



普通高等教育“十五”国家级规划教材

光电子技术

·姚建铨 于意仲·主编

Optoelectronic
Technology



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

TN2
18

普通高等教育“十五”国家级规划教材

光电子技术

姚建铨 于意仲 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材。

本书分为三部分：第一篇激光技术概论，分别对激光原理、高斯光束、激光谐振腔技术、选模及稳频技术、激光 Q 开关及锁模技术和几种典型的激光器做分析及介绍；第二篇涉及到几种主要的光电子器件及技术，包括光电子显示技术、光存储技术、光辐射探测及成像技术、光波传输技术、光辐射调制器件及技术等；第三篇激光与光电子技术的典型应用中，主要讨论光纤传感器、光通信技术、相干测量技术、最新激光加工技术等。

本书可作为电子科学与技术、光信息科学与技术等相关专业的本科生教材，也可供有关工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

光电子技术 / 姚建铨, 于意仲主编. —北京: 高等教育出版社, 2006. 5

ISBN 7-04-019255-1

I. 光... II. ①姚...②于... III. 光电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 042985 号

策划编辑 李 慧 责任编辑 许海平 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静
版式设计 马静如 责任校对 朱惠芳 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市联华印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 30.75
字 数 750 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006 年 5 月第 1 版
印 次 2006 年 5 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19255-00

前 言

光电子技术是电子科学与技术的重要组成部分,是 21 世纪先进科学技术之一,在现代社会中起着举足轻重的作用,它的发展对国民经济及国防建设有着巨大的推动作用。“光电子技术”作为“电子科学与技术”专业本科生的主干课程,近年来已有很多教材问世,我们汲取多家之长,将该书分为三篇。第一篇激光技术概论,分别对激光原理、高斯光束、激光谐振腔技术、选模及稳频技术、激光 Q 开关及锁模技术和几种典型的激光器做分析及介绍,使学生对激光产生的机理及主要的激光技术有所了解;第二篇涉及到几种主要的光电子器件及技术,包括对光电子显示技术、光存储技术、光辐射探测及成像技术、光波传输技术、光辐射调制器件及技术等做较为深入的阐述及分析;第三篇激光与光电子技术的典型应用中,我们仅选择光纤传感器、光通信技术、相干测量技术及激光加工特别是切割技术进行讨论,以便使学生对激光与光电子技术的应用有初步的了解和掌握。

第一篇中的第 1、2、3、4 章由中山大学蔡志岗教授编写;第二篇中第 5、6 章由天津大学于意仲教授编写;第 7、9 章由西安电子科技大学安毓英教授编写;第 8 章由南京邮电大学陈鹤鸣教授编写;第 10 章由天津大学姚建铨院士编写;第三篇中第 11、12、13 章分别由中国计量学院金永兴副教授,南京邮电大学陈鹤鸣教授及西安电子科技大学安毓英教授编写,第 14、15 章由天津大学张帆高级工程师编写。

全书章节及内容编排由姚建铨院士确定,最后由于于意仲教授完成全书的图文修改工作,并与姚建铨院士共同定稿。

本书图文并茂,并配有习题及思考题,可供主讲教师选用。该书既可作为相关专业的本科生教材,也可作为研究生的重要参考书,同时还可供从事该领域的工程技术人员参考。由于光电子技术涉及内容甚多,本书不可能一一讲透。通过试用,我们将尽快进行修订,望各院校师生多提宝贵意见。

编者

2006 年 1 月

目 录

第一篇 激光技术概论

第 1 章 激光原理概论	3	3.1.2 钕玻璃激光器	40
§ 1.1 激光产生的物质基础	3	3.1.3 红宝石激光器	41
1.1.1 黑体辐射的普朗克公式	4	§ 3.2 气体激光器	45
1.1.2 跃迁	4	3.2.1 氦氖激光器	45
1.1.3 3 个爱因斯坦系数之间的关系	6	3.2.2 氫离子激光器	47
§ 1.2 激光产生的基本原理和方法	7	3.2.3 二氧化碳激光器	48
1.2.1 激光产生的基本原理	7	§ 3.3 半导体激光器	50
1.2.2 激光器构造	8	3.3.1 半导体整流二极管	51
1.2.3 激活粒子的能级系统	9	3.3.2 半导体发光二极管	52
§ 1.3 开放式光学谐振腔和高斯光束	10	3.3.3 半导体同质结激光二极管	53
1.3.1 光学谐振腔与激光模式	10	3.3.4 半导体异质结激光器	54
1.3.2 高斯光束	13	3.3.5 分布反馈激光器	56
习题与思考题	18	3.3.6 半导体量子阱激光器	57
第 2 章 激光谐振腔技术、选模及 稳频技术	19	3.3.7 垂直表面发射激光器	57
§ 2.1 激光谐振腔设计基础	19	习题与思考题	58
§ 2.2 激光腔模式及选模技术	21	第 4 章 激光 Q 开关及锁模技术	59
§ 2.3 激光纵模及选频、稳频技术	23	§ 4.1 电光 Q 开关原理及技术	59
2.3.1 激光频率的选择	23	§ 4.2 声光 Q 开关原理及技术	60
2.3.2 纵模的选择	25	§ 4.3 锁模原理	61
2.3.3 稳频技术	27	4.3.1 多纵模的叠加特性	62
习题与思考题	34	4.3.2 相位的锁定	63
第 3 章 典型激光器	36	§ 4.4 主动锁模及被动锁模	65
§ 3.1 固体激光器	36	4.4.1 主动锁模	65
3.1.1 掺钕钇铝石榴石激光器	37	4.4.2 被动锁模	67
		习题与思考题	68

第二篇 光电子器件与技术

第 5 章 光电子显示技术	73	§ 5.2 半导体发光显示器件(LED)	87
§ 5.1 阴极射线管显示	73	5.2.1 PN 结发光原理	87
5.1.1 黑白 CRT	74	5.2.2 LED 的伏安特性	88
5.1.2 彩色 CRT	76	5.2.3 亮度与电流关系	88



5.2.4	LED 的驱动	89	6.2.2	傅里叶变换全息图存储系统	132
5.2.5	LED 光源的特点	89	6.2.3	全息存储记录材料	132
5.2.6	单色光 LED 的种类及其发展历史	89	§ 6.3	磁光存储	134
5.2.7	单色光 LED 的应用	90	6.3.1	磁光效应	134
5.2.8	白光 LED 的开发	91	6.3.2	存储原理	135
§ 5.3	液晶显示器件(LCD)	91	6.3.3	磁光存储的光学系统	136
5.3.1	液晶基本知识	92	6.3.4	高密度磁光存储技术	138
5.3.2	液晶的光电特性	93	§ 6.4	其他存储技术	141
5.3.3	动态散射型液晶显示器件(DS-LCD)	95	6.4.1	双光子光学存储	141
5.3.4	扭曲向列液晶显示器件(TN-LCD)	95	6.4.2	光谱烧孔存储技术	142
5.3.5	超扭曲向列液晶显示器件(STN-LCD)	96	6.4.3	电子俘获光存储技术(ETM)	142
5.3.6	有源矩阵液晶显示器件(AM-LCD)	97	习题与思考题	143	
5.3.7	背光灯	99	第 7 章	光辐射的探测及成像技术	145
§ 5.4	等离子体显示器件(PDP)	100	§ 7.1	光电探测器的物理效应	145
5.4.1	气体放电的物理基础	100	7.1.1	光子效应和光热效应	145
5.4.2	等离子体显示板工作原理	102	7.1.2	光电发射效应	146
5.4.3	PDP 驱动方式	102	7.1.3	光电导效应	147
5.4.4	驱动方式和灰阶	103	7.1.4	光伏效应	149
§ 5.5	电致发光及场致发光器件	104	7.1.5	温差电效应	150
5.5.1	高场交流电致发光显示	104	7.1.6	热释电效应	150
5.5.2	高场薄膜电致发光(TFEL)	105	7.1.7	光电转换定律	151
5.5.3	有机发光显示器件	106	§ 7.2	光电探测器的特性参数	152
§ 5.6	激光显示技术	108	7.2.1	积分灵敏度 R	152
5.6.1	LCRT	108	7.2.2	光谱灵敏度 R_λ	153
5.6.2	激光光阀显示	110	7.2.3	频率灵敏度 R_f (响应频率 f_0 和响应时间 τ)	154
5.6.3	点扫描激光电视	111	7.2.4	量子效率 η	154
习题与思考题		118	7.2.5	通量阈 P_{th} 和噪声等效功率 NEP	155
第 6 章	光存储技术	119	7.2.6	归一化探测度 D^*	156
§ 6.1	光盘存储材料、原理及技术	119	7.2.7	光电探测器的噪声	156
6.1.1	只读光盘存储和一次写入光盘存储	120	7.2.8	其他参数	157
6.1.2	可擦写光盘存储	123	§ 7.3	光电导探测器——光敏电阻	158
6.1.3	光盘存储材料	124	7.3.1	光电转换原理	158
§ 6.2	全息存储材料、原理及技术	128	7.3.2	工作特性	159
6.2.1	全息存储的原理	128	7.3.3	几种典型的光敏电阻器	164
			7.3.4	使用注意事项	165
			§ 7.4	光伏探测器	165
			7.4.1	光电转换原理	165



7.4.2 光伏探测器的工作模式	166	8.1.5 电磁场的能量定律	225
§ 7.5 硅光电池——太阳电池	168	§ 8.2 光波在介质波导中的传播理论	225
7.5.1 短路电流和开路电压	169	§ 8.3 光波导器件	231
7.5.2 输出功率和最佳负载电阻	170	8.3.1 条形介质光波导	231
7.5.3 光谱、频率响应及温度特性	171	8.3.2 周期性波导	235
7.5.4 缓变化光电信号探测	172	§ 8.4 光纤原理与光无源器件	240
7.5.5 交变光信号探测	175	8.4.1 阶跃折射率光纤的模式 理论	241
§ 7.6 半导体光电二极管及三极管	176	8.4.2 渐变折射率光纤	245
7.6.1 硅光电二极管	177	8.4.3 单模光纤	248
7.6.2 PIN 硅光电二极管	186	8.4.4 光纤传输特性	249
7.6.3 雪崩光电二极管 (APD)	186	8.4.5 光无源器件	252
7.6.4 光电三极管	188	§ 8.5 光波在电光晶体中的传播	261
§ 7.7 光热探测器	189	8.5.1 电致折射率变化	261
7.7.1 热探测器的一般概念	190	8.5.2 电光相位延迟	263
7.7.2 热敏电阻	191	§ 8.6 光波在声光晶体中的传播	265
7.7.3 热释电探测器	192	8.6.1 拉曼-纳斯衍射	266
§ 7.8 直接探测技术	194	8.6.2 布喇格衍射	268
7.8.1 光电探测器的平方律特性	194	§ 8.7 光波在大气中的传输	271
7.8.2 信噪比性能分析	195	8.7.1 大气衰减	271
7.8.3 直接探测系统的 NEP 分析	195	8.7.2 大气湍流效应	275
§ 7.9 光频外差探测技术	197	§ 8.8 光波在水中的传输	278
7.9.1 光频外差探测的实验装置	198	8.8.1 传播光束的衰减特性	278
7.9.2 光外差原理	198	8.8.2 前向散射	279
7.9.3 基本特性	199	8.8.3 后向散射	280
7.9.4 光频外差探测的空间相位 条件	202	习题与思考题	281
§ 7.10 光电成像原理	205	第 9 章 光辐射的调制、器件及技术	282
§ 7.11 CCD 摄像器件	207	§ 9.1 光辐射的调制方法	282
7.11.1 CCD 的 MOS 结构和存储电荷 原理	207	9.1.1 振幅调制	282
7.11.2 电荷转移工作原理与电极 结构	211	9.1.2 频率调制和相位调制	283
7.11.3 电荷注入和读出	217	9.1.3 强度调制	284
7.11.4 CCD 图像传感器	218	9.1.4 脉冲调制	284
习题与思考题	220	9.1.5 脉冲编码调制	285
第 8 章 光波传输理论与技术	222	§ 9.2 电光调制技术	286
§ 8.1 光辐射的电磁理论	222	9.2.1 电光强度调制	286
8.1.1 麦克斯韦方程	222	9.2.2 电光相位调制	290
8.1.2 电磁场的波动方程	223	9.2.3 电光调制器的电学性能	291
8.1.3 光波场的亥姆霍兹方程	223	9.2.4 电光波导调制器	293
8.1.4 电磁场的边界条件	224	§ 9.3 声光调制技术	296
		9.3.1 声光调制器的工作原理	296



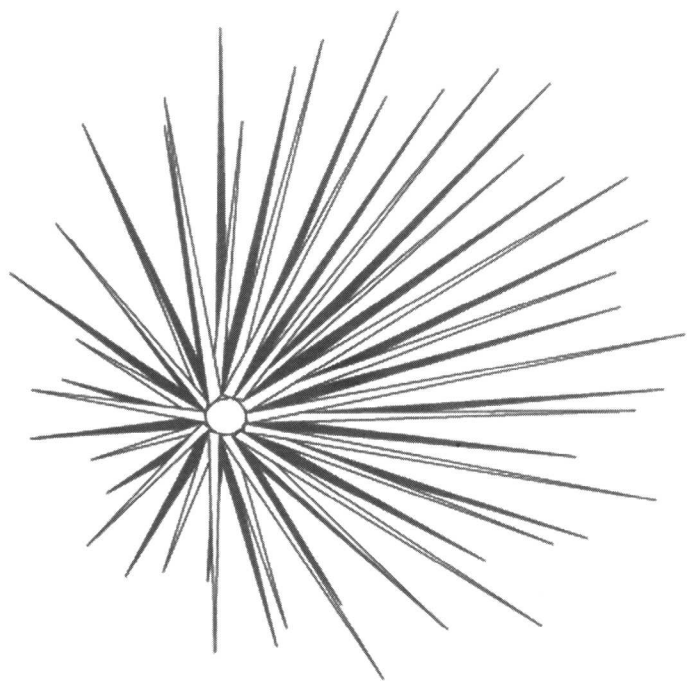
9.3.2	调制带宽	297	10.2.3	有效非线性系数	309
9.3.3	声光调制器的衍射效率	298	§ 10.3	相位匹配技术	311
9.3.4	声束和光束的匹配	299	10.3.1	相位匹配条件及角度相位 匹配	311
9.3.5	声光波导调制器	300	10.3.2	单轴晶体的相位匹配条件及 匹配角	312
§ 9.4	磁光调制技术	301	§ 10.4	二次谐波的产生	314
9.4.1	磁光体调制器	301	10.4.1	小信号近似	314
9.4.2	磁光波导调制器	302	10.4.2	基频光高消耗的情况	315
习题与思考题		302	10.4.3	聚焦高斯光束的倍频过程	317
第 10 章	激光波长调谐及非线性光学		10.4.4	光倍频晶体	321
	频率变换技术	304	10.4.5	光倍频效应的应用	322
§ 10.1	三波互作用的耦合波方程	304	§ 10.5	参量振荡器	325
10.1.1	三波互作用的稳态耦合波 方程	304	10.5.1	参量放大	326
10.1.2	三波互作用的瞬态耦合波 方程	306	10.5.2	参量振荡的原理	327
10.1.3	曼莱-罗威关系	307	10.5.3	参量振荡器的阈值	329
§ 10.2	非线性光学极化率张量的 对称性及有效非线性系数	308	10.5.4	光学参量振荡器的转换 效率	331
10.2.1	内禀交换对称性及全交换 对称性	308	10.5.5	光学参量振荡器的建立时间、 线宽及调谐	332
10.2.2	时间反演对称性及空间 对称性	308	10.5.6	光学参量振荡器的发展	332
			习题与思考题		334
第三篇 激光与光电子技术的典型应用					
第 11 章	光纤传感器简介	337	11.4.2	微弯型位移光纤传感器	351
§ 11.1	概述	337	§ 11.5	光纤温度传感器	353
§ 11.2	强度调制光纤传感器	338	11.5.1	反射型光纤温度传感器	353
11.2.1	透射型强度调制光纤 传感器	339	11.5.2	微弯型光纤温度传感器	356
11.2.2	反射型强度调制光纤 传感器	339	11.5.3	本征型光纤温度传感器	357
11.2.3	微小弯曲型强度调制光纤 传感器	340	11.5.4	干涉型光纤温度传感器	358
11.2.4	本征型强度调制光纤 传感器	341	11.5.5	应用	358
§ 11.3	相位调制光纤传感器	342	第 12 章	光通信技术	360
11.3.1	光纤干涉仪	342	§ 12.1	光纤通信系统	360
11.3.2	相位检测技术	344	12.1.1	光端机与光中继机	361
§ 11.4	位移光纤传感器	348	12.1.2	备用系统与辅助系统	367
11.4.1	反射型位移光纤传感器	348	12.1.3	光纤通信系统的设计	370
			§ 12.2	光纤通信中的复用技术	377
			12.2.1	光波分复用技术	377
			12.2.2	光时分复用技术	383
			12.2.3	光码分复用技术	385
			§ 12.3	相干光纤通信技术	385



12.3.1	相干光纤通信的基本原理及系统的基本组成	386	第14章	最新激光加工技术	429
12.3.2	相干检测原理	386	§14.1	激光修补	429
12.3.3	调制与解调	387	14.1.1	激光微调	429
12.3.4	信噪比、误码率和接收灵敏度	389	14.1.2	存储器激光冗余修正	431
12.3.5	相干光系统的优点和关键技术	392	14.1.3	掩模版激光修补	431
12.3.6	相干光纤通信技术的应用	393	§14.2	激光光刻	431
§12.4	光孤子通信	396	§14.3	激光清洗	432
12.4.1	光孤子的形成	397	14.3.1	轮胎模具激光清洗	432
12.4.2	光孤子通信系统的构成和性能	399	14.3.2	硅片的激光辅助清洗	434
12.4.3	光孤子通信系统的关键技术	399	14.3.3	激光清洗聚酰亚胺薄膜	435
12.4.4	光孤子传输系统实验研究现状及展望	401	14.3.4	集成电路组件激光消闪	435
§12.5	无线光通信技术	402	14.3.5	集成电路组件激光退标	435
12.5.1	无线光通信技术的基本原理	402	14.3.6	大型天文望远镜的清洗	435
12.5.2	无线光通信技术的优点和应用	402	14.3.7	磁头滑座空气轴承的清洗	436
12.5.3	国内外无线光通信技术的发展	404	14.3.8	艺术品的激光清洗	436
习题及思考题		405	14.3.9	激光脱漆	437
第13章	相干测量技术	407	14.3.10	激光除锈和去氧化皮	439
§13.1	莫尔条纹技术	407	14.3.11	激光去油脱脂	439
13.1.1	条纹形成原理	407	§14.4	激光划片	439
13.1.2	莫尔条纹的计数原理	409	§14.5	激光引致分离	440
13.1.3	莫尔形貌(等高线)技术	412	14.5.1	传统的玻璃和玻璃制品的切割方式	440
§13.2	激光散斑技术	414	14.5.2	玻璃和玻璃制品的激光熔化切割方法	440
13.2.1	散斑概念及统计性质	414	14.5.3	玻璃的第二代激光切割法	441
13.2.2	散斑计量技术	417	14.5.4	玻璃的第三代激光切割法——双激光法	443
13.2.3	电子散斑技术	422	§14.6	激光加工高密度柔性线路板	444
13.2.4	散斑用于测量表面粗糙度	423	§14.7	脉冲激光沉积薄膜技术	444
§13.3	激光多普勒测速技术	423	§14.8	激光辅助化学气相沉积	445
13.3.1	光学多普勒效应	423	§14.9	激光强化电镀	446
13.3.2	差分多普勒技术	425	§14.10	激光退火非晶硅	446
13.3.3	多普勒测速系统的光电检测与信号处理	427	第15章	激光切割技术	448
习题及思考题		428	§15.1	激光切割概述	448
			§15.2	连续激光切割的基础	448
			15.2.1	连续激光切割材料的特点	448
			15.2.2	连续激光切割材料的机理及分类	449
			15.2.3	影响连续激光切割质量的 因素	450



§ 15.3 常用材料的激光切割特性	456
15.3.1 金属板材的激光切割	456
15.3.2 非金属材料的激光切割	458
§ 15.4 连续 CO ₂ 激光的特色应用	459
15.4.1 钣金件激光切割	460
15.4.2 非金属板材的激光切割	462
15.4.3 特殊高质量部件的激光切割	464
15.4.4 三维激光切割	468
§ 15.5 脉冲固体激光切割应用	468
15.5.1 微喷水波导激光切割应用	468
15.5.2 紫外脉冲激光切割高精度模板	470
15.5.3 脉冲激光的其他微加工应用	473
§ 15.6 连续固体激光应用于材料切割	474
15.6.1 大功率片状激光器	475
15.6.2 大功率光纤激光器	475
参考文献	477



第一篇 激光技术概论



第 1 章

激光原理概论

对于一个普通光源发出的光,一般都是向一切可能的方向辐射的,也就是说将充满整个 4π 球面度。经典的理论和实验证明,对于一个普通光源,不论采用什么光学系统,都不可能形成一个比普通光源本身还要亮的像,也就是,光源的像不可能有比光源本身更高的辐射通量。

物理学家爱因斯坦早在 1917 年就预言了受激发射过程的存在,从而在理论上指出了一种新型人造光源——激光器的可能性。受激发射概念奠定了激光理论的基础。

在许多实际应用中,人们也渴望得到一种新型光源,希望它能产生方向性好、单色性好和亮度高的光。1954 年一种新器件的出现引起了人们的注意,这就是微波激射放大器——Maser(脉射)。Maser 是由“microwave amplification by stimulated emission of radiation”的第一个字母组合而成,意思是通过辐射的受激发射进行微波放大。1958 年,汤斯(C. H. Townes)和肖洛(A. L. Schawlow)发表了一篇重要文章,讨论并概括了光波段受激辐射放大器的主要问题和困难,并预言了实现这一设想必须满足的物理条件。这篇文章标志着激光时代的开端。世界上第一台激光器,由休斯研究室的梅曼(T. H. Maiman)研制,并最终在 1960 年成功地运转。类似 Maser,这种新的器件被称做 Laser——light amplification by stimulated emission of radiation。现在这个名词有两个意思:其一,指器件本身,称做激光器(有时也简称激光);其二,指这种器件所产生的光,称做激光。所以,激光是一种能够产生或放大电磁波谱中包括红外、可见和紫外相干辐射的器件,以及所发出的光。

第一台激光器问世后,激光技术获得了突飞猛进的发展:第一台激光器(固体)发明半年后,连续氦氖(He-Ne)气体激光器就运转了(1961 年),此后相继出现的有砷化镓半导体激光器(1962 年),液体激光器(1963 年)和化学激光器(1964 年)。各种相关的技术也相继出现:选频、稳频、调制、调 Q、锁模等。

激光器的首次成功运转,不仅是光学发展史上的伟大里程碑,而且是整个科学史上的一个重要里程碑,激光技术在现代社会中正在发挥越来越大的作用。

§ 1.1 激光产生的物质基础

光与物质之间的共振相互作用是激光器发光的物理基础。1900 年普朗克提出量子化假说,成功地解释了黑体辐射的实验规律。1913 年波尔又利用量子化假说,成功地解释了氢原子光谱的实验规律。在此基础上,爱因斯坦于 1917 年首次提出了受激辐射的概念。40 年后,这个概念



在激光技术中得到了广泛的应用。本节首先讨论黑体辐射的普朗克公式,然后介绍自发辐射、受激辐射与受激吸收这三种与激光发光机理有关的跃迁过程,最后讨论三种跃迁中引入的爱因斯坦系数之间的关系。

1.1.1 黑体辐射的普朗克公式

处于任何温度下的任意一个物体,都能够吸收或辐射电磁波,这种由于物体中的分子或原子受到热激发而发射电磁辐射的现象称为热辐射。如果存在一种物体,它能够完全吸收任何波长的电磁辐射,就称它为黑体。在实验室中,把一个内部挖有封闭空腔的物体,在壁上开一个小孔,当该物体加热到一定温度后,空腔内部表面的热辐射在腔内来回反射形成一个稳定的辐射场。空腔辐射体可近似看成是一种理想的黑体。黑体热辐射的大小由单色能量密度 u_ν 描述,它定义为在单位体积 V 内,频率处于 ν 处的单位频率间隔内的电磁辐射能量 E ,即

$$u_\nu = \frac{dE}{dVd\nu} \quad (1.1.1)$$

实验证明, u_ν 的大小与 ν 和温度 T 有关,为了解释实验测定的 $u_\nu \sim \nu$ 曲线,许多科学家从经典物理学的观点出发,做了大量的尝试,但都归于失败。普朗克大胆地提出了与经典观点不相容的辐射能量量子化假说,得到了与实验结果相当符合的黑体辐射公式。普朗克认为,原子中的电子运动可视为是一维的谐振子,它所吸收或发射的电磁辐射能量不能连续变化,只能以与振子的振动频率成正比的能量子作为基元,取它的整倍数。能量子的大小为

$$E = h\nu \quad (1.1.2)$$

式中, h 为普朗克常数; ν 为振动频率。

根据普朗克的能量量子化假说和玻耳兹曼的统计规律,可以得出黑体辐射分配到腔内每个模式上的平均能量为

$$E = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1.1.3)$$

式中, k 为玻耳兹曼常数,其值为 $1.38 \times 10^{23} \text{ J/}^\circ\text{C}$ 。

腔内单位体积处于频率为 ν 处的单位频率间隔中的光波模式数(或称为单色模式密度)为

$$m_\nu = \frac{M}{Vd\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \quad (1.1.4)$$

式中, M 为总模数。

把式(1.1.3)与式(1.1.4)相乘,便可得到黑体辐射的单色能量密度为

$$u_\nu = E \cdot m_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1.1.5)$$

此式(1.1.5)即为普朗克公式。

1.1.2 跃迁

玻尔在解释 H 原子光谱实验规律时,将经典的理论与普朗克的能量量子化概念结合在一



起,认为原子中的电子可以在一些特定的轨道上运动,处于定态,并具有一定的能量。这样一来,每种原子就有一系列的与不同定态对应的能级,各能级间的能量不连续。当原子从某一能级吸收了能量或释放了能量,转移到另一能级时,就称它产生了跃迁。凡是吸收能量后从低能级到高能级的跃迁称为吸收跃迁;释放能量后从高能级到低能级的跃迁称辐射跃迁。跃迁时所吸收或释放的能量必须等于发生跃迁的两个能级之间的能量差。如果吸收或辐射的能量都是光能的话,此关系可表示为

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (1.1.6)$$

式中, E_2 与 E_1 分别是两个能级的能量。 $h\nu$ 是吸收或释放的光子的能量。爱因斯坦从辐射与原子相互作用的量子论观点出发提出,这个相互作用包括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。在激光器的发光过程中,始终伴随着这三种跃迁过程。下边分别叙述这三种跃迁过程。

1. 自发辐射

处于高能级 E_2 的原子自发地向低能级 E_1 跃迁,并发射出一个频率 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光子的过程称为自发辐射跃迁(如图 1.1.1 所示)。这个过程可以用自发跃迁几率来描述,它定义为发光材料在单位时间内,从高能级上产生自发辐射的发光粒子数密度占高能级总粒子数密度的比值,也就是

$$A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{sp}} \frac{1}{n_2} \quad (1.1.7)$$

式中, dn_{21} 为 dt 时间内自发辐射粒子数密度; n_2 为 E_2 能级总粒子数密度;下标 sp 表示是自发辐射跃迁。自发辐射跃迁的过程是一种只与原子本身的性质有关,而与辐射场 $u(\nu)$ 无关的自发过程。 A_{21} 的大小与原子处在 E_2 能级上的平均寿命 τ_2 有关。现在来推导 A_{21} 与 τ_2 之间的关系。 E_2 能级上的粒子数密度 n_2 随时间的变化率,在不考虑其他辐射跃迁的情况下,可以写成

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = - \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{sp}} = - A_{21} n_2(t) \quad (1.1.8)$$

解此微分方程,可得到 $n_2(t)$ 随时间变化的规律为

$$n_2(t) = n_2(0) e^{-A_{21}t} \quad (1.1.9)$$

式中, $n_2(0)$ 表示初始 $t=0$ 时刻的粒子数密度。

上式表明, E_2 能级上的粒子数密度因自发辐射作用随时间按指数规律衰减。定义粒子数密度由 $t=0$ 时的 $n(0)$ 衰减到它的 $1/e$ 时所用时间为 E_2 能级的平均寿命 τ ,从公式(1.1.9)可推出

$$\tau = \frac{1}{A_{21}} \quad (1.1.10)$$

A_{21} 又可称为自发辐射跃迁爱因斯坦系数。

2. 受激辐射

处于高能级 E_2 上的原子在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的辐射场激励作用下,或在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光子诱发下,向低能级 E_1 跃迁并辐射出一个与激励辐射场光子或诱发光子的状



态(包括频率、运动方向、偏振方向、相位等)完全相同的光子的过程称为受激辐射跃迁,其示意图如图 1.1.2 所示。用受激辐射跃迁几率 W_{21} 来描述受激辐射,它定义的方式类似于自发辐射跃迁几率

$$W_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{n_2} \quad (1.1.11)$$

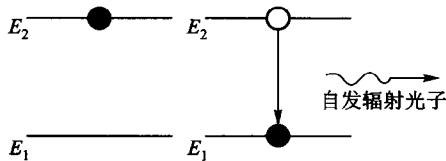


图 1.1.1 能级跃迁示意图

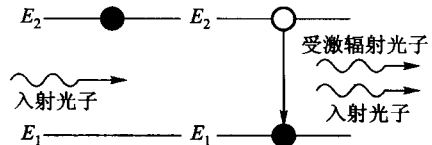


图 1.1.2 受激辐射跃迁示意图

式中, dn_{21} 为 dt 时间内受激辐射粒子数密度; n_2 为 E_2 能级粒子数密度。

受激辐射与自发辐射是有本质不同的物理过程,其跃迁几率的性质不同: A_{21} 只与原子本身的性质有关,而 W_{21} 不仅与原子本身的性质有关,而且与辐射场 u_ν 成正比,抽象地写为

$$W_{21} = B_{21} u_\nu \quad (1.1.12)$$

式中, B_{21} 为受激辐射跃迁爱因斯坦系数,它只与原子性质有关。

3. 受激吸收

受激辐射的反过程为受激吸收过程,一般也称做吸收。同理有

$$W_{12} = \left(\frac{dn_{12}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{n_1} \quad (1.1.13)$$

式中, dn_{12} 为 dt 时间内受激吸收粒子数密度; n_1 为 E_1 能级粒子数密度。

因为受激吸收跃迁过程也是在辐射场作用下产生的,故其跃迁几率 W_{12} 也应与辐射场大小成正比,即

$$W_{12} = B_{12} u_\nu \quad (1.1.14)$$

式中, B_{12} 为受激吸收跃迁爱因斯坦系数,它只与原子性质有关。

正是由于有受激吸收过程存在,才使得由式(1.1.5)所描述的腔内黑体辐射场具有稳定的数值。

1.1.3 3 个爱因斯坦系数之间的关系

腔内黑体辐射场与物质原子相互作用的结果维持黑体处于热平衡状态。在这种热平衡状态下,腔内物质的粒子数密度按能级分布应服从玻耳兹曼分布

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} \quad (1.1.15)$$

式中, n_1 为 E_1 能级的粒子数密度; n_2 为 E_2 能级的粒子数密度; T 为热平衡状态的温度。式(1.1.15)中已假设 E_1 与 E_2 两个能级的统计权重相等。在热平衡的条件下, E_1 与 E_2 两个能级



上的粒子数密度应保持不变,即

$$\left(\frac{dn_{21}}{dt}\right)_{sp} + \left(\frac{dn_{21}}{dt}\right)_{st} = \left(\frac{dn_{12}}{dt}\right)_{st} \quad (1.1.16)$$

或

$$n_2 A_{21} + n_2 B_{21} u_\nu = n_1 B_{12} u_\nu \quad (1.1.17)$$

将式(1.1.5)代入式(1.1.17)中,可得

$$\frac{c^3}{8\pi h\nu^3} (e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1) = \frac{B_{21}}{A_{21}} \left(\frac{B_{12}n_1}{B_{21}n_2} - 1 \right) \quad (1.1.18)$$

再将式(1.1.15)代入式(1.1.18)中,并考虑到 $E_2 - E_1 = h\nu$,可以得到

$$\frac{c^3}{8\pi h\nu^3} (e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1) = \frac{B_{21}}{A_{21}} \left(\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right) \quad (1.1.19)$$

该式对任何温度 T 都成立,由此可得出 3 个爱因斯坦系数 A_{21} 、 B_{21} 和 B_{12} 之间的关系为

$$B_{12} = B_{21} \quad (1.1.20)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (1.1.21)$$

受激辐射现象的发现奠定了激光产生的物理基础。

§ 1.2 激光产生的基本原理和方法

虽然在 1917 年爱因斯坦就预言了受激辐射的存在,但在一般热平衡情况下,物质的受激辐射总是被受激吸收所掩盖,因此未能在实验中观察到。直至 1960 年,第一台红宝石激光器才面世,它标志了激光技术的诞生。从此激光技术的发展十分迅速,现已在几百种工作物质中制成了激光器或实现了光放大。激光的出现是对传统光源的一次革命,它应用于工业、农业、军事、交通、科研、日常生活等几乎所有的国民经济领域。它大大丰富了传统光学的内容,并发展形成了数门乃至数十门新型的边缘科学。本节介绍激光产生的最基本原理、激光器的基本结构、激光工作物质的能级系统等基础知识。

1.2.1 激光产生的基本原理

在受激辐射跃迁的过程中,一个诱发光子可以使处在上能级上的发光粒子产生一个与该光子状态完全相同的光子,这两个光子又可以去诱发其他发光粒子,从而产生更多状态相同的光子。这样,在一个人射光子的作用下,可引起大量发光粒子产生受激辐射,并产生大量运动状态相同的光子。这种现象称为受激辐射光放大。由于受激辐射产生的光子都属于同一光子态,因此它们是相干的。通常,受激辐射与受激吸收两种跃迁过程是同时存在的,前者使光子数增加,后者使光子数减少。当一束光通过发光物质后,究竟是光强增大还是减弱,要看这两种跃迁过程