

普通高等教育“九五”国家级重点教材



普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 激光技术

蓝信钜 等 编著



激光技术

科学出版社



科学出版社

## 内 容 简 介

本书系统介绍了各种主要激光技术的基本原理与实施方法,内容包括激光调制技术、调Q技术、超短脉冲技术、放大技术、模式选择技术、稳频技术、非线性光学技术以及激光传输技术,对各种激光技术的新进展也作了简要介绍。本书着重物理概念和基本原理的论述,并给出了一些实例,论述深入浅出,便于自学。

本书可作为高等院校光电子技术、光信息技术、光电仪器、应用物理等专业本科生的教材,也可供高校相关专业的师生及从事光电子技术的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

激光技术/蓝信钜等编著.-北京:科学出版社,2000  
ISBN 7-03-008130-7

I. 激… II. 蓝… III. 激光技术 IV. TN24

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第71309号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2000年8月第一版 开本:787×1092 1/16  
2000年8月第一次印刷 印张:20 3/4  
印数:1—2 500 字数:468 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新伟>)

## 出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社和各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办协商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大,有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

原电子工业部教材办公室

# 前 言

本教材系按'95全国电子信息类专业教材编审出版规划,由全国高校光电子技术专业教学指导委员会审定,推荐出版,并由国家教育委员会教高[1997]16号文件,批准为“九五”普通高等教育国家级重点教材。

本教材由华中理工大学蓝信钜教授主编,北京理工大学魏光辉教授主审,辛建国教授担任责任编辑。

本课程的参考学时数为70学时。全书共分5个部分(八章)。第一部分(第一章),激光调制与偏转技术,主要讨论电光与声光调制等的基本原理和技术;第二部分(第二至第四章),激光调 $Q$ 、超短脉冲和放大技术,主要讨论提高脉冲的功率和能量的基本理论和实现方法;第三部分(第五至第六章),激光选模、稳频技术,着重讨论激光器实现单模(横、纵)输出和稳定振荡频率的物理原理和实现方法;第四部分(第七章),非线性光学技术,首先阐述非线性光学的物理概念,然后讨论以倍频技术为重点的非线性光学技术的基本原理和实现方法;第五部分(第八章),激光传输技术,着重讨论光纤传输技术,简要介绍大气和水下传输技术。

本书是按照全国高校光电子技术专业教学指导委员会确定的编写大纲编写的专业基础课教材,凡具有物理光学和激光原理基础知识的读者可以顺利阅读。本书适于高等院校光电子技术、光信息技术、光电仪器、应用物理等专业本科生作为教科书;也可供高校相关专业的师生及从事光电子技术的科技人员参考。本书各章的内容基本上是相对独立的,因此在阅读时有很大的灵活性,所以各校可从教学 and 实际需要出发,灵活选择讲授的内容。另外,本书虽以介绍基本原理为主,但“激光技术”是实践性较强的一门课程,所以有些章节仍编入了一定篇幅的技术方法和实例,以求能更好地做到理论与实际相结合。每章后面附有少量习题及思考题,供学生练习选用。

本书第一、二、四、五、六章由华中理工大学蓝信钜执笔,第三章由天津大学姚建铨、宁继平执笔,第七章由天津大学李昱执笔,第八章由西安电子科技大学安毓英执笔。蓝信钜统编全稿,华中理工大学刘耀兰对全书做了校订工作。在本书编写过程中,许多兄弟院校的老教师们提出了宝贵意见,并参阅了一些编著者的著作和文章,在参考文献中未能一一列出,在此一并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

1999年6月

# 目 录

绪 言	1
第一章 激光调制与偏转技术	3
1.1 调制的基本概念	3
一、振幅调制	3
二、频率调制和相位调制	4
三、强度调制	5
四、脉冲调制	6
五、脉冲编码调制	7
1.2 电光调制	7
一、电光调制的物理基础	8
二、电光强度调制	14
三、电光相位调制	18
四、电光调制器的电学性能	18
五、电光波导调制器	21
六、电光偏转	25
七、设计电光调制器应考虑的问题	28
1.3 声光调制	29
一、声光调制的物理基础	29
二、声光互作用的两种类型	31
三、声光体调制器	40
四、声光波导调制器	44
五、声光偏转	48
六、声光调制器设计应考虑的事项	50
1.4 磁光调制	55
一、磁光调制的物理基础	55
二、磁光体调制器	56
三、磁光波导调制器	57
1.5 直接调制	58
一、半导体激光器(LD)直接调制的原理	58
二、半导体发光二极管(LED)的调制特性	59
三、半导体光源的模拟调制	59
四、半导体光源的 PCM 的数字调制	60
1.6 空间光调制器	61
一、泡克耳斯读出光调制器	61

二、液晶空间光调制器 .....	63
三、其他类型的空间光调制器 .....	64
习题与思考题 .....	66
参考文献 .....	67
<b>第二章 调Q(Q开关)技术 .....</b>	<b>68</b>
2.1 概述 .....	68
一、脉冲固体激光器的输出特性 .....	68
二、调Q的基本原理 .....	69
三、实现调Q对激光器的基本要求 .....	71
2.2 调Q激光器的基本理论 .....	71
一、调Q的速率方程 .....	72
二、速率方程的求解 .....	72
2.3 电光调Q .....	78
一、带偏振器的电光调Q器件 .....	78
二、单块双45°电光调Q器件 .....	79
三、脉冲透射式(PTM)调Q .....	82
四、Q调制技术的其他功能 .....	84
2.4 设计电光调Q激光器应考虑的问题 .....	85
一、调制晶体材料的选择 .....	85
二、调制晶体的电极结构 .....	86
三、对激光工作物质的要求 .....	86
四、对光泵浦灯的要求 .....	87
五、对Q开关控制电路的要求 .....	87
2.5 声光调Q .....	87
一、声光调Q的基本原理 .....	87
二、声光调Q器件的结构及设计 .....	88
三、声光调Q动态实验及输出特性 .....	91
四、声光腔倒空激光器 .....	94
2.6 被动式可饱和吸收调Q .....	95
一、可饱和吸收染料的调Q原理 .....	95
二、饱和吸收的速率方程 .....	96
三、染料调Q激光器及其输出特性 .....	97
四、LiF:F <sub>2</sub> <sup>-</sup> 色心晶体(可饱和吸收)调Q .....	99
2.7 转镜调Q简介 .....	101
习题与思考题 .....	103
参考文献 .....	103
<b>第三章 超短脉冲技术 .....</b>	<b>104</b>
3.1 概述 .....	104
一、多模激光器的输出特性 .....	104

二、锁模的基本原理 .....	106
三、锁模的方法 .....	108
3.2 主动锁模 .....	109
一、振幅调制锁模 .....	109
二、相位调制锁模 .....	111
三、主动锁模激光器的结构及其设计要点 .....	112
四、无失谐时的锁模脉宽及稳定锁模系统 .....	113
3.3 被动锁模 .....	115
一、固体激光器的被动锁模 .....	115
二、染料激光器的被动锁模 .....	118
3.4 同步泵浦锁模 .....	121
一、同步泵浦锁模原理 .....	121
二、同步泵浦锁模激光器的结构 .....	123
3.5 自锁模 .....	124
一、自锁模机理 .....	125
二、超短脉冲的压缩技术 .....	126
3.6 单一脉冲的选取及超短脉冲测量技术 .....	131
一、单一脉冲的选取 .....	131
二、超短脉冲的测量技术 .....	133
3.7 几种典型的锁模激光器 .....	138
一、掺钛蓝宝石自锁模激光器 .....	138
二、半导体锁模激光器 .....	140
三、掺铒光纤锁模激光器 .....	141
习题与思考题 .....	142
参考文献 .....	143
<b>第四章 激光放大技术</b> .....	<b>145</b>
4.1 概述 .....	145
4.2 脉冲放大器的理论 .....	146
一、脉冲放大器的速率方程 .....	146
二、速率方程的求解 .....	147
三、对矩形脉冲放大的分析 .....	149
四、其他脉冲波形的放大 .....	152
五、脉冲信号在有损耗介质中的放大 .....	153
4.3 长脉冲激光放大的稳态理论 .....	155
一、稳态的速率方程 .....	155
二、谱线轮廓对增益系数的影响 .....	156
4.4 设计激光放大器应考虑的几个问题 .....	157
一、放大器工作物质的选择 .....	158
二、放大器工作物质端面反馈的消除 .....	158

三、级间去耦问题 .....	159
四、级间孔径匹配问题 .....	160
五、各级泵浦时间的匹配 .....	161
六、不均匀性影响的消除 .....	161
4.5 再生式放大技术 .....	163
一、外注入再生放大 .....	163
二、注入锁定技术 .....	164
三、自注入放大技术 .....	165
4.6 半导体激光放大器与光纤放大器 .....	166
一、半导体激光放大器 .....	166
二、光纤拉曼放大器 .....	167
三、掺稀土元素(钕)光纤放大器 .....	168
四、光纤放大器的应用 .....	169
习题与思考题.....	169
参考文献.....	169
<b>第五章 模式选择技术</b> .....	<b>171</b>
5.1 概述 .....	171
5.2 横模选择技术 .....	172
一、横模选择原理 .....	172
二、横模选择的方法 .....	174
5.3 纵模选择技术 .....	181
一、纵模选择原理 .....	181
二、纵模选择的方法 .....	182
5.4 模式测量方法 .....	188
一、直接观测法 .....	188
二、光点扫描法 .....	189
三、扫描干涉仪法 .....	190
四、F-P 照相法 .....	191
习题与思考题.....	193
参考文献.....	193
<b>第六章 稳频技术</b> .....	<b>194</b>
6.1 概述 .....	194
一、频率的稳定性和复现性 .....	194
二、影响激光频率稳定的因素 .....	195
三、激光器主动稳频的方法 .....	197
四、对参考标准频率(参考谱线)的要求 .....	199
6.2 兰姆凹陷稳频 .....	200
一、兰姆凹陷 .....	200
二、兰姆凹陷稳频原理 .....	200



三、应用兰姆凹陷稳频时应注意的问题 .....	201
6.3 塞曼效应稳频 .....	203
一、塞曼效应 .....	203
二、塞曼效应双频稳频激光器 .....	203
三、塞曼效应吸收稳频 .....	206
6.4 饱和吸收稳频(反兰姆凹陷稳频) .....	207
6.5 其他稳频激光器 .....	209
一、CO <sub>2</sub> 激光器的稳频 .....	209
二、Ar <sup>+</sup> 激光器(用 <sup>127</sup> I <sub>2</sub> 饱和吸收)稳频 .....	210
三、脉冲激光器的稳频 .....	211
四、半导体激光器的稳频 .....	212
6.6 频率稳定性及复现性的测量 .....	214
一、拍频的原理 .....	214
二、拍频技术测量的频率稳定性和复现性 .....	215
习题与思考题 .....	217
参考文献 .....	218
<b>第七章 非线性光学技术</b> .....	219
7.1 概述 .....	219
一、非线性光学的概念 .....	219
二、非线性电极化率 .....	219
7.2 电磁波在非线性质内的传播 .....	224
一、电磁波在非线性质内的传播方程 .....	224
二、非线性相互作用的基本方程——耦合波方程 .....	224
三、门雷-罗威(Manley-Rove)关系 .....	226
7.3 光倍频及光混频技术 .....	226
一、光倍频及光混频的稳态小信号解 .....	227
二、相位匹配技术 .....	228
三、倍频过程中的几个重要问题 .....	231
四、典型倍频激光器 .....	236
7.4 光参量振荡技术 .....	237
一、光参量放大和振荡原理 .....	238
二、光参量振荡器的增益 .....	238
三、光参量振荡器的阈值 .....	240
四、光参量振荡器的频率调谐技术 .....	241
五、光参量振荡实验技术 .....	243
7.5 非线性光学材料 .....	245
一、KDP类晶体 .....	246
二、铌酸锂(LiNbO <sub>3</sub> )和碘酸锂(LiIO <sub>3</sub> )晶体 .....	246
三、铌酸钡钠(Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>2</sub> O <sub>15</sub> )和磷酸氧钛钾(KTiOPO <sub>4</sub> )晶体 .....	252

四、 $\beta$ -偏硼酸钡( $\beta$ -BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )晶体 .....	252
五、半导体材料 .....	252
7.6 受激拉曼散射技术 .....	252
一、拉曼散射与受激拉曼散射 .....	252
二、受激拉曼散射的增益和阈值 .....	254
三、受激拉曼散射频谱特性 .....	256
四、受激拉曼散射实验技术 .....	257
7.7 光学双稳态技术 .....	259
一、光学双稳态的物理机制 .....	260
二、光学双稳态实验技术 .....	261
三、光学双稳态器件及应用 .....	261
习题与思考题 .....	263
参考文献 .....	264
<b>第八章 激光传输技术</b> .....	<b>265</b>
8.1 光纤概述 .....	265
一、光纤波导结构及弱导特性 .....	265
二、光纤制造工艺简介 .....	266
三、光缆 .....	268
四、光纤的传输特性 .....	269
8.2 光纤的射线特性分析 .....	270
一、阶跃光纤 .....	270
二、渐变折射率光纤 .....	274
8.3 光纤衰减和色散特性 .....	281
一、光纤的衰减 .....	281
二、光纤色散、带宽和脉冲展宽参量间的关系 .....	283
三、光纤的色散特性 .....	284
8.4 单模光纤的偏振和双折射 .....	290
一、单模光纤的偏振特性 .....	290
二、单模光纤的双折射 .....	292
三、偏振型单模光纤 .....	292
8.5 光纤中的非线性效应——光学孤子 .....	294
一、光学孤子的物理概念 .....	294
二、色散介质中的双曲方程 .....	295
三、非线性薛定谔方程 .....	296
8.6 光纤连接耦合技术 .....	297
一、光纤的处理与连接 .....	297
二、光纤的光耦合 .....	298
三、光纤的分光与合光装置 .....	302
8.7 激光大气和水下传输 .....	302

一、大气衰减 .....	303
二、大气湍流及非线性传播效应 .....	308
三、激光水下传输特性 .....	313
<b>习题与思考题</b> .....	316
<b>参考文献</b> .....	316

## 绪 言

激光是 20 世纪的重大发明之一,它具有高亮度、良好的单色性和相干性及方向性,所以激光应用已遍及工业、军事、通信、医学和科学研究等诸多领域。然而,从一台普通激光器输出的激光,往往不一定能满足某些应用的要求。因此,为了能适应各方面的需要,多年来在研制各种激光器和开发各种应用的同时,还不断研究和发展的许多旨在改善和提高激光性能的激光单元技术。本书对目前应用比较广泛,而且具有基础性和典型性的几种重要的激光技术予以介绍。

一台普通的脉冲固体激光器,输出的光脉冲宽度是几百微秒,甚至毫秒量级,峰值功率只有几十千瓦级,显然满足不了诸如激光精密测距、激光雷达、高速摄影、高分辨率光谱学研究等的要求,正是在这些要求的推动下,人们研究和发展的激光调 Q 技术和锁模技术。早在 1960 年激光问世不久,1961 年就有科学家提出了调 Q 的概念,即设想采用一种方法能把全部光辐射能压缩到极窄的脉冲中发射;1962 年 Hellwarth 和 McClung 制成了第一台调 Q 激光器,输出峰值功率为 600kW,脉冲宽度为  $10^{-7}$ s 量级;随后几年发展得非常快,出现了多种调 Q 方法(如电光调 Q、声光调 Q、可饱和吸收调 Q 等),输出功率几乎呈直线上升,脉宽压缩也取得了很大进展;到 80 年代,调 Q 技术产生脉宽为纳秒(ns)量级、峰值功率为吉瓦(GW)量级的巨脉冲已并非困难。调 Q 技术的出现,是激光发展史上的一个重大突破。它不仅大大推动了上述一些应用技术的发展,而且成为科学研究的有力工具,但调 Q 技术压缩脉宽因受产生机制的制约,很难再进一步压窄。1964 年科学家们又研究提出并实现了压缩脉宽、提高功率的新机制——锁模技术,由于它能使脉冲的持续时间缩短到皮秒(ps,  $10^{-12}$ s)量级,所以也称为超短脉冲技术,从 60 年代到 70 年代,超短脉冲技术(包括主动锁模、被动锁模、同步泵浦锁模等及相应的测量技术)得到了迅速的发展;到 80 年代初,Fork 等人又提出了碰撞锁模的理论,而且实现了碰撞锁模,得到了稳定的 90fs 光脉冲序列。90 年代自锁模技术的出现,在钛蓝宝石自锁模激光器中得到了 8.5fs 的超短光脉冲序列。锁模技术能产生脉宽为飞秒(fs,  $10^{-15}$ s)、峰值功率为太瓦(TW,  $10^{12}$ W)以上的超短脉冲,为物理学、化学、生物学以及光谱学等学科对微观世界和超快过程的研究提供了重要手段。

另外,激光的某些应用领域要求激光束要具有很高的光束质量(即方向性和单色性极好),但一般激光器的工作状态往往是多模的(含有高阶横模和纵模),因此发散度比较大,单色性也不理想,显然满足不了诸如精密干涉计量、全息照相、精细加工等应用的要求。因此,人们为了改善其光束质量,研究和发展的选模技术和稳频技术。选模技术就是从激光振荡的模式中选出单模(基横模和单纵模)。多年来人们研究并实现了多种选模方法,选出基横模大大改善了光束的发散度;选出单纵模,则可以获得单频激光输出,从而改善激光的单色性。但是,由于激光器受到外界各种干扰的影响,实际上激光频率的稳定度比较差,即频率变化是一个随机起伏量,因而就难以付诸精密计量等方面的应用。多年来科学家们不断在研究和寻找各种提高激光器频率稳定性和有实用价值的稳频技术。稳频技术的实

质就是保持谐振腔光程长度的稳定性,即利用一种电子伺服控制系统把激光振荡频率始终锁定在标准频率上。在 60 年代中期,是选择原子谱线的中心频率作为参考标准,如 1965 年利用兰姆凹陷作为参考频率对 He-Ne 激光器进行稳频,其频率稳定度为  $10^{-9}$ ,但复现性仅有  $10^{-7}$ 。1966 年以后又发展了利用外界参考频率作为标准进行稳频,如饱和吸收稳频法,即利用一些分子气体的吸收线作为参考频率,这样就避免了放电扰动和压力展宽等影响,因而有利于提高频率稳定度。如 1969 年 Barger 和 Hell 利用  $\text{CH}_4$  分子稳频 He-Ne 激光器的  $3.39\mu\text{m}$ ,其频率稳定度达到  $10^{-14}$ ,复现性达到  $3 \times 10^{-12}$ ;另外,碘也是最常用的吸收分子,如  $^{127}\text{I}_2$  和  $^{129}\text{I}_2$  稳频 He-Ne 激光器的  $633\mu\text{m}$ ,也获得了很高的稳定性和复现性。近几年还陆续出现了其他激光器( $\text{Ar}^+$ ,  $\text{CO}_2$  激光器等)的稳频技术。采用激光选模技术和稳频技术能使我们获得频率稳定性极好、发散角极小的优质激光束,不仅可以满足诸如精密计量、全息术等应用的要求,而且随着先进的稳频技术的出现,已实现长度与时间频率基准的统一,即在国际计量标准中,将激光波长作为“米”定义的国际标准,而且也可以作为时间频率“秒”的基准。无疑,这对物理学各个领域将会产生极深刻的影响。

激光调制技术为光通信、光信息处理等应用提供了极好的信息载波源,随着各种调制技术的发展,特别是近十几年来,国内外对空间光调制器的研究和发展,大大推动了光通信、实时光信息处理、光计算、光存储等应用技术的迅猛发展。

在激光出现之前,光与物质的相互作用呈现线性关系,而从激光出现之后,特别是利用调 Q 和锁模技术能使激光在空间和时间上高度集中,因而使激光的单色亮度比普通激光提高了五至九个数量级,像这样高亮度的激光与物质相互作用,已引发出许多很有意义的新现象、新效应——非线性光学效应,并伴随着产生若干非线性光学技术。在 1961 年 Franken 等人将红宝石激光束聚集到石英晶体上,观察到了红宝石激光的二次谐波辐射,这就是倍频现象;到 1962 年 Kleinman 等人利用晶体的双折射效应实现了相位匹配的倍频;随后几年陆续出现了诸如光混频(和频、差频)、光参量振荡、受激散射、相位共轭、光学双稳态等等。非线性光学技术扩展了激光波段,提供了研究物质微观性质的手段,扩大了激光的应用范围。

激光技术涉及多种学科的理论知识,而且种类繁多,发展日新月异,但从基本原理着眼,它们大都是基于利用光和各种物质相互作用所产生的物理效应(主要有“电光效应”、“声光效应”、“磁光效应”、“非线性光学效应”等)和采用不同的运用形式来控制激光某参数(能量、功率、偏振、模式、线宽、脉宽等)而实现的。尽管各种激光技术器件功能各异,且品种不断增多,但“万变不离其宗”,其基本物理规律是不变的,因此,只要很好地掌握了这些规律和知识,就能“举一反三”地运用这些基本理论知识去解决众多的技术问题。激光技术到 80 年代已发展到成熟阶段,其内容(包括基本理论和基本技术)也日益丰富,已经成为光电子技术学科建设的重要组成部分,因此,它是从事光电子技术及在诸方面应用的科技工作者必须掌握的基本知识。

# 第一章 激光调制与偏转技术

## 1.1 调制的基本概念

激光是一种光频电磁波,具有良好的相干性,与无线电波相似,可以用来作为传递信息的载波。激光具有很高的频率(约  $10^{13} \sim 10^{15}$  Hz),可供利用的频带很宽,故传递信息的容量大。再有,光具有极短的波长和极快的传递速度,加上光波的独立传播特性,可以借助光学系统,把一个面上的二维信息以很高的分辨率瞬间传递到另一个面上,为二维并行光学信息处理提供条件。所以激光是传递信息(包括语言、文字、图像、符号等)的一种很理想的光源。

要用激光作为信息的载体,就必须解决如何将信息加到激光上去的问题,例如激光电话,就需要将语言信息加载于激光,由激光“携带”信息通过一定的传输通道(大气、光纤等)送到接收器,再由光接收器鉴别并还原成原来的信息,从而完成通话的目的。这种将信息加载于激光的过程称之为调制,完成这一过程的装置称为调制器。其中,激光称为载波;起控制作用的低频信息称为调制信号。

激光光波的电场强度是

$$e_c(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.1-1)$$

式中,  $A_c$  为振幅,  $\omega_c$  为角频率,  $\varphi_c$  为相位角。既然激光具有振幅、频率、相位、强度、偏振等参量,如果能够利用某种物理方法改变光波的某一参量,使其按调制信号的规律变化,那么,激光就受到了信号的调制,达到“运载”信息的目的。实现激光调制的方法很多,根据调制器和激光器的相对关系,可以分为内调制和外调制两种。内调制是指加载调制信号是在激光振荡过程中进行的,即以调制信号去改变激光器的振荡参数,从而改变激光输出特性以实现调制。例如,注入式半导体激光器,是用调制信号直接改变它的泵浦驱动电流,使输出的激光强度受到调制(这种方式也称为直接调制)。还有一种内调制方式是在激光谐振腔内放置调制元件,用调制信号控制元件的物理特性的变化,以改变谐振腔的参数,从而改变激光器输出特性,如第二章介绍的调Q技术实际上就属于这种调制。内调制目前主要用在光通信的注入式半导体光源中。外调制是指激光形成之后,在激光器外的光路上放置调制器,用调制信号改变调制器的物理特性,当激光通过调制器时,就会使光波的某参量受到调制。由于外调制的调整方便,而且对激光器没有影响,另外,外调制方式不受半导体器件工作速率的限制,故它比内调制的调制速率高(约高一个数量级),调制带宽要宽得多,所以在未来的高速率、大容量的光通信及光信息处理应用中,更受人们的重视。

激光调制按其调制的性质可以分为调幅、调频、调相及强度调制等。下面简要介绍这几种调制的概念。

### 一、振幅调制

振幅调制就是载波的振幅随着调制信号的规律而变化的振荡,简称调幅。设激光载波

的电场强度如(1.1-1)式所示,如果调制信号是一个时间的余弦函数,即

$$a(t) = A_m \cos \omega_m t \quad (1.1-2)$$

式中,  $A_m$  是调制信号的振幅,  $\omega_m$  是调制信号的角频率。当进行激光振幅调制之后, (1.1-1)式中的激光振幅  $A_c$  不再是常量,而是与调制信号成正比。其调幅波的表达式为

$$e(t) = A_c [1 + m_a \cos \omega_m t] \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.1-3)$$

利用三角函数公式将(1.1-3)式展开,即得到调幅波的频谱公式,即

$$e(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + \frac{m_a}{2} A_c \cos[(\omega_c + \omega_m)t + \varphi_c] + \frac{m_a}{2} A_c \cos[(\omega_c - \omega_m)t + \varphi_c] \quad (1.1-4)$$

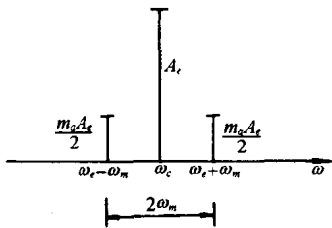


图 1.1-1 调幅波频谱

式中,  $m_a = A_m / A_c$ , 称为调幅系数。由上式可知,调幅波的频谱是由三个频率成分组成的,其中,第一项是载频分量,第二、三项是因调制而产生的新分量,称为边频分量(见图 1.1-1)。上述分析是单频余弦信号调制的情况。如果调制信号是一个复杂的周期性信号,则调幅波的频谱将由载频分量和两个边频带所组成。

## 二、频率调制和相位调制

调频或调相就是光载波的频率或相位随着调制信号的变化规律而改变的振荡。因为这两种调制波都表现为总相角  $\psi(t)$  的变化,因此统称为角度调制。

对频率调制来说,就是(1.1-1)式中的角频率  $\omega_c$  不再是常数,而是随调制信号而变化,即

$$\omega(t) = \omega_c + \Delta\omega(t) = \omega_c + k_f a(t) \quad (1.1-5)$$

若调制信号仍是一个余弦函数,则调频波的总相角为

$$\begin{aligned} \psi(t) &= \int \omega(t) dt + \varphi_c = \int [\omega_c + k_f a(t)] dt + \varphi_c \\ &= \omega_c t + \int k_f a(t) dt + \varphi_c \end{aligned} \quad (1.1-6)$$

则调制波的表达式为

$$e(t) = A_c \cos(\omega_c t + m_f \sin \omega_m t + \varphi_c) \quad (1.1-7)$$

式中,  $k_f$  称为比例系数;  $m_f = \Delta\omega / \omega_m$ , 称为调频系数。

同样,相位调制就是(1.1-1)式中的相位角  $\varphi_c$  随调制信号的变化规律而变化,调相波的总相角

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \omega_c t + \varphi_c + k_\varphi a(t) \\ &= \omega_c t + \varphi_c + k_\varphi A_m \cos \omega_m t \end{aligned} \quad (1.1-8)$$

则调相波的表达式为

$$e(t) = A_c \cos(\omega_c t + m_\varphi \cos \omega_m t + \varphi_c) \quad (1.1-9)$$

式中,  $m_\varphi = k_\varphi A_m$ , 称为调相系数。

下面再简要分析一下调频和调相波的频谱。由于调频和调相实质上最终都是调制总

相角,因此可写成统一的形式

$$e(t) = A_c \cos[\omega_c t + m \sin \omega_m t + \varphi_c] \quad (1.1-10)$$

利用三角公式展开(1.1-10)式,得

$$e(t) = A_c [\cos(\omega_c t + \varphi_c) \cos(m \sin \omega_m t) - \sin(\omega_c t + \varphi_c) \sin(m \sin \omega_m t)] \quad (1.1-11)$$

将式中  $\cos(m \sin \omega_m t)$  和  $\sin(m \sin \omega_m t)$  两项按下式展开:

$$\cos(m \sin \omega_m t) = J_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m) \cos(2n \omega_m t)$$

$$\sin(m \sin \omega_m t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(m) \sin[(2n-1) \omega_m t]$$

知道了调制系数  $m$ ,就可从贝塞尔函数表查得各阶贝塞尔函数的值。将上两式代入(1.1-11)式并展开,可得到

$$\begin{aligned} e(t) &= A_c \{ J_0(m) \cos(\omega_c t + \varphi_c) + J_1(m) \cos[(\omega_c + \omega_m)t + \varphi_c] \\ &\quad - J_1(m) \cos[(\omega_c - \omega_m)t + \varphi_c] + J_2(m) \cos[(\omega_c + 2\omega_m)t + \varphi_c] \\ &\quad + J_2(m) \cos[(\omega_c - 2\omega_m)t + \varphi_c] + \dots \} \\ &= A_c J_0(m) \cos(\omega_c t + \varphi_c) + A_c \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m) [\cos(\omega_c + n\omega_m)t + \varphi_c \\ &\quad + (-1)^n \cos(\omega_c - n\omega_m)t + \varphi_c] \end{aligned} \quad (1.1-12)$$

由此可见,在单频正弦波调制时,其角度调制波的频谱是由光载频与在它两边对称分布的无穷多对边频所组成的。各边频之间的频率间隔是  $\omega_m$ ,各边频幅度的大小  $J_n(m)$  由贝塞尔函数决定。如  $m=1$ ,由贝塞尔函数表查得: $n=0$  的  $J_0(m)=0.77$ , $n=1$  的  $J_1(m)=0.44$ , $n=2$  的  $J_2(m)=0.11$ , $n=3$  的  $J_3(m)=0.02 \dots$  其频谱分布如图 1.1-2 所示。显然,若调制信号不是单频正弦波,则其频谱将更为复杂。另外,当角度调制系数较小(即  $m \ll 1$ )时,其频谱与调幅波的频谱有着相同的形式。

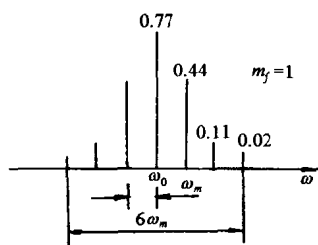


图 1.1-2 角度调制波的频谱

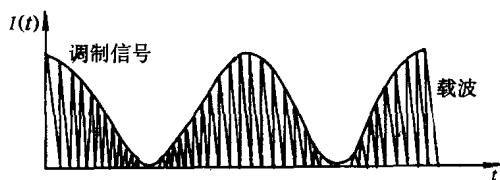


图 1.1-3 强度调制

### 三、强度调制

强度调制是光载波的强度(光强)随调制信号规律而变化的激光振荡,如图 1.1-3 所示。激光调制通常多采用强度调制形式,这是因为接收器(探测器)一般都是直接地响应其所接收的光强度变化的缘故。

激光的光强定义为光波电场的平方,其表示式为



$$I(t) = e^2(t) = A_c^2 \cos^2(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.1-13)$$

于是,强度调制的光强表示式可写为

$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + k_p a(t)] \cos^2(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.1-14)$$

式中,  $k_p$  为比例系数。设调制信号是单频余弦波  $a(t) = A_m \cos(\omega_m t)$ , 将其代入上式, 并令  $k_p A_m = m_p$  (称为强度调制系数), 则

$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + m_p \cos \omega_m t] \cos^2(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.1-15)$$

这是当调制系数  $m_p \ll 1$  时比较理想的光强调制公式。光强调制波的频谱可用前面所述类似的方法求得, 但其结果与调幅波的频谱略有不同, 其频谱分布除了载频及对称分布的两边频之外, 还有低频  $\omega_m$  和直流分量。

在实际应用中, 为了得到较强的抗干扰效果, 往往利用二次调制方式, 即先将低频信号对一高频副载波进行频率调制, 然后再用这个已调频波对光载波进行强度调制 (称为 FM/IM 调制), 使光的强度按副载波信号的变化而变化, 这是因为在传输过程中, 尽管大气抖动等干扰波会直接叠加到光信号波上, 但经解调后, 其信息是包含在调频的副载波中, 故其信息不会受到干扰, 可以无失真地再现出原来的信息。

#### 四、脉冲调制

以上几种调制形式所得到的调制波都是一种连续振荡的波, 称为模拟式调制。另外, 在目前的光通信中还广泛采用一种在不连续状态下进行调制的脉冲调制和数字式调制 (也称为脉冲编码调制)。它们一般是先进行电调制 (模拟脉冲调制或数字脉冲调制), 再对光载波进行光强度调制。

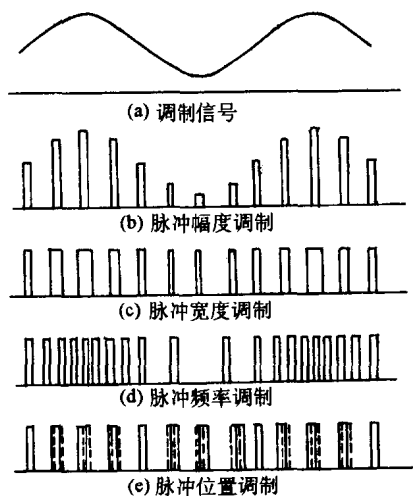


图 1.1-4 脉冲调制形式

脉冲调制是用一种间歇的周期性脉冲序列作为载波, 这种载波的某一参量按调制信号规律变化的调制方法。即先用模拟调制信号对一电脉冲序列的某参量 (幅度、宽度、频率、位置等) 进行电调制, 使之按调制信号规律变化, 如图 1.1-4 所示, 成为已调脉冲序列, 然后再用这已调电脉冲序列对光载波进行强度调制, 就可以得到相应变化的光脉冲序列。例如, 用调制信号改变电脉冲序列中每个脉冲产生的时间, 则其每个脉冲的位置与未调制时的位置有一个与调制信号成比例的位移, 这种调制称为脉位调制 (PPM), 如图 1.1-4 (e) 所示, 进而再对光源发射的光载波进行强度调制, 便可以得到相应的光脉位调制波, 其表达式为

$$e(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (\text{当 } t_n + \tau_d \leq t \leq t_n + \tau_d + \tau)$$

$$\tau_d = \frac{\tau_p}{2} [1 + M(t_n)] \quad (1.1-16)$$

式中,  $M(t_n)$  是调制信号的振幅,  $\tau_d$  为载波脉冲前沿相对于取样时间  $t_n$  的延迟时间。为了