



# 激光原理与技术

■ 陈海燕 罗江华 黄春雄 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



# 激光原理与技术

■ 陈海燕 罗江华 黄春雄 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

激光原理与技术/陈海燕,罗江华,黄春雄编著. —武汉:武汉大学出版社,  
2011. 12

ISBN 978-7-307-09292-1

I. 激… II. ①陈… ②罗… ③黄… III. ①激光理论 ②激光技术  
IV. TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 225765 号

责任编辑:谢文涛      责任校对:刘欣      版式设计:马佳

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:荆州市天园印刷责任有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:397千字 插页:1

版次:2011年12月第1版      2011年12月第1次印刷

ISBN 978-7-307-09292-1/TN·48      定价:22.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 前 言

本书是在编者多年讲授“激光原理”、“激光物理与技术”、“激光原理与技术”课程讲义的基础上,经过整理、修改、补充完成的。本书全面介绍了激光的产生、激光与物质的相互作用、激光控制等方面的基本概念和基本方法。

本教材的参考学时数为72学时。全书共分11章。第1章激光与激光器基础,主要讨论激光器的基本概念、激光基本特性;第2章光学谐振腔,主要讨论光线传播的矩阵表示、光学谐振腔、高斯光束、Fabry-Perot腔特性;第3章电磁场与物质相互作用,主要讨论电磁场与物质相互作用,泵浦概念、光谱展宽、速率方程;第4章连续与脉冲激光器工作特性,主要讨论小信号稳态增益、增益饱和、激光器的振荡阈值条件、模竞争效应、激光器的输出功率、最佳透过率、线宽极限、脉冲激光器的输出特性;第5章激光调制技术,主要讨论常见的激光调制与偏转技术、电光调制、声光调制、磁光调制;第6章调Q技术,主要讨论调Q激光器的基本理论、常见调Q方法;第7章超短脉冲技术,主要讨论锁模机理、超短脉冲测量技术;第8章激光放大器,主要讨论光纤放大器;第9章模式选择、稳频及倍频技术,主要讨论模式选择技术、模式测量方法;稳频概念、稳频方法;倍频概念与原理;第10章常见激光器,主要讨论固体激光器、气体激光器、光纤激光器;第11章半导体激光器与放大器,主要讨论半导体激光器结构与工作原理、半导体激光放大器结构与工作原理。

本书是根据《全国高等院校工科电子信息类光电信息专业的教学大纲》编写的专业基础课教材,具有物理光学基础知识的读者可以顺利阅读。本书适用于高等院校光电子技术、光信息技术、应用物理等专业本、专科生教材,也可以作为光学工程、物理电子学等专业研究生的参考书,并可供高等院校相关专业师生及从事光电子技术的科技人员参考。本书内容较多,各校可从教学的实际情况出发,有所侧重地选择讲授的内容,加\*号的章节可以略去而不影响课程体系的系统性。另外,本书以基本激光现象、解释现象的基本概念与原理的研究性教学模式进行编写,以求能更好地做到理论与实践相结合。全书配有大量习题与思考题,供学生练习使用。

本书第1~4章、第7~8章、9.1、9.2与9.4节、第10~11章由陈海燕执笔,第5章由黄春雄执笔,第6章与9.3节由罗江华执笔。陈海燕负责统编全稿,并编写全部例题、习题与思考题。本书在编写过程中,参阅了一些编著者的著作和论文,在参考文献中未能一一列出,在此谨向他们表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2011年9月

# 绪 论

激光是20世纪的重大发明之一，现代社会已离不开激光。激光(Laser)是Light amplification by stimulated emission of radiation的缩写。激光是在一定条件下，光与粒子(原子、分子或离子)系统相互作用而产生的受激辐射。产生激光的器件称为激光器，激光器是利用受激辐射方法产生可见光或者不可见光的一种器件。

激光原理与技术是一门研究激光的产生、激光与物质的相互作用、激光控制等问题的应用学科。它着重由实验事实出发，阐明激光现象的基本规律和基本概念及应用。激光原理与技术的主要内容和范畴就是光(电磁场)与物质的相互作用。

与激光器有关的重大历史进程为1860年麦克斯韦建立了光的电磁理论，1900年普朗克提出能量子假说，1905年爱因斯坦提出光量子假说，1917年爱因斯坦提出受激辐射理论，1953年Townes建立第一台微波激光器，1958年Townes, Shawlow开始研制激光器，提出将Maser原理推广到光波段。1960年Maiman制造第一台红宝石激光器，其工作波长 $\lambda=694.3\text{nm}$ ，自1960年以来，激光器已得到了飞速发展，各种新型激光器不断出现，现已广泛应用于国防、通信、医疗保健、生物等各个方面。

激光器的种类繁多。按工作物质可分为：①固体(晶体和玻璃)激光器；②气体激光器；③液体激光器；④半导体激光器；⑤自由电子激光器等。按激励方式可分为：①光泵式激光器；②电激励式激光器；③化学激光器；④核泵浦激光器。按运转方式可分为：①连续激光器；②调Q激光器；③锁模激光器；④可调谐激光器等。按输出波段范围可分为：①远红外激光器，输出波长范围处于 $25\sim 1000\mu\text{m}$ 之间；②中红外激光器，指输出激光波长处于中红外区( $2.5\sim 25\mu\text{m}$ )的激光器件，代表者为 $\text{CO}_2$ 分子气体激光器( $10.6\mu\text{m}$ )、CO分子气体激光器( $5\sim 6\mu\text{m}$ )；③近红外激光器，指输出激光波长处于近红外区( $0.75\sim 1.6\mu\text{m}$ )的激光器件，代表者为掺钕固体激光器( $1.06\mu\text{m}$ )、CaAs半导体二极管激光器(约 $0.8\mu\text{m}$ )、掺铒光纤激光器( $1.55\mu\text{m}$ )、掺镱光纤激光器( $1.0\mu\text{m}$ )等；④可见激光器，指输出激光波长处于可见光谱区( $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ )的一类激光器件，代表者为红宝石激光器( $694.3\text{nm}$ )、氦氖激光器( $632.8\text{nm}$ )、氩离子激光器( $488.0\text{nm}$ 、 $514.5\text{nm}$ )、氪离子激光器( $476.2\text{nm}$ 、 $520.8\text{nm}$ 、 $568.2\text{nm}$ 、 $647.1\text{nm}$ )以及一些可调谐染料激光器等；⑤近紫外激光器，其输出激光波长范围处于近紫外光谱区( $0.2\sim 0.4\mu\text{m}$ )，代表者为氮分子激光器( $337.1\text{nm}$ )、氟化氙(XeF)准分子激光器( $351.1\text{nm}$ 、 $353.1\text{nm}$ )、氟化氪(KrF)准分子激光器( $249.0\text{nm}$ )以及某些可调谐染料激光器等；⑥真空紫外激光器，其输出激光波长范围处于真空紫外光谱区( $5\sim 200\text{nm}$ )代表者为(H)分子激光器( $164.4\sim 109.8\text{nm}$ )、氙(Xe)准分子激光器( $173.0\text{nm}$ )等；⑦X射线激光器，指输出波长处于X射线谱区( $0.001\sim 5\text{nm}$ )的激光器系统。按产生机理可

分为：①光与组成物质的原子(或离子、分子)内的电子之间的共振相互作用；②光与自由电子的相互作用；③光与物质的非共振相互作用，如非线性光学效应。

研究激光现象的3个层次的理论为速率方程理论、半经典理论和全量子理论。激光的速率方程理论研究激光的光强以及粒子数分布的变化；激光的半经典理论研究激光的基本动力学方程及其应用，包括：激光器的基本特性、光学孤立子、光学双稳态和光学混沌等；激光的全量子理论研究激光的量子统计、激光线宽以及光场的非经典效应，包括光学压缩态等。

有关激光物理学的3个学派是拉姆学派、哈肯学派和拉克斯-路易塞尔学派。拉姆学派的理论基础是密度矩阵和密度算符；哈肯学派的理论基础是朗之万方程；拉克斯-路易塞尔学派的理论基础是福克-普朗克方程。它们都取得了巨大成功，三者本质上是等价的。

本书主要介绍激光器的速率方程理论，用唯象的方法，讨论激光的产生、控制与传输。

学习课程除了掌握基本知识外，更重要的是学习一种科学的思维方法，掌握课程体系结构。本书的设计理念是现象、理论、模拟、新现象四维一体的研究性教学模式，该模式符合人们的认识规律，即从实践中来，到实践中去的认识规律。这里的现象就是已知的一些激光现象、理论是指解释上述激光现象的基本理论、模拟是指用计算机来模拟现有的或未知的实验现象、新现象是指利用现有的理论和计算机模拟所预言的新现象(即创新)，并通过实验进行验证，这是一种创新性教学理念。读者在学习过程中应将三者有机地结合起来，为解决实际问题积累经验。

# 目 录

绪 论	1
第一章 激光与激光器基础	1
1.1 激光器基本结构	1
1.1.1 激光笔	1
1.1.2 激光器基本结构	2
1.2 光的描述( I )——电磁理论	2
1.2.1 电磁波的模式	2
1.2.2 光强与光功率	4
1.2.3 介质的色散与吸收	5
1.2.4 光纤色散	7
1.3 光的描述( II )——早期的光量子理论	9
1.3.1 普朗克的黑体辐射规律	9
1.3.2 光量子的概念	11
1.3.3 波尔理论的基本假设	12
1.3.4 两种描述的统一——光波模式和光子状态相格	12
1.4 光子的相干性	14
1.5 光波在时域与频域中的描述	16
1.6 激光的基本概念	17
1.6.1 自发辐射、受激吸收与受激辐射	17
1.6.2 激光器的基本思想	19
1.6.3 增益系数	20
1.6.4 光的自激振荡	21
1.7 激光的特性	23
第二章 光学谐振腔	27
2.1 引言	27
2.2 光线传播的矩阵表示	28
2.2.1 几何光学的矩阵分析	28
2.2.2 常见光学元件的变换矩阵	29
2.2.3 变换矩阵与成像问题	31



2.3 光学谐振腔及其稳定条件	33
2.3.1 光学谐振腔的分类	33
2.3.2 波导透镜	35
2.3.3 谐振腔的稳定条件	37
2.3.4 谐振腔的稳区图	38
2.4 谐振腔的损耗与 $Q$ 值	39
2.4.1 光学谐振腔的损耗	39
2.4.2 腔内光子寿命	41
2.4.3 腔的 $Q$ 值	41
2.5 高斯光束及其变换	42
2.5.1 基模高斯光束	43
2.5.2 基模高斯光束的描述	45
2.5.3 薄透镜对基模高斯光束的变换	45
2.5.4 均匀介质中的高阶高斯光束	46
2.6 谐振腔设计	48
2.7 谐振腔本征模式的概念	51
2.7.1 谐振腔的本征模式	51
2.7.2 谐振腔的谐振频率	52
2.8 谐振腔的衍射积分理论简介	54
2.9 Fabry-Perot 腔(标准具)	56
2.9.1 Fabry-Perot(FP)腔的理论模型	56
2.9.2 连续波入射时单模光纤 FP 腔的输出特性	59
2.9.3 脉冲激光入射时单模光纤 FP 腔的衰荡输出特性	59
<b>第三章 电磁场与物质相互作用</b>	<b>67</b>
3.1 掺铒光纤的自发辐射谱	67
3.1.1 激光产生的物理基础	67
3.1.2 掺铒光纤的自发辐射谱	68
3.2 谱线加宽的概念	68
3.2.1 原子自发辐射的经典电偶极子模型	68
3.2.2 受激吸收和色散的经典理论基础	69
3.3 谱线加宽对辐射的影响	70
3.4 谱线加宽类型	74
3.4.1 均匀加宽	74
3.4.2 非均匀加宽(多普勒加宽)	77
3.4.3 综合加宽**	78
3.5 泵浦	79
3.5.1 泵浦过程	79



3.5.2	泵浦过程的分类	80
3.5.3	光泵浦系统	81
3.5.4	电泵浦系统	82
3.6	激光器的速率方程理论	83
<b>第四章</b>	<b>连续与脉冲激光器工作特性</b>	<b>87</b>
4.1	连续激光器的实验结果	87
4.2	小信号稳态增益	89
4.3	增益饱和	91
4.4	激光器的振荡阈值条件	96
4.5	均匀加宽情况的模式竞争效应	100
4.6	均匀加宽单纵横激光器的输出功率、最佳透过率	103
4.7	非均匀加宽连续激光器的稳态工作特性	105
4.8	激光的线宽极限	109
4.9	频率牵引效应	111
4.10	脉冲激光器的工作特性	112
4.10.1	多模振荡的速率方程	112
4.10.2	脉冲激光器的工作特性	113
<b>第五章</b>	<b>激光调制技术</b>	<b>121</b>
5.1	引言	121
5.1.1	一个激光调制实例	121
5.1.2	调制的分类	121
5.1.3	光在晶体中的传播——折射率椭球	126
5.2	电光效应	129
5.3	电光调制	131
5.3.1	电光效应对光偏振态的影响	131
5.3.2	电光强度调制	132
5.3.3	电光相位调制	136
5.3.4	电光波导调制器	136
5.3.5	电光调制器的电学性能	138
5.3.6	电光调制器设计要素	139
5.4	声光调制器	139
5.4.1	声光调制器的工作原理	140
5.4.2	声光体调制器	145
5.4.3	声光调制器设计应考虑的问题	147
5.5	其他调制器	149
5.5.1	磁光调制	149

5.5.2 直接调制 .....	150
<b>第六章 调Q技术 .....</b>	<b>152</b>
6.1 调Q实验 .....	152
6.1.1 Nd <sup>3+</sup> :YAG调Q激光器实验 .....	152
6.1.2 掺铽(Yb)调Q光子晶体光纤激光器实验 .....	155
6.2 调Q概念 .....	156
6.3 调Q激光器速率方程(三能级、固体、均匀加宽) .....	159
6.3.1 调Q的速率方程 .....	159
6.3.2 速率方程的求解 .....	160
6.3.3 调Q脉冲的峰值功率 .....	161
6.3.4 调Q脉冲的能量及能量利用率 .....	162
6.3.5 调Q脉冲的时间特性 .....	163
6.4 常见调Q方法 .....	166
<b>第七章 超短脉冲技术 .....</b>	<b>170</b>
7.1 单壁碳纳米管被动锁模光纤激光器实验 .....	170
7.1.1 谐振腔结构 .....	170
7.1.2 实验结果 .....	173
7.2 多模激光器的输出特性 .....	175
7.3 锁模原理(频域描述) .....	176
7.4 锁模方法 .....	179
7.4.1 主动锁模方法 .....	181
7.4.2 被动锁模方法 .....	185
7.5 超短脉冲压缩技术 .....	187
7.6 超短脉冲测量技术 .....	192
7.7 超短脉冲放大技术 .....	195
<b>第八章 激光放大器 .....</b>	<b>197</b>
8.1 引言 .....	197
8.1.1 光放大器的种类 .....	197
8.1.2 光放大器的基本原理 .....	199
8.2 光纤放大器的增益 .....	201
8.3 Er <sup>3+</sup> 的三能级系统速率方程 .....	204
8.3.1 归一化的稳态粒子数差 .....	205
8.3.2 放大器增益 .....	206
8.3.3 1.48 $\mu$ m和0.98 $\mu$ m波长泵浦 .....	209
8.3.4 与时间相关的速率方程的近似解 .....	212

8.4 泵浦结构 .....	213
8.4.1 前向泵浦 vs 后向泵浦 .....	214
8.4.2 双包层光纤泵浦 .....	214
8.5 光纤的最佳长度 .....	216
8.6 当掺铒光纤作为前置放大器时的电噪声 .....	217
8.7 放大器的噪声指数 .....	222
8.8 掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器 * .....	222
8.8.1 掺铒波导放大器 .....	223
8.8.2 铒-镱共掺光波导放大器 .....	224
<b>第九章 模式选择、稳频与倍频技术</b> .....	<b>227</b>
9.1 模式选择技术 .....	227
9.1.1 横模选择技术 .....	227
9.1.2 纵模选择技术 .....	228
9.2 激光器调谐 .....	231
9.3 稳频技术 .....	232
9.3.1 频率抖动 .....	232
9.3.2 稳频技术 .....	232
9.4 激光倍频技术 * .....	235
9.4.1 介质的非线性极化 .....	236
9.4.2 激光倍频技术 .....	236
<b>第十章 常见激光器</b> .....	<b>239</b>
10.1 激光器泵浦效率 .....	239
10.2 固体激光器 .....	240
10.3 气体激光器 .....	244
10.4 其他激光器 .....	248
<b>第十一章 半导体激光器与放大器</b> .....	<b>251</b>
11.1 概述 .....	251
11.2 半导体激光器结构与工作原理 .....	252
11.2.1 半导体物理基础 .....	252
11.2.2 半导体激光器的增益与吸收 .....	256
11.2.3 电子注入激光器的输出功率 .....	260
11.2.4 半导体激光器封装技术 * .....	260
11.3 半导体激光放大器结构与工作原理 .....	262
11.3.1 半导体激光放大器结构与工作原理 .....	262
11.4 半导体激光器/放大器发展动态 .....	263
<b>参考文献</b> .....	<b>267</b>

# 第一章 激光与激光器基础

激光现象是激光器的外部表现，激光器结构是产生激光的内因。本章以激光笔为例介绍常见激光器的基本结构、描述光波的电磁理论与初步量子理论、光子的相干性、激光器基本思想以及激光特性。学习本章之后，读者应知道：

- (1) 常见激光器的基本结构及各组成元件的作用。
- (2) 电磁波的模式、光强与光功率、介质的色散与吸收、光纤色散。
- (3) 普朗克的黑体辐射规律、光量子、波数、光波模式和光子状态的等效性。
- (4) 光子的相干性，光波在时域与频域中的描述。
- (5) 激光器基本思想，光放大与谐振腔，损耗。
- (6) 激光特性有哪些。

## 1.1 激光器基本结构

### 1.1.1 激光笔

在现代社会中，激光的应用无处不在，比如普遍在课堂、演讲等场合广泛使用的无线激光笔，就是一个典型的激光器。无线激光笔由激光器、射频(RF)遥控器和接收器(USB接口)组成。RF遥控器内嵌有无线射频发射器，在使用时只需将接收器插入电脑主机的USB接口，无需安装驱动即可正常工作，使用者只需点击射频遥控器的相关功能键便可操纵接收器。

半导体激光器是激光笔的核心，它由泵浦源又称激励源(电池)、激光物质(半导体材料)、光学谐振腔(由两块相互平行的光学镜组成)以及输入/输出接口系统组成。图1-1为典型红光激光笔的结构示意图。激光管前面的玻璃片是一个98%的平面反射镜，它必须与激光管后面的100%反光镜平行，以便构成光学谐振腔。由于半导体激光器的发散角较大，激光笔的前面需加一个光学镜头来准直半导体激光器发出的激光。绿光激光笔是用1063nm激光倍频得到的，采用的是半导体泵浦固体激光器结构，如图1-2所示。

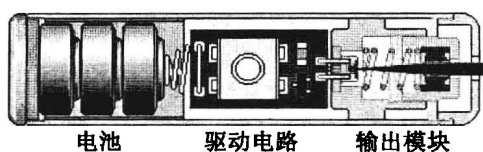


图 1-1 红光激光笔结构示意图



图 1-2 绿光激光笔结构示意图

目前激光笔的颜色有蓝光：457nm，473nm，488nm，绿光：532nm，黄光：561nm与红光等。

### 1.1.2 激光器基本结构

激光笔虽然简单，但已包含了激光器的基本组成，即谐振腔、工作物质(激光物质)、泵浦源以及输入/输出接口。谐振腔的目的是提供反馈与激光模式选择、工作物质是光与物质作用的主体以实现光放大、泵浦源为激光器提供能量。泵浦源可分为电泵浦源与光泵浦源两种。光泵浦激光器的基本结构如图 1-3 所示。

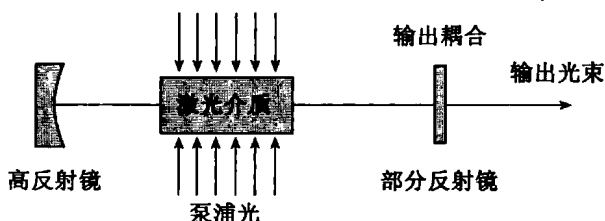


图 1-3 光泵浦激光器结构示意图

### ◎自测练习

- (1) 常见激光器由\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_及输入/输出接口组成。
- (2) 谐振腔的目的是\_\_\_\_\_与\_\_\_\_\_，泵浦源为激光器提供\_\_\_\_\_。
- (3) 激光笔的泵浦源为\_\_\_\_\_。
- (4) 绿光激光笔的结构较复杂，它是用\_\_\_\_\_激光倍频而得到，常采用\_\_\_\_\_结构。

## 1.2 光的描述( I )——电磁理论

光具有波粒二象性。光的波动性用电磁理论来描述，光的粒子性用量子理论来描述。光的电磁理论认为光是一种电磁波，本节介绍谐振腔内的光波模式、光波强度与功率、介质的色散与吸收以及光纤色散等基本概念。

### 1.2.1 电磁波的模式

单色平面波是麦克斯韦方程的一个特解，可表示为

$$E(\mathbf{r}, t) = E_0 \exp(i2\pi\nu t - i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (1-1)$$

式中， $E_0$  为光波电场的振幅矢量； $\nu$  为单色平面波的频率， $\mathbf{k} \left( k = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{s}; \vec{s} \text{ 为光传播方} \right.$

向上的单位矢量)为波矢;  $r$  为空间位置坐标矢量。麦克斯韦方程的通解可表示为一系列单色平面波的线性叠加。

在自由空间, 具有任意波矢的单色平面波都可以存在。但在封闭谐振腔(一个有边界条件限制的空间, 见图 1-4)内, 只能存在一些分离的、具有特定波矢的单色平面驻波。这种能够存在于腔内的驻波称为电磁波的模式或称光波模式, 简称模式。

本书中, 我们关心的是谐振腔(长方体空腔)内的模式数。腔内光波模式可用图 1-5 所示的波矢空间来描述。每个模式对应波矢空间的一点。波矢  $k(m, n, q)$  的三个分量满足条件:

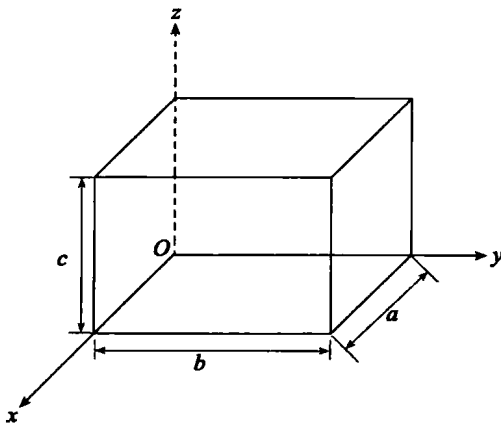


图 1-4 封闭长方体谐振腔结构示意图

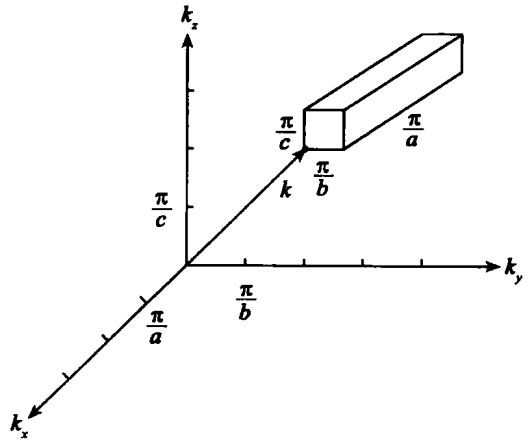


图 1-5 波矢( $k$ )空间

$$k_x = m \cdot \frac{\pi}{a}, \quad k_y = n \cdot \frac{\pi}{b}, \quad k_z = q \cdot \frac{\pi}{c} \quad (1-2)$$

每一组  $(m, n, q)$  代表腔内一个模式(包含两个偏振)。

每一模式在三个坐标轴方向与相邻模式的间隔为

$$\Delta k_x = \frac{\pi}{a}, \quad \Delta k_y = \frac{\pi}{b}, \quad \Delta k_z = \frac{\pi}{c} \quad (1-3)$$

因此, 每个模式在波矢空间所占体积为

$$\Delta k_x \Delta k_y \Delta k_z = \frac{\pi^3}{abc} = \frac{\pi^3}{V} \quad (1-4)$$

式中,  $V = abc$ 。

在波矢空间, 波矢大小处于  $k \sim k + dk$  区间的体积为  $\frac{1}{8} \cdot 4\pi k^2 dk$ , 此体积内的模式数为  $\frac{1}{8} \cdot 4\pi k^2 dk / (\Delta k_x \Delta k_y \Delta k_z)$ 。又因  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\nu}{c}$ ,  $dk = \frac{2\pi d\nu}{c}$ , 可得频率在  $\nu \sim \nu + d\nu$  区间的模式数为  $\frac{4\pi\nu^2}{c^3} V d\nu$ , 考虑到同一波矢有两种不同偏振, 上述模式数应乘 2。在体积

为  $V$  的空腔内, 处在频率  $\nu$  附近  $d\nu$  频带内的模式数为

$$N_m = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} V d\nu \quad (1-5)$$

频率  $\nu$  附近单位体积、单位频带内的模式数(又称单色模密度)为

$$n_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \quad (1-6)$$

式中,  $c$  为真空中的光速。

**例 1.1** 求封闭腔在波长为 10cm、500nm、1500nm 处的单色模密度。

**解:**  $\lambda = 10\text{cm}$ ,  $\nu = c/\lambda = 3 \times 10^9 \text{Hz}$ ,  $n_\nu = 8\pi\nu^2/c^3 = 8.37 \times 10^{-6} / (\text{Hz} \cdot \text{m}^3)$

$\lambda = 500\text{nm}$ ,  $\nu = c/\lambda = 6 \times 10^{14} \text{Hz}$ ,  $n_\nu = 8\pi\nu^2/c^3 = 3.35 \times 10^5 / (\text{Hz} \cdot \text{m}^3)$

$\lambda = 1500\text{nm}$ ,  $\nu = c/\lambda = 2 \times 10^{14} \text{Hz}$ ,  $n_\nu = 8\pi\nu^2/c^3 = 3.7 \times 10^4 / (\text{Hz} \cdot \text{m}^3)$

从上述计算结果可知: 在微波频段, 闭腔内的单色模密度很小, 每个模式的能量较大, 有利于模式起振; 而在光频段, 封闭腔内的单色模密度很大, 每个模式的能量较小, 不利于振荡。为了获得光频振荡(激光), 谐振腔不能用封闭腔, 需采用其他方法。

### 1.2.2 光强与光功率

由电磁学理论可知: 电磁场的能量可用能流密度来描述。能流密度是指单位时间内通过垂直于传播方向单位面积的能量, 它是一个矢量(坡印廷矢量), 其方向表示电磁场能量传输方向, 可用(1-7)式描述。

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (1-7)$$

也可用电磁波的能量密度  $\rho$  和波的速度  $v$  表示为

$$S = \rho v = \frac{1}{2} (\epsilon E^2 + \mu H^2) v \quad (1-8)$$

光强, 即光的强度, 是光波场平均能流密度的绝对值, 单位是瓦特/米<sup>2</sup>( $\text{W}/\text{m}^2$ ), 即

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle = \langle |\vec{E} \times \vec{H}| \rangle \quad (1-9)$$

对于各向同性无源介质中的简谐平面波, 有

$$I = \frac{n}{2\eta} E_0^2 \quad (1-10)$$

式中,  $n$  为介质的折射率,  $n = \sqrt{\epsilon\mu_r}$ , 对于非铁磁介质,  $\mu_r \approx 1$ ,  $n \approx \sqrt{\epsilon_r}$ ,  $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377\Omega$ ,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$ ;  $E_0$  为光场振幅。光波的电场强度矢量又称光矢量。

设垂直于传播方向光束的面积为  $A$ , 则其功率为

$$P = IA \quad (1-11)$$

功率的单位为瓦特(W)。在光电子技术中, 常用 dBm 作为光功率单位, 任意功率  $P$  转换为 dBm 单位的变换式为:  $P = 10\lg(P/1\text{mW})$  (dBm)。例如,  $1\text{mW} = 0\text{dBm}$ 。

**例 1.2** 一台 3kW 的  $\text{CO}_2$  激光器发出的光束被聚焦成直径为  $10\mu\text{m}$  的光斑, 求在焦点处的光强以及光场的振幅值(假设空气的折射率为 1, 不计光束的损失)。

**解:** 光强



$$I = \frac{P}{A} = \frac{3000}{\pi \times (5 \times 10^{-6})^2} = 3.82 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$$

由(1-10)式有

$$E_0 = \sqrt{2I \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} = \sqrt{2 \times 3.82 \times 10^{13} \times \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}}}} = 1.70 \times 10^8 \text{ V/m}$$

### 1.2.3 介质的色散与吸收

#### 1. 经典的电偶极子模型

当光与介质发生相互作用时，在外场的作用下，正负电荷中心分离，介质被极化，其中的电子与离子会形成电偶极子。将电偶极子作为弹性振子处理，即弹性系数  $k$  为常数，振子的固有频率为  $\omega_0$ 。介质中的电偶极子在外界光场  $E$  的作用下，将会作受迫振动，并辐射出电磁波。这就是经典的受激原子发光的模型，因为最初由洛伦兹提出，故称为洛伦兹模型。

假设由原子核与电子组成的系统，坐标原点在核上，电子偏离平衡位置的位移用  $x$  表示，按照电磁学理论，系统的运动方程在线性近似下为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\frac{eE}{m} \quad (1-12)$$

式中， $\gamma$  为辐射阻尼常数； $m$  与  $e$  分别为电子的质量与电荷。设外电场的频率为  $\omega$ ，即  $E = E_0 e^{i\omega t}$ ，方程(1-12)的特解可写为

$$x(t) = x_0 e^{i\omega t} \quad (1-13)$$

将式(1-13)代入方程(1-12)，可得

$$x = -\frac{eE_0}{m} \times \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i\omega\gamma} e^{i\omega t} \quad (1-14)$$

#### 2. 色散与吸收

首先讨论最简单的情形，即假设介质中的束缚电子只有单一的固有频率。此时，在入射电磁场的作用下，带电粒子发生位移，导致极化，极化强度为

$$\vec{P} = -NZex \quad (1-15)$$

式中， $N$  为原子的数密度； $Z$  为每个原子中参与形成电偶极子的核外电子数。极化率为

$$\chi = \frac{\vec{P}}{\epsilon_0 \vec{E}} \quad (1-16)$$

将式(1-14)、式(1-15)代入式(1-16)，可得

$$\chi = \frac{ZNe^2}{m\epsilon_0} \times \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i\omega\gamma} \quad (1-17)$$

令  $\chi = \chi' + i\chi''$ ，考虑共振相互作用(即  $\omega \approx \omega_0$ )情形，电极化率的实部与虚部分别为

$$\chi' = \text{Re}(\chi) = \frac{ZNe^2}{2m\epsilon_0\omega_0} \times \frac{\omega - \omega_0}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \quad (1-18)$$

$$\chi'' = \text{Im}(\chi) = -\frac{ZNe^2}{2m\epsilon_0\omega_0} \times \frac{\gamma/2}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \quad (1-19)$$

式(1-19)称为洛伦兹函数。可见,极化率的实部与虚部都与外加电场的频率有关。由相对介电常数的定义,有

$$\epsilon_r = 1 + \chi = 1 + \chi' + i\chi'' \quad (1-20)$$

因为  $\chi \ll 1$ , 式(1-20)可近似改写成

$$\sqrt{\epsilon_r} = 1 + \frac{\chi}{2} = 1 + \frac{\chi'}{2} + i\frac{\chi''}{2} \quad (1-21)$$

介质的复折射率为

$$\tilde{n} = n + i\kappa$$

式中,  $n$  为介质的折射率;  $\kappa$  为介质的吸收系数(或消光系数)。由折射率与介电常数的关系  $\tilde{n} = \sqrt{\epsilon_r}$ , 得到

$$n = 1 + \frac{\chi'}{2} \quad (1-22)$$

$$\kappa = \frac{\chi''}{2} \quad (1-23)$$

可见,介质的折射率是外加电场频率的函数,即不同频率的光有不同的折射率,这就是色散现象。令  $Z=1$ ,  $\frac{ZNe^2}{2m\epsilon_0\omega_0} = \frac{1}{4}$ ,  $\gamma = \frac{\omega_0}{20}$ , 图 1-6 给出极化率的实部与虚部随频率的变化曲线,图 1-7 给出  $n$  和  $\kappa$  随频率的变化曲线。从图 1-6 中可以看出,当外场频率接近振子的固有频率,即共振时,  $\chi''$  才有较大值。 $\chi''$  和  $\kappa$  都具有洛伦兹线型。由图 1-7 可见,介质的折射率可能大于 1,也可能小于 1,甚至可能是负值。

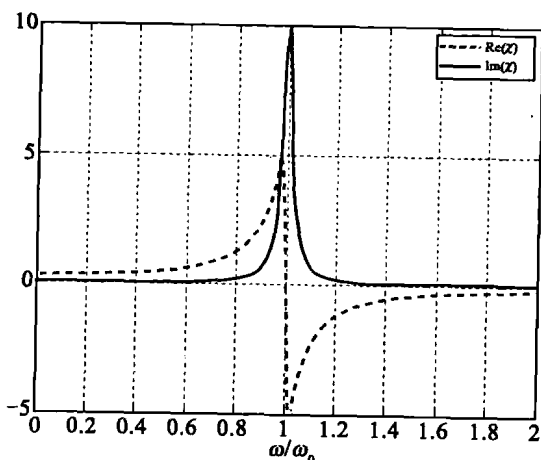


图 1-6 极化率的实部与虚部随频率的变化曲线