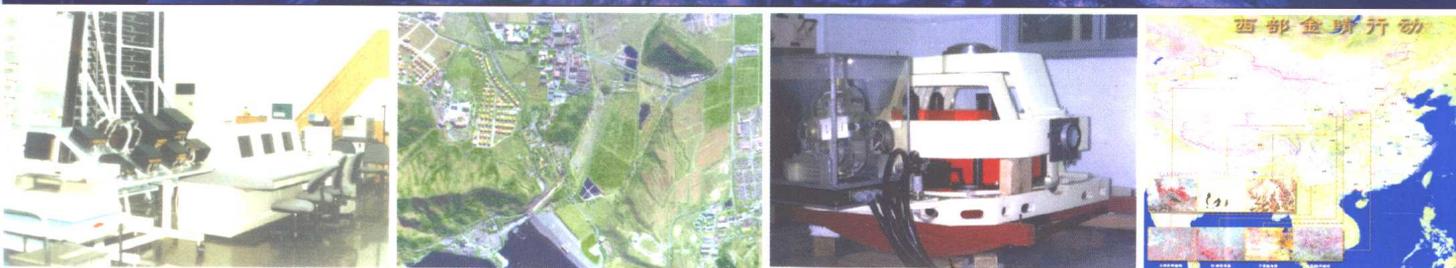


空间信息获取与处理系列专著

环境监测激光雷达



阎吉祥 龚顺生 刘智深 编著



 科学出版社

空间信息获取与处理系列专著

环境监测激光雷达

阎吉祥 龚顺生 刘智深 编著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书是国家高技术计划信息领域信息获取与处理技术(863-308)主题成果系列专著之一。主要包括三部分内容:第一部分简要介绍激光与物质相互作用机理及雷达测量技术基础;第二部分阐述激光雷达的工作原理、结构、发射、接收系统、背景干扰及其消除;第三部分介绍激光雷达的各种实践应用,包括海洋与陆地资源探测、大气结构探测、环境监控等,这部分是全书之重点,其中不少内容是作者从事308主题相关课题的研究成果或前瞻性的分析成果。

本书可作为对地观测、航天遥感工程、摄影测量与遥感、数学地球信息资源、空间信息工程等学科专业的教材,也可供有关专业大专院校师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境监测激光雷达/阎吉祥等编著. —北京:科学出版社,2001
(空间信息获取与处理系列专著)

ISBN 7-03-009198-1

I. 环… II. 阎… III. 激光雷达-应用-环境监测 IV. X83

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第06018号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

西保印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2001年2月第一次印刷 印张:15 1/2
印数:1—2 000 字数:342 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著 编辑委员会

名誉主编：匡定波

主 编：郭华东

副 主 编：许健民 倪国强

编 委（按姓氏笔画为序）

王长耀 王建宇 王德纯 朱敏慧 刘玉洁

刘永坦 孙文新 巫英坚 杨家德 杨震明

李小文 李文友 吴一戎 张光义 张永生

张钧屏 张意红 张澄波 郁文贤 林行刚

周心铁 郇辛樵 孟宪文 侯朝焕 姜文汉

姚岁寒 顾怀瑾 阎吉祥 龚雅谦 梁甸农

彭胜潮 景贵飞 强小哲 缪家駟 魏钟铨

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著

- 对地观测技术与可持续发展
- 合成孔径雷达卫星
- 空间探测相控阵雷达
- 对地观测与对空监视
- 航天遥感工程
- 对地观测技术与数字城市
- 对地观测技术与精细农业
- 多角度与热红外对地遥感
- 环境监测激光雷达
- MODIS 遥感信息处理原理与算法
- 对地观测系统与应用

空间信息获取与处理系列专著

序

信息获取与处理技术(308)主题是我国高技术计划最早设立的15个主题之一。20世纪80年代初,美国政府推出“星球大战计划”,接着欧洲出台了“尤里卡计划”。在亚洲,日本率先提出了“未来10年振兴科学技术政策大纲”。面对严峻的国际形势和世界的发展趋势,中国于1986年形成自己的高技术研究发展计划,明确提出308主题重点发展面向空间目标监视和空间对地观测的军民两用技术。

随着20世纪90年代初前苏联的解体、冷战的结束及其后“信息高速公路”、“知识经济”、“数字地球”的出现,308主题根据国际形势的发展和国家现代化建设的需要,科学地调整战略目标,卓有成效地部署实施研究计划。

15年来,308主题围绕对地观测和对空监视两大系统,突破了以新型对地观测系统星载合成孔径雷达、红外焦平面列阵成像和自适应光学为代表的六大关键技术,配套发展了超高速实时成像信息处理专用技术,取得一系列重大成果。星载合成孔径雷达等重大对地、对空关键技术成功地向国家建设主战场转移,实现了863计划与其他计划的有机衔接,带动了我国在这些领域的一系列技术进步和设备研制,开拓了我国对地观测技术和对空探测技术发展的新局面。

在863计划15年工作行将完成之际,308主题专家组决定撰写出版空间信息获取与处理系列专著,这是一项非常重要的举措:一是科研人员通过系统总结而进一步提高水平,二是可以让更多的人分享多年来的重要科研成果,三是对发展下一期的863计划建立了坚实的基础。这套系列专著的作者,包括了战略型科学家和工程

技术专家,他们长期工作在第一线,对该领域有直接的发言权。该系列专著包括 11 部书,从不同角度在不同程度上介绍了我国对地观测、对空监视高技术领域的发展,并对下一步的工作提出了设想与建议。本套专著的出版,是我国信息获取领域的一件大事,有重要的学术和实用意义。

我高兴地向读者们推荐这套高技术领域的系列专著。

A handwritten signature in black ink, reading '王大钧' (Wang Dajun), written in a cursive style.

2001 年 2 月

空间信息获取与处理系列专著

前 言

新世纪到来之际,我国的 863 计划——高技术研究发展计划,历经 15 年的辉煌,将完成第一期庄严的历史使命。863 计划信息领域信息获取与处理技术主题,经过各级领导和五届专家组及全体参研人员的共同努力,也圆满地实现了她的预期目标。

作为 863 计划信息领域 4 个主题之一的“信息获取与处理技术主题”,1986 年立项伊始即明确其战略目标:发展各种信息获取与处理技术,重点是掌握高速、高精度的新型信息获取和实时图像处理技术,促进信息技术在各个领域的应用。1990 年提出,在重视对空监视的基础上,加强对地观测;1993 年进一步提出,在重视星载对地观测的同时,加强机载对地观测技术的发展。进入“九五”,进一步凝炼战略方向:以中国数字地球战略空间信息资源重大需求为导向,研究发展对空、对地观测技术,形成具有我国自主知识产权的实用化机载对地观测技术系统,开展数字图像处理及信息挖掘方法研究,研究对地观测小卫星有效载荷及卫星数据处理技术,进行应用示范,为我国数字地球战略铺垫基础,为国家可持续发展、国家安全战略服务。

15 年来,308 主题五届专家组在国家科技部领导下,依靠来自 20 多个部、委,分布在 19 个省、区、市的 61 个单位 3000 余名科技人员的精诚奉献,围绕对地观测与对空监测两大系统,突破 7 项关键技术,探索信息获取前沿,取得机载对地观测系统技术、星载合成孔径雷达技术、自适应光学望远镜技术等四大标志性成果;获得 X-SAR 系统样机、SAR 实时成像器、激光测污雷达、激光测风雷达、对地观测小卫星相机、MODIS 接收处理系统、InSb 红外焦平面组件及逆合成孔径雷达等 8 项代表性重点成果;在前沿信息获取方面,取

得新型光学传感器、聚束雷达、微型自适应光学技术等 5 类成果。成功开展机载对地观测系统应用示范,在城市、农业应用等领域取得显著成效,及时开展了“九八”抗洪、“九九”澳门回归、“西部金睛行动”和中关村科技园区遥感飞行等服务国家重大需求的专项。这些成果提高了我国信息获取与处理技术领域发展水平,缩短了我国在该领域与世界先进水平的差距,为国民经济建设、国家安全战略做出重要贡献。

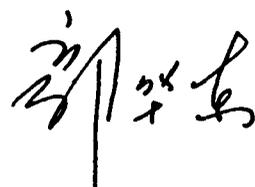
在 15 年研究即将完成之际,对长期以来的科研成果进行科学的、系统的总结,这对未来发展十分有益,为此我们决定出版这套空间信息获取与处理系列专著。本系列书由 11 部著作组成,书名分别是:《对地观测技术与可持续发展》、《合成孔径雷达卫星》、《空间探测相控阵雷达》、《对地观测与对空监视》、《航天遥感工程》、《对地观测技术与数字城市》、《对地观测技术与精细农业》、《多角度与热红外对地遥感》、《环境监测激光雷达》、《MODIS 遥感信息处理原理与算法》及《对地观测系统与应用》。对地观测内容构成本系列书的主体,介绍了对地观测原理、技术、应用与发展;侧重论述 308 主题近年来研究发展的光学传感器、成像雷达系统、信息处理方法及其在城市、农业、环境、资源、灾害等领域的应用,提出了 21 世纪初以可持续发展为牵引发展对地观测技术的建议及战略思考;空间监视内容是本系列书的又一重要方面,概述了空间目标探测与监视技术,介绍了空间探测相控阵雷达技术;激光雷达是信息获取技术的前沿领域之一,书中阐述了环境监测激光雷达原理与技术。

我们期望,这套专著能起到理论总结的作用、学术交流的作用;同时,我们也期望着她能对下一期国家高技术发展起到有益的参考作用。

15 年来,信息获取与处理技术主题工作受到科技部、科技部高新技术司、863 联合办公室、信息领域办公室各级领导的大力支持,得到各承研单位及课题组和关心 308 主题同志们的全力支持,在此谨代表主题五届专家组向以上领导与同志们致以真诚的谢意。诚然,没有大家的支持,本系列书也不可能问世,值此系列专著出版之际,向大家表示衷心的感谢。863 计划发起者之一的王大珩院士在百忙之中亲自为系列专著作序,我们向推动我国高技术计划的元勋

王大珩先生致以崇高的敬意。11部专著的数十位作者都是工作在863计划第一线的优秀科学家,在繁忙的工作之余,他们将高技术成果进行理论总结,为国家高技术“书写”奉献,亦特向各位辛勤的作者致以敬意。在本系列专著出版时又受到科学出版社的鼎力相助,特别是姚岁寒等先生付出了十分艰辛的劳动,谨此一并鸣谢。

系列专著不久将与大家见面了,鉴于水平与时间所限,书中不妥乃至错误之处在所难免,恳望读者不吝批评指正。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters. The characters appear to be '姚岁寒' (Yao Suihan), written in a cursive, calligraphic style.

2001年元月

前 言

经济的高速发展直接导致两个明显的后果:一方面,自然资源不可避免地大量消耗,而在消耗资源的同时往往伴随有污染环境的副产物产生;另一方面,人们生活水平大幅度提高,而生活水平提高的人类希望有一个更加美好的生存环境。由此可见,对环境加以监测与严格治理,对资源进行调查与合理使用,是一个国家乃至全球经济可持续发展、人们生活水平可持续提高的根本保证,并因而理所当然地引起各国有关部门及广大民众的极大关注。而环境监测激光雷达正是实现这些目标的有力工具。本书旨在向读者介绍环境监测激光雷达的基础、原理及其在众多领域的应用,可供高等院校相关专业本科高年级学生及在遥感和环境领域工作的科技人员参考。

本书除绪论外共分八章,前四章讲述原理,后四章介绍应用,其中绪论、第一到四章及第八章由阎吉祥编写;第五、六章由刘智深编写;第七章由龚顺生编写。阎吉祥负责全书的统编。在此感谢研究合作者们及参加这项工作的研究生们,虽然由于某些原因未直接参与本书的写作,但书中不少地方,特别是第八章中包含了他们的很多研究成果,这一点从参考文献中可清楚看出。

本书作者感谢所引文献的所有作者,阎吉祥特别感谢加拿大环境技术中心的 Carl E. Brown 博士和德国哥廷根激光实验室的 Peter Karlitschek 博士,他们从 1999 年下半年至 2000 年上半年先后专函寄来各自在这一领域的大量最新研究成果,这些资料对作者及时了解本研究领域国际发展现状及前景颇有裨益。

作者向国家高技术研究与发展计划信息获取与处理技术(863-308)主题专家组的全体专家及主题办公室全体工作人员致以特殊的谢意,他们为相关课题的研究及本书的写作给予的有益的技术指导和多方面的宝贵支持,是作者得以完成科研与写作任务的基本保证。而本书阎吉祥编写部分的录入工作得到《光学技术》杂志编辑部的大力支持。

囿于水平,更兼编写和出版时间仓促,谬误欠妥之处恳请读者惠予指正。本书若能对我国经济发展及环境保护有所贡献,作者将深感欣慰。

作 者

2000 年 9 月

目 录

绪论	1
第一章 激光概论	3
§ 1.1 激光和激光器	3
§ 1.2 激光的特性	6
§ 1.3 Gauss 光束	10
§ 1.4 Gauss 光束的聚焦和准直	12
§ 1.5 激光器的连续与脉冲工作	16
§ 1.6 短脉冲与超短脉冲技术简介	19
§ 1.7 一些典型激光器	22
第二章 激光与物质相互作用	29
§ 2.1 光的反射与折射	29
§ 2.2 小粒子吸收和散射的经典结果	32
§ 2.3 大粒子散射的经典结果	34
§ 2.4 粒子对脉冲波的散射	35
§ 2.5 原子与双原子分子的量子描述	36
§ 2.6 激光诱导荧光的速率方程理论	39
§ 2.7 Raman 散射理论	43
第三章 光电探测器及信号处理技术	48
§ 3.1 光电探测器的特性	48
§ 3.2 光电探测器的噪声	49
§ 3.3 光电倍增管	55
§ 3.4 光电二极管简介	58
§ 3.5 阵列探测器	59
§ 3.6 信号处理基础	64
第四章 激光雷达原理	67
§ 4.1 引言	67
§ 4.2 激光雷达的探测对象	67
§ 4.3 激光雷达系统	68
§ 4.4 光束整形与扫描	69
§ 4.5 激光雷达信号接收	71
§ 4.6 激光雷达方程	74
§ 4.7 激光雷达的背景噪声	76
第五章 海洋激光雷达及其在海洋探测中的应用	78
§ 5.1 引言	78

§ 5.2	海洋的光学性质	79
§ 5.3	海洋激光雷达系统	85
§ 5.4	激光雷达方程	88
§ 5.5	激光雷达的信噪比	89
§ 5.6	激光测量浅海深度	90
§ 5.7	激光测量海洋次表层温度	92
§ 5.8	激光测量海洋声速剖面	97
§ 5.9	激光测量海洋表层叶绿素浓度	98
§ 5.10	海面油膜激光荧光探测	101
§ 5.11	激光油气探测	106
第六章	测风激光雷达及其应用	111
§ 6.1	引言	111
§ 6.2	相干多普勒激光雷达	113
§ 6.3	非相干多普勒激光雷达	116
§ 6.4	多普勒激光雷达的性能分析	121
§ 6.5	基于分子滤波器的非相干多普勒激光雷达	126
第七章	大气探测激光雷达	135
§ 7.1	地球大气及大气探测	135
§ 7.2	大气探测激光雷达基础	140
§ 7.3	大气探测激光雷达技术	145
§ 7.4	Mie 散射激光雷达和气溶胶探测	155
§ 7.5	Rayleigh 散射激光雷达和中层大气探测	164
§ 7.6	Raman 散射激光雷达和大气组分探测	173
§ 7.7	差分吸收激光雷达和大气微量组分探测	183
§ 7.8	共振荧光激光雷达和中层顶原子、离子探测	194
第八章	激光荧光雷达水面污染监测技术	205
§ 8.1	引言	205
§ 8.2	某些油类及其主要成分的激光诱导荧光	206
§ 8.3	荧光产生效率对激发光波长的依赖	211
§ 8.4	背景光的影响及其扣除	214
§ 8.5	激光荧光技术的其他应用	216
§ 8.6	机载激光荧光雷达激光参数与飞行参数之关系	220
§ 8.7	溢油遥感激光雷达发展现状	223
	主要参考文献	227

绪 论

雷达最早出现于第二次世界大战期间,它是英文词“radar”的音译,意为无线电探测与测距。无线电雷达从问世以来,在民用航空交通管理、河流及港口船只的交通控制及通信卫星地面站等众多领域得到广泛的应用;特别是在军事领域,它已成为现代化战争必不可少的工具。

但是,无线电波波长较长,从量子光学的理论可知,其相应能量子的能量很小,一般不足以与目标发生任何生化作用,因而无法探测目标的生化特性,或者说,不能依据生化特性对目标进行识别和分类。另一方面,由物理光学的理论可知,当电磁波在传播路径上遇到尺寸比波长小的物体时,将会发生衍射,即波的大部分能流绕过物体继续向前传播。由于这一原因,普通无线电雷达也无法探测微小粒子,特别是各种分子。而在环境检测中,往往需要探测微小粒子,乃至分子,或者需要依据被探测物的生化特性对其进行识别与分类。

激光是人类 20 世纪最重要的发明之一,它的出现几乎在所有技术领域引发了革命。而激光与雷达之间更具有极为特殊的关系,事实上,激光器,乃至其前身微波振荡器的发明在相当大的程度上得益于雷达工程师们为雷达波探索波长更短辐射源的努力。而曾因对激光器的发明作出巨大贡献荣获 Nobel 奖的 Townes,本人就是一位杰出的雷达专家。因此,将激光技术应用于雷达领域完全是一件势在必行之事。

用于雷达的激光波长典型情况下比无线电波长小 3~5 个量级,如此短波长的辐射一方面具有很高的单光子能量(例如,波长 400nm 的辐射,单光子能量为 3.1eV);另一方面,在大气中传输时很少发生绕射。这就使激光雷达恰好弥补了无线电雷达的上述两点不足,一方面可以依据被检测物的生化特性对其加以鉴别;另一方面可以对大气中以微粒形式存在的各种成分进行探测,这些正是本书将要讨论的主要内容。军用激光雷达及激光雷达在军事领域的应用无疑是十分重要的,然而它不属于本书范畴,有兴趣的读者可参阅其他有关资料。这就是说,本书主要涉及用于环境检测的激光雷达,但为叙述简单,且不致引起误解,书中激光雷达前一般不再冠以“环境”二字。

大气中很多成分对人类健康有害,以我国目前空气质量日报所列为例,除可吸入颗粒物外,主要有 SO_2 , CO , O_3 及 NO_2 。这些成分既可以由大自然产生,也可因人类活动引起。据美国航空航天局(NASA)1975 年估计(Wright et al., 1975)自然界每年因火山爆发产生少量 SO_2 , 因 CH_4 氧化生成 3 000kg 的 CO , 由于光解作用产生数量不确定的 O_3 , 而将有微量的 NO 转变为 NO_2 。在人类活动中,由烧煤和燃油每年会产生 133kg 的 SO_2 , 汽车排放生成 250kg 的 CO , 光化学作用产生一定数量的 O_3 , 因人类活动产生的 NO_2 数量极微。当时估计这 4 种气体在大气中的背景浓度依次为 $2.0 \times 10^{-10} \sim 2.0 \times 10^{-9}$, 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-8} 和 $5.0 \times 10^{-10} \sim 4.0 \times 10^{-9}$; 而污染大气中的典型浓度依次为 1.0×10^{-6} , 5.0×10^{-6} , 3.0×10^{-7} 和 1.0×10^{-7} 。

大气中另一种值得关注的成分是气溶胶,它是悬浮在大气中的一类粒子的总称,包括

各种烟雾及尘埃等微粒,半径通常小于 $1\mu\text{m}$,其中有很多可被吸入人体或通过接触造成伤害。气溶胶主要来源为森林火灾、火山爆发及人类的燃烧活动和建筑施工等。

对河、湖、海的水质造成污染的则主要是各种有机质,据估计,全球各地水体中所含有机物总计达2 000种之多,其中各种油类已成为很多地方最常见的水污染物。在油的生产、储存、运输或使用的场所,都存在潜在污染源。就油的种类而言,海洋中以原油为主;内水中原油相对少见,但各类石油制品,如汽油、石蜡、润滑油、绝缘油以及乳化切削油等均会引起污染。尤以燃料油和柴油应用广泛,因而是较普遍的污染物。

油对水质的影响是多方面的,汽油、石油溶剂及一些挥发性产品大多有毒,严重的表面油污染以及与水中悬浮体有关的乳化油可以伤害乃至杀死水中动物,毁坏水生或岸边植物。而河湖中沉积的油则可成为有毒的无极有机化学物质,如 DDT 的携带者。此外,由于油可以形成亚微米厚的薄膜,因此只要有很少的剂量便能呈现出严重污染。

依据不同散射机制的激光雷达对大气中各种成分进行探测将在第七章详细讨论,而第八章的主要内容则是用激光诱导荧光技术对水中油进行检测与分类。

除对污染物进行探测外,激光雷达还可用于探测海洋或大气中一些基本参数,如海水深度、温度及声音在海水中的传播速度;大气温度剖面及风速等。这两方面的内容将分别在第五章和第六章加以研究。而第八章还简单介绍了激光荧光技术在绿色植物探测中的应用。

在讨论激光雷达所有上述实践应用之前,本书前四章讲述了有关基础知识。其中第一章综述了激光的基本原理、特性及一些典型的激光器;第二章讨论激光与物质相互作用,重点是各种散射和激光诱导荧光;第三章对几种主要的探测器进行了描述;在此基础上,第四章介绍激光雷达原理。用于不同目的的激光雷达在原理与结构上也会有一定差异,因此,本章限于讨论对各种激光雷达来说是共同的内容,而适用于不同激光雷达的特殊内容则留给后面的有关章节来叙述。

环境激光雷达在我国目前尚属新兴课题,在国际上也属于年轻而充满活力的领域。特别是,随着激光技术、探测器技术及计算机技术的迅速发展,激光雷达探测的灵敏度、可靠性及精度必将进一步提高,进而促使其应用范围更加广泛。完全有理由期望,环境激光雷达将在人类发展经济、改善环境的努力中,发挥越来越重要的作用。

第一章 激光概论

本章将对激光作一概括性介绍,目的是为后面有关章节提供必要的知识基础。其中 § 1.1 简要描述激光的产生和激光器的组成; § 1.2 介绍激光的主要特性; § 1.3 和 § 1.4 讨论 Gauss 光束及其传输与变换;接下来的两节描述激光器的连续与脉冲工作状态;最后的 § 1.7 介绍几种典型激光器。

§ 1.1 激光和激光器

激光的英文缩写名称为 Laser(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation),意即光的受激辐射放大。因此,介绍激光应从受激辐射讲起。

1.1.1 Einstein 理论

基于量子论观点,Einstein 于 1917 年首次提出,辐射与原子系统的相互作用应包含原子的自发辐射跃迁、受激辐射跃迁和受激吸收跃迁三种过程。

1. 自发辐射

为简单起见,考虑一个二能级系统,即假定原子只有两个能级,上能级 E_2 和下能级 $E_1 (< E_2)$,相应的集居粒子数分别为 n_2 和 n_1 。

处于上能级的粒子具有一定的平均寿命,经历了这一时间后,便可能自发地向 E_1 跃迁,同时辐射一个频率为

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1.1)$$

的光子,这一过程称为自发辐射跃迁,式中 $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 为 Planck 常数,自发辐射的速率为

$$A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\psi} \frac{1}{n_2} \quad (1.2)$$

A_{21} 又称为自发跃迁 Einstein 系数,其倒数则表示 E_2 由自发辐射所决定的有限寿命

$$\tau_{\psi} = \frac{1}{A_{21}} \quad (1.3)$$

2. 受激吸收和受激辐射

上述原子系统在频率为 ν 的外来辐射作用下,将有两种可能过程发生,一种是处于

E_1 的原子吸收一个光子而向 E_2 跃迁;另一种则是处于 E_2 的原子在外来辐射的激发下向 E_1 跃迁,并发射一个与入射光子属于同一光子态的光子。这两种过程分别称为受激吸收跃迁和受激辐射跃迁。且由速率

$$W_{12} = \left(\frac{dn_{12}}{dt} \right)_v \frac{1}{n_1} \quad (1.4)$$

和

$$W_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_v \frac{1}{n_2} \quad (1.5)$$

描述。 W_{ij} 与外来辐射场的能量密度

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1.6)$$

成正比,即

$$W_{ij} = B_{ij}\rho_\nu, \quad i, j = 1, 2 \quad (1.7)$$

比例系数 B_{12} 和 B_{21} 分别称为受激吸收跃迁和受激辐射跃迁 Einstein 系数,式(1.6)中 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ 是 Boltzmann 常数。当两能级统计权重相等时(为简单起见,又不失一般性,以下的讨论基于这一假设),

$$B_{12} = B_{21} = B \quad W_{12} = W_{21} = W \quad (1.8)$$

此外,

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (1.9)$$

这里也略去 A_{21} 的脚标。

图 1.1 为上述三种过程的示意图,图中字符的含义与正文中相同。

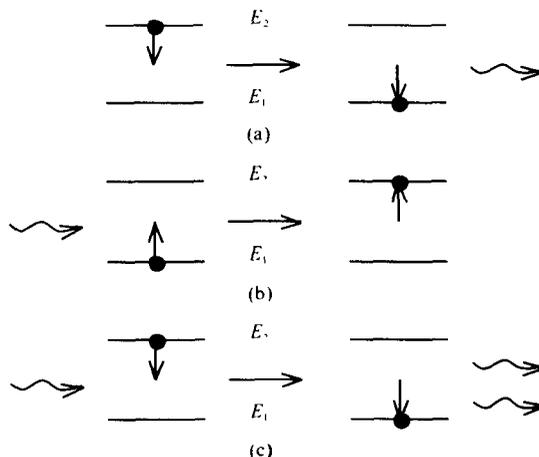


图 1.1 原子自发辐射(a)、受激吸收(b)和受激辐射(c)示意图