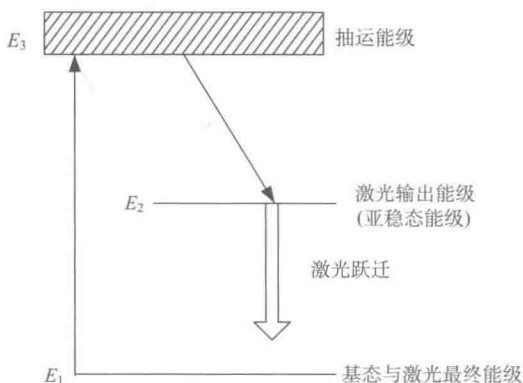


图 1.2 三能级系统简图

由于基态能级 E_1 粒子受到外界泵浦的作用,吸收了外来能量,从 E_1 被抽运到 E_3 。但是,跃迁到 E_3 上的粒子在该能级停留时间很短,很快无辐射跃迁到 E_2 能级上。粒子从 E_3 能级向 E_2 能级跃迁时,既不发射光子,也不吸收光子,多余能量是以热的形式放出的。由于 E_2 能级是亚稳态能级(粒子在该能级上停留时间长),所以激励的原子源源不断地从 E_1 到 E_3 ,再从 E_3 到 E_2 ,最后使 E_2 上粒子大于 E_1 上粒子时,在 E_2 和 E_1 能级间实现了粒子数反转,且 E_2 上粒子跃迁回 E_1 时

便产生受激辐射,从而产生激光。可见,亚稳态能级在实现粒子数反转中起着重要的作用。典型的红宝石激光器就属于三能级系统。在三能级系统中,由于激光最终能级是基态,为了达到粒子数反转,必须把半数以上的粒子抽运到上能级,因此要求很高的抽运功率。

3. 四能级系统

原子的四能级系统简图见图 1.3, 其中 E_4 为抽运能级, E_3 为激光输出能级(亚稳态能级), E_2 为激光最终能级(在热平稳状态下处于 E_2 上的粒子数很少,基本上是个空能级), E_1 为基态与激光最终能级, 这样在 E_3 和 E_2 之间比较容易实现粒子数反转。所以四能级系统的激光阈值一般比三能级系统小。

典型的 Nd^{3+} -YAG 激光器、钕玻璃激光器等都属于四能级系统。

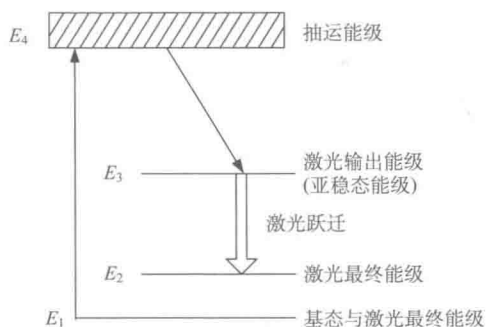


图 1.3 四能级系统简图

4. 粒子数反转条件

现考察原子的一个上能级 E_2 和一个下能级 E_1 。假设上能级 E_2 是由 g_2 个不同的能态重合在一起组成的, 即原子的 g_2 个不同的运动状态都具有相同的内部能量 E_2 , 则称 g_2 为上能级 E_2 的统计权重(或称简并度)。同样假设 E_1 能级的统计权重为 g_1 。

令单位体积中处于上能级的粒子(分子或原子)数为 n_2 , 称 n_2 为处于上能级 E_2 的粒子数密度, 单位为 cm^{-3} 。同样令处于下能级 E_1 的粒子密度为 n_1 , 则玻尔兹曼分布律可写成

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-(E_2 - E_1)/kT} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (1.1)$$

式中, k 为玻尔兹曼常量; T 为热平衡时的热力学温度。

将式(1.1)改写成

$$\frac{n_2 / g_2}{n_1 / g_1} = e^{-(E_2 - E_1) / kT} \quad (1.2)$$

式中, n_2/g_2 是处于上能级 E_2 的一个能态上的粒子数密度; n_1/g_1 是处于下能级 E_1 的一个能态上的粒子数密度。这里所谓的“一个能态”是指在某一能级上的粒子有不同的运动状态, 虽然具有相同的内部能量值, 但由于运动状态不同而有不同的能态。

由于 $E_2 > E_1$, 且 $T > 0$, 所以热平衡时, 有

$$\frac{n_2}{g_2} < \frac{n_1}{g_1} \quad (1.3)$$

满足式(1.3)的粒子数分布, 通常称为粒子数正常分布, 见图 1.4(a)。

在激光器工作物质内部, 由于外界能源的泵浦破坏了热平衡, 有可能使处于上能级 E_2 的粒子数密度 n_2 大大增加, 达到

$$\frac{n_2}{g_2} > \frac{n_1}{g_1} \quad (1.4)$$

满足式(1.4)的粒子数分布, 称为粒子数反转分布, 简称为粒子数反转, 见图 1.4(b)。

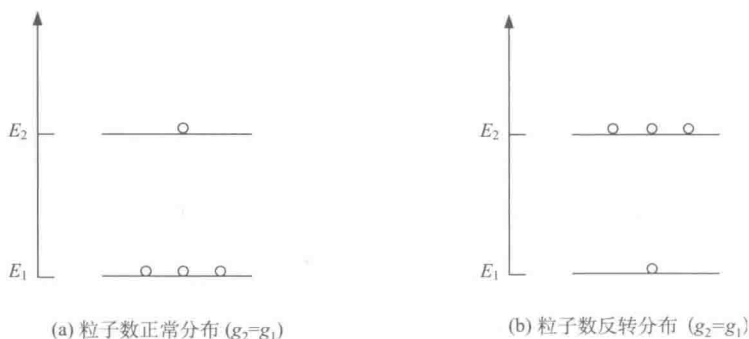


图 1.4 粒子数分布图

显然, 此时激光器工作物质的内部不再处于热平衡状态。常常把式(1.4)代表的粒子数反转称为负温度分布。能在特殊工作物质中实现粒子数反转并通过光的受激发射与放大形成光波振荡, 即产生激光的装置称为激光器。激光的形成是光与物质相互作用的结果, 有三个基本过程——光的自发发射、光的受激吸收和光的受激发射。

1.2 激光器组成、工作机理及分类

1.2.1 激光器组成与工作机理

一台简单的激光器通常由工作物质、泵浦源和谐振腔三部分组成。下面介绍

激光器各部分的功能和作用，并描述激光器工作机理^[1]。

1. 工作物质

工作物质是激光器的核心，它是激光赖以产生的基础物质，亦称为激光介质、激活物质等。普通激光器的工作物质可以是固体、气体或液体。

2. 泵浦源

泵浦源是通过某种方式向工作物质馈送能量的激励装置。泵浦源常用的激励方式有光激励、放电激励、化学激励和核能激励等。

3. 谐振腔

谐振腔是激光器的重要部件，它不仅为获得激光输出提供必要的条件，同时对输出激光谱线的频率、谱线宽度、激光输出功率、光束发散角等产生很大影响。激光器通常采用开放式的谐振腔，这种谐振腔由两个相对的光学反射镜按一定方式组合而成，其余四个侧面均开放，而激光物质就放置在腔中。

激光器工作机理可描述如下：激光工作物质受到泵浦源的激励被激活，工作物质中的激光粒子跃迁至上能级，随后又自发迁至下能级，产生自发辐射。自发辐射光子向四面八方传播，只有沿谐振腔轴线方向传播的光才能被反射镜反射。当上能级的粒子与反射光子具有全同性时，产生受激辐射，即上能级的粒子迁至下能级。不久，整个物质受辐射达到饱和，形成了相同波长和相位的光波，称为驻波，它的一部分作为激光从输出镜一端输出。整个过程如图 1.5 所示。

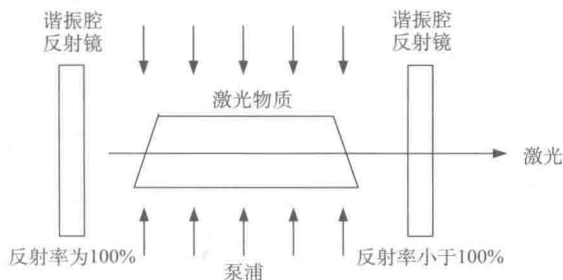


图 1.5 激光器工作机理示意图

1.2.2 激光器分类

激光器分类很多，名称更多。按工作物质的物理形态不同，可将激光器分为：气体激光器，如氢-氦激光器、二氧化碳激光器和准分子激光器等；固体激光器，