



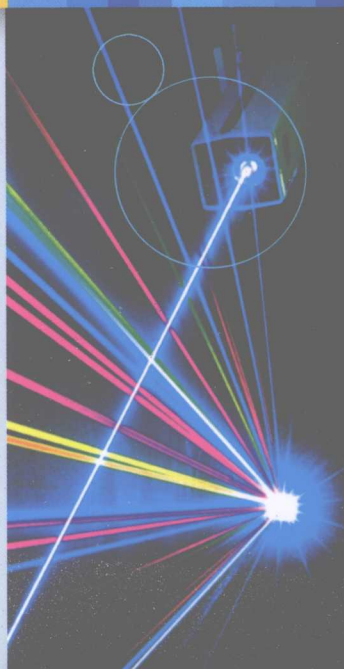
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

激光原理与技术

安毓英 刘继芳 曹长庆 编著



科学出版社
www.sciencep.com



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

激光原理与技术

安毓英 刘继芳 曹长庆 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以经典理论和速率方程理论为基础,系统地介绍激光的基本原理和基本技术。第1章阐述激光的基本原理,第2章讨论开放式光腔和高斯光束,第3章讨论激光介质的增益线型和增益系数,第4章介绍激光器稳态振荡特性,第5章较系统地介绍典型激光器和激光技术。

本书可作为电子科学与技术、光信息科学与技术专业本科生的专业基础课教材,也可供高等院校相关专业师生和有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光原理与技术/安毓英,刘继芳,曹长庆编著. —北京:科学出版社, 2010. 2

(普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-026622-4

I. ①激… II. ①安…②刘…③曹… III. ①激光理论-高等学校-教材
②激光技术-高等学校-教材 IV. ①TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 019410 号

责任编辑:匡 敏 张 濮 潘继敏/ 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 2 月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 1—3 000 字数: 287 000

定价: 24.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》 编委会

顾问:姚建铨 中国科学院院士 天津大学
蔡惟铮 国家级教学名师 哈尔滨工业大学

主任:吕志伟 教授 哈尔滨工业大学

副主任:金亚秋 教授 复旦大学
郝跃 教授 西安电子科技大学
严晓浪 教授 浙江大学
胡华强 编审 科学出版社

委员:(按姓氏笔画排序)

王卫东	教授	中国科学技术大学	张兴	教授	北京大学
王志华	教授	清华大学	张怀武	教授	电子科技大学
毛军发	教授	上海交通大学	张贵忠	教授	天津大学
文玉梅	教授	重庆大学	张雪英	教授	太原理工大学
匡敏	副编审	科学出版社	陈弟虎	教授	中山大学
仲顺安	教授	北京理工大学	陈徐宗	教授	北京大学
任晓敏	教授	北京邮电大学	陈鹤鸣	教授	南京邮电大学
刘纯亮	教授	西安交通大学	欧阳征标	教授	深圳大学
杨冬晓	教授	浙江大学	都思丹	教授	南京大学
杨瑞霞	教授	河北工业大学	高勇	教授	西安理工大学
时龙兴	教授	东南大学	郭树旭	教授	吉林大学
何伟明	教授	哈尔滨工业大学	黄卡玛	教授	四川大学
余江	教授	云南大学	崔一平	教授	东南大学
邸旭	教授	长春理工大学	逯贵楨	教授	中国传媒大学
邹雪城	教授	华中科技大学	曾云	教授	湖南大学
应质峰	教授	复旦大学	谢泉	教授	贵州大学
宋梅	教授	北京邮电大学	蔡敏	教授	华南理工大学

材料、能源和信息是 21 世纪的三大支柱产业,电子科学与技术是电子工程和电子信息技术发展的基础学科。目前,许多发达国家,如美国、德国、日本、英国、法国等,都竞相将电子科学与技术相关领域纳入了国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术等方向的研究也给予了高度重视,在多项国家级战略性科技计划中,如“863 计划”、“973 计划”、国家科技攻关计划、国家重大科技专项等,都有大量立项。在近几年发布的国务院《2006—2020 年国家信息化发展战略》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,对我国的集成电路(特别是中央处理器芯片)、新一代信息功能材料及器件、高清晰度大屏幕平板显示、激光技术等关键领域都提出了明确目标。

电子科学与技术主要研究制造电子、光电子的各种材料及元器件,以及集成电路、集成电子系统和光电子系统,并研究开发相应的设计和制造技术。它涵盖的学科范围很广,是多学科交叉的综合性学科。现在,教育部本科专业目录中,电子科学与技术专业涵盖了微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件及电磁场与微波等专业方向。随着学科的交叉发展和产业的整合,各专业方向已彼此渗透交融。如何拓宽专业方向?如何体现专业特色?是当前我国高校电子科学与技术专业在办学方面所迫切需要探讨的问题。教育部电子科学与技术专业教学指导分委员会起草的《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范》,对本专业的核心知识领域和知识单元的覆盖范围作了规定,旨在引导高等学校电子科学与技术专业在办学方向与人才培养方面探索新的模式,不断提高教学质量,增强高校教学的创新能力,更好地培养知识、能力、素质全面协调发展的,适合我国电子科学与技术各领域不同层次发展需求的有用人才。

教育部为了推进“质量工程”,自 2007 年 10 月开始,先后三批遴选了国家级特色专业建设点。目前,有三十余个院系被批准为电子科学与技术国家级特色专业建设点。在教材建设方面,2008 年 10 月,教育部高教司在《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》中指示:“教材建设要反映教学内容改革的成果,积极推进教材、教学参考资料和教学课件三位一体的立体化教材建设,选用高质量教材,编写新教材。”为了适应新形势下对电子科学与技术领域人才培养的需求,本届电子科学与技术教学指导分委员会经过广泛深入调研,依托电子科学与技术专业国家级、省级特色专业建设点,与科学出版社共同组织出版本套《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》,旨在贯彻专业规范和教学基本要求,总结和推广各特色专业建设点的教学经验和教学成果,以提高我国电子科学与技术专业本科教学的整体水平。

本套丛书在组织编写中,重点考虑了以下几方面的特色:

1. 体现专业特色,贯彻专业规范和教学基本要求。依托“国家级、省级特色专业建设点”,汇总优秀教学成果,将特色专业建设的内容、国内外科研教学的成果、电子科学与技术方向的专业规范与教学基本要求结合起来,教材内容安排围绕专业规范,体现核心知识单元与知识点。

2. 按照分类指导原则,满足多层面的需求。针对同一类课程,根据不同的教学层次(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学)和学时要求(多学时、少学时),涵盖不同范围的拓展知识单元,编写适合不同层次需求的教材。注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

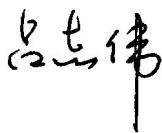
3. 传承精品,吐故纳新。本套丛书吸纳了科学出版社2004年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新一版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

4. 拓宽专业基础,面向工程应用,加强实践环节。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强学生的适应性;面向工程应用,突出工科特色,反映新技术、新工艺;注重实践环节的设置,以促进学生的实际动手能力和创新能力的培养。

5. 注重立体化建设。本套丛书除了主教材外,还将逐步配套学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等,为任课教师提供丰富的配套教学资源,方便教师教学,同时帮助学生复习与自学,使教材更加易教易学。

本套丛书的编写汇聚了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关高校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对本套丛书不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议!



教育部高等学校电子科学与技术专业
教学指导分委员会主任
哈尔滨工业大学教授

前 言

本书是为电子科学与技术、光信息科学与技术本科专业以及电子信息类、电子信息科学类其他相关专业编写的“激光原理”、“激光原理与技术”课程教材。

激光器发明虽然已将近半个世纪,但人们对激光的物理认识仍在不断深化。作者有幸讲授“激光原理与技术”课程 30 余年,本书是在作者历年讲稿基础上整理编著而成的。理应感谢的是,作者组织讲稿时所用的主要参考教材是周炳琨等编著的《激光原理》一书。

本书力求达到普通高校本科教学的普适性:第一,以经典理论和速率方程理论相结合的处理方法,讲授“激光原理与技术”,不涉及半经典理论;第二,突出爱因斯坦关系的讨论,以受激辐射为红线,从电子学载波技术发展引出光频载波技术(即单模激光器)的基本思想和光学实现方法,使教学师生对受激辐射的观念建立和物理理解有所深入;第三,以三条主线和十二个问题的形式归纳课程体系,既有树木,又见森林,有助于教师根据情况组织教学,又有利于学生自学。

本书共分为 5 章,每章后附有习题与思考题。第 1 章主要介绍激光的基本原理和特性,并介绍本书编写的课程体系;第 2 章分别应用几何光学理论和物理光学理论详细讨论无源光学开腔的损耗描述、稳定条件和腔内模式,并在此基础上介绍高斯光束的传输和变换规律;第 3 章分别应用经典理论和速率方程理论讨论激光工作物质的增益线型、谱线加宽机制与增益饱和规律;第 4 章分析激光器稳态工作特性,包括阈值特性、输出功率、模式竞争、频率牵引以及线宽极限等问题;第 5 章以激光工作物质分类介绍几种典型激光器,并结合激光器介绍改善和控制激光特性的调 Q、锁模、选模、稳频和放大等激光技术。

本书的参考学时为 46 学时。使用本书的先修课程是大学物理和电磁理论,具有物理光学和量子力学知识的人员,使用本书更加有利。本书既可作为电子科学与技术、光信息科学与技术的本科生专业基础课程“激光原理与技术”的教材,也可供应用物理、通信工程等相关专业课程选用。

本书第 1 章由安毓英编写,第 2、3 章由刘继芳编写,第 4、5 章由曹长庆编写,安毓英统编全稿。在编写过程中,得到了西安电子科技大学技术物理学院教师们支持,西北大学张纪岳教授、西安电子科技大学石顺祥教授审阅了全书书稿,并提出许多建设性意见,在此对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,希望广大读者批评指正。

作者

2009 年 12 月

丛书序

前言

第 1 章 激光基础——爱因斯坦系数关系	2
1.1.2 光子态	3
1.1.3 光波模与光子态的相干性	4
1.1.4 光子简并度 \bar{n}	5
1.2 电子学载波技术的迷茫	6
1.2.1 载波和噪声波	6
1.2.2 电磁载波技术	7
1.2.3 太赫兹波鸿沟	8
1.2.4 光频载波的迷茫	8
1.3 爱因斯坦关系——自发辐射和受激辐射	9
1.3.1 普朗克黑体辐射公式	9
1.3.2 自发辐射、受激辐射与辐射的受激吸收	11
1.3.3 爱因斯坦关系	13
1.3.4 爱因斯坦微分关系	14
1.4 光的受激辐射放大与振荡——激光器运转的阈值和稳定条件.....	15
1.4.1 爱因斯坦关系的意义	15
1.4.2 粒子数反转和光的受激放大	18
1.4.3 增益饱和与自激振荡	20
1.4.4 激光器的构成及阈值条件.....	21
1.5 激光特性和课程体系.....	23
1.5.1 激光特性.....	23
1.5.2 课程体系.....	27
习题与思考题 1	27
第 2 章 激光谐振腔和高斯光束	29
2.1 光腔的损耗及损耗描述.....	31
2.1.1 光腔损耗.....	31
2.1.2 光腔损耗计算举例	35
2.2 共轴球面腔的光线传输矩阵理论.....	37

2.2.1	光线传输矩阵	38
2.2.2	光腔稳定条件	41
2.2.3	本征光束	46
2.3	对称共焦腔的自再现模行波场	54
2.3.1	开腔模概念	54
2.3.2	Fox 和 Li 的开腔模迭代求解方法	57
2.3.3	自再现模本征积分方程	61
2.3.4	对称共焦腔镜面上自再现模光场分布	62
2.3.5	行波场——高斯光束	73
2.4	一般稳定腔的高斯光束	79
2.4.1	对称共焦腔完整的行波高斯光束小结	80
2.4.2	一般稳定腔与对称共焦腔的等效性	81
2.4.3	一般稳定腔高斯光束参量(行波场)	83
2.5	高斯光束的传输与变换	87
2.5.1	高斯光束的传输规律(TEM_{00})	87
2.5.2	高斯光束的透镜变换、会聚和准直	89
2.5.3	高斯光束的衍射倍率因子 M^2	97
	习题与思考题 2	98
第 3 章	激光工作物质的增益	101
3.1	经典理论	103
3.1.1	电偶极子近似模型	103
3.1.2	受激吸收和色散现象的麦克斯韦理论	107
3.2	谱线加宽机制及加宽线型	111
3.2.1	均匀加宽	112
3.2.2	非均匀加宽	117
3.2.3	综合加宽	121
3.3	激光器速率方程	127
3.3.1	单模速率方程	127
3.3.2	多模振荡速率方程	134
3.4	激光介质增益及增益饱和(模式竞争)	135
3.4.1	均匀加宽介质	136
3.4.2	非均匀加宽介质	139
3.4.3	综合加宽介质	143
3.5	光放大概念分析	144
	习题与思考题 3	146

第 4 章 激光器稳态振荡特性	149
4.1 振荡阈值条件	149
4.2 阈值特性	151
4.3 激光器稳态输出特性	154
4.3.1 均匀加宽激光器的模式竞争	154
4.3.2 空间烧孔	155
4.3.3 非均匀加宽激光器的多纵模振荡	155
4.3.4 输出功率及最佳耦合	156
4.4 定态激光器频率特性	159
4.5 定态激光器极限线宽	161
习题与思考题 4	163
第 5 章 典型激光器与技术	167
5.1 气体激光器	167
5.1.1 He-Ne 激光器	167
5.1.2 CO ₂ 激光器	169
5.2 半导体激光器	169
5.2.1 反转原理	170
5.2.2 典型半导体激光器	173
5.3 固体激光器	181
5.3.1 红宝石激光器、钕激光器	182
5.3.2 可调谐固体激光器	184
5.3.3 激光二极管泵浦的固体激光器 (DPSSL)	186
5.3.4 光纤激光器	186
5.4 调 Q 激光器	187
5.4.1 Q 调制原理	187
5.4.2 调 Q 技术	188
5.4.3 腔倒空技术	190
5.4.4 调 Q 激光器特性	190
5.5 锁模激光器	192
5.5.1 锁模原理	192
5.5.2 锁模技术	192
5.6 稳频激光器	193
5.6.1 稳频原理	193
5.6.2 稳频的主要方法	194
5.7 激光放大器	196

5.7.1	激光放大理论	196
5.7.2	激光放大的主要方法	197
5.7.3	光纤放大器	197
5.8	单模激光器	199
5.8.1	单纵模激光器	199
5.8.2	基横模激光器	201
	习题与思考题 5	202
附录 A	激光参数的定义和测试方法	205
A.1	激光光斑宽度和光斑直径	205
A.2	激光光束发散角测量	207
A.3	激光光束质量测量	208
附录 B	常用物理常数、常量和常用符号表	211
	参考文献	215

1.1 光波模式和光子态

1.1.1 光波模式

按照经典电磁理论,光电磁波的运动规律同样也由麦克斯韦(Maxwell)方程决定。为了简单起见,这里只写出均匀介质中定态电波 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{i\omega t}$ 的亥姆霍兹(Helmholtz)方程

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1.1-1)$$

和横波条件

$$\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1.1-2)$$

以及

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.1-3)$$

式中, c, λ 分别为介质中的光速和波长。

在无边界约束条件下,运动方程(1.1-1)有各种形式的特解,每种特解称为一种模式,其中最基本的特解是定态(或单色)平面波。它表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1.1-4)$$

式中, \mathbf{E}_0 为光波电场复振幅矢量,由式(1.1-2)可知, \mathbf{E}_0 有两个独立的偏振分量和初相位 φ_0 ; \mathbf{r} 为观察位置坐标矢量; \mathbf{k} 为波矢量且 $\mathbf{k} = k_x \mathbf{e}_x + k_y \mathbf{e}_y + k_z \mathbf{e}_z$, 代表平面波传播方向。运动方程(1.1-1)的通解可表示为一系列特解,即单色平面波的线性叠加。由于无约束,波矢 \mathbf{k} 的大小和方向可以连续取值,即具有任意波矢 \mathbf{k} 的单色平面波都可以存在。

在一个有边界条件限制,即有边界约束条件下,特解形式会发生变化。为简单起见,考虑一个充满均匀电介质的矩形导体腔,如图 1.1-1 所示。从图 1.1-1 可见,这

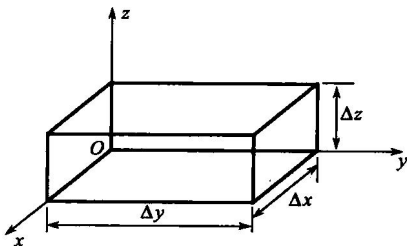


图 1.1-1 导体腔

里的约束体现在:空腔体积 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$; 导体腔面上必须服从边界条件 $\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0$, 这里 \mathbf{n} 是腔面外法线方向, 表明腔面上电场的切向分量必须等于零。这个约束使波方程(1.1-1)的特解不再是任意波矢 \mathbf{k} 的单色平面波, \mathbf{k} 的取值不再连续, 只能取一系列特定值, 腔内只能存在一系列独立的具有特定波矢 \mathbf{k} 的平面单色驻波, 称为驻波模。而无约束时称为行波模。

在接下来的讨论中, 我们不去关注如何求解式(1.1-1)的具体过程, 因为既然是驻波解, \mathbf{k} 只能取一系列离散值(可数), 我们更关注这些驻波模如何区分? V 内能有多少个模? 单位体积内频率 ν 处单位频带内有多少个模(称为模式谱密度 n_ν)? 这是一个很重要的概念。

在 \mathbf{k} 空间(以 k_x, k_y, k_z 为直角坐标), 驻波条件是

$$\left. \begin{aligned} k_x \Delta x &= m\pi \\ k_y \Delta y &= n\pi \\ k_z \Delta z &= q\pi \end{aligned} \right\} \quad (1.1-5)$$

式中, m, n, q 取正整数。每一组正整数(m, n, q)在波矢空间确定了一个允许的 \mathbf{k} 值, 表示腔内一个驻波模, 对应 \mathbf{k} 空间一个点, 记为 TEM_{mnq} (包含两个偏振态, 算两个模)。令 $\Delta m = \Delta n = \Delta q = 1$, 从式(1.1-5)有, 每个模式在三个坐标轴方向与相邻模的间隔为

$$\left. \begin{aligned} \Delta k_x &= \frac{\pi}{\Delta x} \\ \Delta k_y &= \frac{\pi}{\Delta y} \\ \Delta k_z &= \frac{\pi}{\Delta z} \end{aligned} \right\} \quad (1.1-6)$$

因此, 每个模式(允许的 \mathbf{k} 值)在波矢空间占有一个体积元

$$\Delta k_x \Delta k_y \Delta k_z = \frac{\pi^3}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \frac{\pi^3}{V} \quad (1.1-7)$$

在波矢空间中, 数值大小为 $k \sim k + dk$ 的波矢量 \mathbf{k} 对应点都在以原点为球心、以 k 为半径、以 dk 为厚度的薄球壳内。由于 m, n, q 只能取正整数, 允许波矢 \mathbf{k} 的三个分量 k_x, k_y, k_z 也只能取正值, 因此, 可以存在于体积为 V 的空腔内的波矢在波矢空间中所占体积是该球壳的 $1/8$, 即 $\pi k^2 dk / 2$ 。用它除以每个允许波矢在波矢空间的体积元表达式(1.1-7), 可得出在体积为 V 的空腔内、波矢量数值为 $k \sim k + dk$ 的波矢量(驻波模数量)

$$M_k = \frac{k^2 dk}{2\pi^2} V \quad (1.1-8)$$

注意到式(1.1-3)及 $dk = \Delta\omega/c = 2\pi\Delta\nu/c$, 可算出在 V 体积空腔内、频率为 $\nu \sim \nu + d\nu$

的驻波模数为

$$M_\nu = \frac{4\pi\nu^2 d\nu V}{c^3} \quad (1.1-9)$$

因为光波模式数是光驻波模式数或允许光波矢量数的二倍,故得到存在于体积为 V 的空腔内、频率为 $\nu \sim \nu + d\nu$ 的光波模式(行波模)数为

$$M = 2M_\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu V}{c^3} \quad (1.1-10)$$

最后,存在于体积为 V 的空腔单位体积内、单位频率间隔的光波模式数,即模式谱密度 n_ν 为

$$n_\nu = \frac{M}{V d\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \quad (1.1-11)$$

故式(1.1-10)又可以写为

$$M = n_\nu V d\nu \quad (1.1-12)$$

1.1.2 光子态

按照光量子学说,光是一种以光速 c 运动的光子流。光子的基本性质如下。

(1) 光子与其他基本粒子一样,具有能量 E 、动量 \mathbf{P} 和质量 m 。光子的这些粒子属性与光的电磁波动属性有着紧密的内在联系,可表示为

$$E = h\nu \quad (1.1-13)$$

$$\mathbf{P} = \frac{h}{2\pi} \mathbf{k} \quad (1.1-14)$$

$$m = \frac{h\nu}{c} \quad (1.1-15)$$

式中, ν 是光频率; \mathbf{k} 是光波矢; $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,称为普朗克(Planck)常量。

(2) 光子具有两种可能的独立偏振态,对应于光波场的两种独立偏振方向。

(3) 光子具有自旋,且自旋量子数为整数,因此大量光子的集合服从玻色-爱因斯坦(Bose-Einstein)统计规律。处于同一状态的光子数目是没有限制的,这是光子与其他服从费米(Fermi)统计分布的粒子(电子、质子、中子等)的重要区别。

光子态是光子运动状态的简称。在经典力学中,质点的运动状态完全由其空间坐标 (x, y, z) 和动量 (P_x, P_y, P_z) 确定,这种六维空间 (x, y, z, P_x, P_y, P_z) 称为相空间,相空间的一点就表示质点的一种运动状态, (x, y, z, P_x, P_y, P_z) 可连续取值。光子的运动状态与经典质点有着本质的区别,它受量子力学测不准关系的制约,表示为

$$\Delta x \Delta y \Delta z \Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z = h^3 \quad (1.1-16)$$

这表明,相同状态的光子都处于同一个相空间体积元 $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z$ 中,称之为相格,它的大小等于 h^3 ,相格的空间体积为

$$\Delta x \Delta y \Delta z = \frac{h^3}{\Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z} \quad (1.1-17)$$

这进一步说明,光子的某一运动状态只能定域在一个相格中,而不能确定它在相格内部的对应空间位置。也就是说,同一相格中的光子是无法区分的,当然属于同一光子态。

类似式(1.1-7),在一个宏观体积 V 内,由于光子坐标与动量间的测不准关系,一个光子态(允许的 ΔP 值)在 P 空间占有的体积元为

$$\Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z = \frac{h^3}{V} \quad (1.1-18)$$

那么在动量空间(P_x, P_y, P_z),数值大小为 $P \sim P + dP$ 范围内的动量 P 对应点,一定都在以原点为球心,以 P 为半径,以 dP 为厚度的球壳之内。由于 P 的数值没有什么限制,可以连续取值,于是整个球壳体积 $4\pi P^2 dP$ 可取,用它除以一个光子态的动量体积元表达式(1.1-18),最后,得到宏观体积 V 中可容纳的光子态数目为

$$M_P = \frac{4\pi P^2 dP}{\Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z} = 4\pi P^2 dP \frac{V}{h^3} \quad (1.1-19)$$

注意到 $P = h\nu/c$, $dP = h d\nu/c$ 以及光子的两种偏振态,在宏观体积 V 中、频率处于 $\nu \sim \nu + d\nu$ 的光子态数目为

$$M_\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu V}{c^3} \quad (1.1-20)$$

光子态谱密度为

$$n_\nu = \frac{M}{V d\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \quad (1.1-21)$$

这与式(1.1-11)完全相同,说明一个光子态等价于一个光波模。在讨论光传播问题时习惯用光波模方法,在讨论光与物质相互作用时用光子态方法则更方便。

1.1.3 光波模与光子态的相干性

由物理光学可知,相干体积 V_c 是光源单色性与光源线度的综合反映,理想的单模光场是完全相干光,相干体积无限大。不同模间的光场是不相干的,且相干体积为零。因此,相干体积 V_c 实际上是指实际光源(面积 A_s 、光谱线宽 $\Delta\nu$)单模光场的相干“空间”。光源谱线宽度 $\Delta\nu$ 决定了单模光场的纵向相干长度

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1.1-22)$$

光源面积 A_s 决定了距光源 R 处的相干面积

$$A_c = \left(\frac{\lambda R}{\sqrt{A_s}} \right)^2 = \left(\frac{\lambda}{\theta_s} \right)^2 \quad (1.1-23)$$

式中, $\theta_s = \sqrt{A_s}/R$, 表示从 R 处看, 光源面积 A_s 所张的角度。光源相干体积

$$V_c = L_c A_c = \frac{c^3}{\theta_s^2 \nu^2 \Delta\nu} \quad (1.1-24)$$

再从光子的观点讨论光子态的相干问题。因为同一相格中光子属于同一光子态, 因此, 同一光子态的光子一定相干。式(1.1-17)给出的 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 应是光子态的相干体积 V_c , 即

$$V_c = \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{h^3}{\Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z} \quad (1.1-25)$$

现在对应物理光学中相干实验的光路, 如图 1.1-2 所示, 看看 V_c 应该等于什么? 因为是同一个物理问题, 实验结果应该相同。从光子观点看, 可以用一个光子长时间完成实验。于是, 距光源 R 处的相干体积 V_c 应为

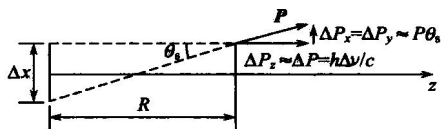


图 1.1-2 光子相干实验示意图

$$V_c = \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{c^3}{\theta_s^2 \nu^2 \Delta\nu} \quad (1.1-26)$$

与式(1.1-24)完全相同。又一次说明一个光波模等价一个光子态。上述讨论给我们的启示是:

- (1) 在本书的讨论中, 光波模和光子态的概念允许混用;
- (2) 单模或单光子态光源才是理想的相干光源, 如何获得这种光源正是本书所要展开讨论的主题。

1.1.4 光子简并度 \bar{n}

在结束本节讨论时, 还有一个问题应该提出, 那就是如何评价一个光源? 这里只关心发光强度和相干性两个参量。

光强度正比于光子数目, 而相干性取决于相干体积大小。从前面的讨论可知, 光子是玻色子, 同态光子数目没有限制。单光子态光源的光场一定是相干光场。式(1.1-24)和式(1.1-26)表明, 光源的本质是单色性($\Delta\nu$ 大小), $\Delta\nu$ 反比于相干体积, 而 θ_s 则是相对的, 离光源越远(R 越大), θ_s 越小, V_c 越大, 但光强越小。这说明光强与 V_c 是矛盾的。因此, 将光强与相干性结合在一起, 引入光子简并度 \bar{n} 参量才是评价光源特性的科学方法, 表示为

$$\begin{aligned}
 \bar{n} &= \frac{\text{光子数目}}{\text{光子态数目}} = \frac{\text{光子数目}}{M} \\
 &= \frac{\text{光子数目}}{n_\nu \cdot V \cdot \Delta\nu} \\
 &= \text{一个光波模内平均的光子数目} \\
 &= \text{一个光子态内平均的光子数目}
 \end{aligned} \tag{1.1-27}$$

从式(1.1-27)可见,模式谱密度 n_ν 将严重影响光子简并度 \bar{n} 。1.2 节将深入讨论这个问题。

1.2 电子学载波技术的迷茫

1.2.1 载波和噪声波

一个光波模式(或电波模式)是由波矢 k 标志的,例如,一个在 z 方向传播的平面电波模式可由式(1.1-4)的实数形式表示为

$$\begin{aligned}
 E(\mathbf{r}, t) &= E_0 \cos(\omega_0 t - kz + \varphi_0) \\
 &= E_0 \cos\phi
 \end{aligned} \tag{1.2-1}$$

式中, ϕ 称为波相位, $\phi = \text{常数}$ 的 xy 面称为 t 时刻的等相位面; φ_0 称为由波源决定的初相位,这是将要讨论的重点。

1. 载波

从式(1.2-1)容易求得

$$\left. \begin{aligned}
 \varphi_0 &= \text{常数} \\
 \omega &= \frac{d\phi}{dt} = \omega_0
 \end{aligned} \right\} \tag{1.2-2}$$

这说明,只要初相位是常数,那么这个波在传播过程中振幅、频率不会发生改变,其波形曲线如图 1.2-1(a)所示,称为载波,具有携带信息的能力,可使电子学中的幅度调制、频率调制、相位调制的功能得以实现。

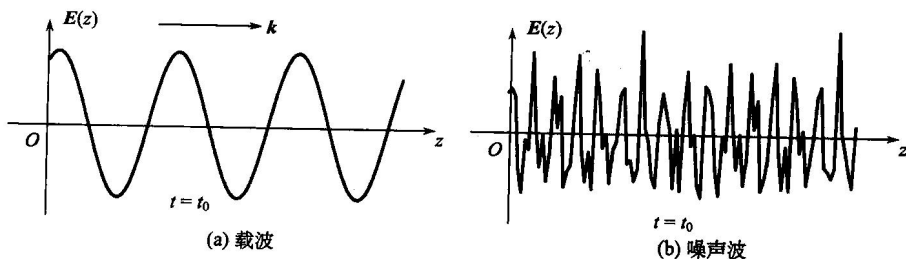


图 1.2-1 载波与噪声波