



普通高等教育“十五”国家级规划教材

激光技术

(第二版)

蓝信钜 等 编著



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十五”国家级规划教材

激 光 技 术

(第二版)

蓝信钜 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了各种主要激光技术的原理与实施方法,内容包括激光调制与偏转技术、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,并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,并适当结合一定的实例,叙述深入浅出,便于自学。

本书可作为高等院校光电子技术、光信息技术、技术物理、光电仪器、应用物理等专业本科生教材,也可作为物理电子学等专业研究生的主要教学参考书,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。

图书在版编目(CIP)数据

激光技术/蓝信钜等编著. —2版. —北京:科学出版社,2005

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-03-013636-5

I. 激… II. 蓝… III. 激光技术-高等学校 教材 IV. TN24

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第065734号

责任编辑 马长芳 / 责任校对 朱光光

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

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>

双青印刷厂 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:B5(720×1000)

2005年1月第二版 印张:25

2005年1月第四次印刷 字数:488 000

印数:8 501—12 500

定价:36.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

本教材从 20 世纪 80 年代以来,先后 4 次为历届教学指导委员会审定、推荐出版,于 1997 年被原国家教委定为“九五”国家级重点教材。第二版是在第一版的基础上修改而成,于 2001 年被教育部定为普通高等教育“十五”国家级规划教材。

本教材由华中科技大学蓝信钜担任主编,朱长虹担任副主编。

本课程的参考学时数为 70 学时。全书共分 5 个部分(8 章)。第一部分(第 1 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 2 至 4 章),激光调 Q、超短脉冲和放大技术,主要讨论提高激光脉冲的功率和能量的基本理论和实现方法;第三部分(第 5 至 6 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 7 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施办法;第五部分(第 8 章),激光传输技术,着重讨论光纤传输理论和技术,简要介绍大气和水下传输技术。

本书是按照全国高校工科电子信息类光电子信息专业的教学大纲编写的专业基础课教材,具有物理光学和激光原理基础知识的读者可以顺利阅读。本书适用于高等院校光电技术、光信息技术、技术物理、光电仪器、应用物理等专业本科生作为教科书,可作为物理电子学等专业研究生的主要教学参考书,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,故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。另外,本书虽以介绍基本原理为主,但“激光技术”是实践性比较强的一门课程,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。每章后面附有习题及思考题,供学生练习选用。

本书第 1、6 章由华中科技大学蓝信钜执笔,第 2、5 章由华中科技大学陈培锋执笔,第 3 章由天津大学姚建铨、宁继平执笔,第 4 章由华中科技大学刘劲松执笔,第 7 章由华中科技大学朱长虹执笔,第 8 章由西安电子科技大学安毓英执笔。蓝信钜负责统编全稿。在本书编写过程中,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

2004 年 2 月

目 录

绪言	1
第 1 章 激光调制与偏转技术	5
1.1 调制的基本概念	5
1.1.1 振幅调制	6
1.1.2 频率调制和相位调制	6
1.1.3 强度调制	8
1.1.4 脉冲调制	8
1.1.5 脉冲编码调制	9
1.2 电光调制	10
1.2.1 电光调制的物理基础	10
1.2.2 电光强度调制	17
1.2.3 电光相位调制	22
1.2.4 电光调制器的电学性能	22
1.2.5 电光波导调制器	26
1.2.6 电光偏转	30
1.2.7 设计电光调制器应考虑的问题	33
1.3 声光调制	35
1.3.1 声光调制的物理基础	35
1.3.2 声光互作用的两种类型	37
1.3.3 声光体调制器	48
1.3.4 声光波导调制器	56
1.3.5 声光偏转	57
1.3.6 声光调制器设计应考虑的事项	60
1.4 磁光调制	65
1.4.1 磁光效应	65
1.4.2 磁光体调制器	67
1.4.3 磁光波导调制器	68
1.5 直接调制	69
1.5.1 半导体激光器(LD)直接调制的原理	69
1.5.2 半导体发光二极管(LED)的调制特性	70
1.5.3 半导体光源的模拟调制	71

1.5.4 半导体光源的 PCM 的数字调制	71
1.6 空间光调制器	72
1.6.1 空间光调制器的基本概念	72
1.6.2 空间光调制器的基本功能	73
1.6.3 几种典型的空间光调制器	75
习题与思考题	81
参考文献	82
第2章 调Q (Q 开关)技术	83
2.1 概述	83
2.1.1 脉冲固体激光器的输出特性	83
2.1.2 调Q 的基本原理	85
2.1.3 实现调Q 对激光器的基本要求	88
2.2 调Q 激光器的基本理论	88
2.2.1 调Q 的速率方程	88
2.2.2 速率方程的求解	89
2.3 电光调Q	96
2.3.1 带偏振器的电光调Q 器件	96
2.3.2 单块双 45°电光调Q 器件	98
2.3.3 脉冲透射式 (PTM) 调Q	102
2.3.4 Q 调制技术的其他功能	104
2.4 设计电光调Q 激光器应考虑的问题	106
2.4.1 调制晶体材料的选择	106
2.4.2 调制晶体的电极结构	107
2.4.3 对激光工作物质的要求	107
2.4.4 对光泵浦灯的要求	108
2.4.5 对Q 开关控制电路的要求	108
2.5 声光调Q	108
2.5.1 声光调Q 的基本原理	108
2.5.2 声光调Q 器件的结构及设计	109
2.5.3 声光调Q 动态实验及输出特性	113
2.5.4 声光腔倒空激光器	117
2.6 被动式可饱和吸收调Q	118
2.6.1 可饱和吸收染料的调Q 原理	118
2.6.2 饱和吸收的速率方程	119
2.6.3 染料调Q 激光器及其输出特性	120
2.6.4 LiF : F ₂ ⁻ 色心晶体 (可饱和吸收) 调Q	123

2.6.5 二极管泵浦被动调Q激光器	124
2.7 转镜调Q简介	127
习题与思考题	130
参考文献	131
第3章 超短脉冲技术	132
3.1 概述	132
3.1.1 多模激光器的输出特性	132
3.1.2 锁模的基本原理	134
3.1.3 锁模的方法	136
3.2 主动锁模	137
3.2.1 振幅调制锁模	137
3.2.2 相位调制锁模	140
3.2.3 主动锁模激光器的结构及其设计要点	141
3.2.4 无失谐时的锁模脉宽及稳定锁模系统	142
3.3 被动锁模	145
3.3.1 固体激光器的被动锁模	145
3.3.2 染料激光器的被动锁模	148
3.4 同步泵浦锁模	151
3.4.1 同步泵浦锁模原理	151
3.4.2 同步泵浦锁模激光器的结构	154
3.5 自锁模	156
3.5.1 自锁模机理	156
3.5.2 超短脉冲的压缩技术	158
3.6 单一脉冲的选取及超短脉冲测量技术	163
3.6.1 单一脉冲的选取	163
3.6.2 超短脉冲的测量技术	166
3.7 几种典型的锁模激光器	171
3.7.1 掺钛蓝宝石自锁模激光器	172
3.7.2 半导体锁模激光器	174
3.7.3 掺铒光纤锁模激光器	175
习题与思考题	177
参考文献	178
第4章 激光放大技术	180
4.1 概述	180
4.2 脉冲放大器的理论	182
4.2.1 脉冲放大器的速率方程	182

4.2.2	速率方程的求解	183
4.2.3	对矩形脉冲放大的分析	185
4.2.4	其他脉冲波形的放大	189
4.2.5	脉冲信号在有损耗介质中的放大	190
4.3	长脉冲激光放大的稳态理论	191
4.3.1	稳态的速率方程	191
4.3.2	谱线轮廓对增益系数的影响	192
4.4	设计激光放大器应考虑的几个问题	195
4.4.1	放大器工作物质的选择	195
4.4.2	放大器工作物质端面反馈的消除	196
4.4.3	级间去耦问题	196
4.4.4	级间孔径匹配问题	198
4.4.5	各级泵浦时间的匹配	198
4.4.6	不均匀性影响的消除	199
4.5	再生式放大技术	201
4.5.1	外注入再生放大	202
4.5.2	注入锁定技术	202
4.5.3	自注入放大技术	204
4.6	半导体激光放大器	205
4.7	掺稀土元素光纤放大器	208
4.7.1	掺铒光纤放大器	208
4.7.2	掺镨光纤放大器	209
4.8	分布式光纤放大器	210
4.8.1	光纤拉曼放大器	210
4.8.2	光纤布里渊放大器	211
	习题与思考题	212
	参考文献	213
第5章	模式选择技术	214
5.1	概述	214
5.1.1	模式的概念,激光谐振腔与模式的一般联系	214
5.1.2	横模的形成	216
5.1.3	实际激光束的传输规律	217
5.2	横模选择技术	223
5.2.1	横模选择原理	223
5.2.2	横模选择的方法	226
5.2.3	激光光束形式研究的新进展——Bessel 光束	235

5.3 纵模选择技术	237
5.3.1 纵模选择原理	237
5.3.2 纵模选择的方法	237
5.4 模式测量方法	245
5.4.1 直接观测法	246
5.4.2 光点扫描法	246
5.4.3 扫描干涉仪法	247
5.4.4 F-P 照相法	249
习题与思考题	251
参考文献	251
第 6 章 稳频技术	252
6.1 概述	252
6.1.1 频率的稳定性和复现性	252
6.1.2 影响激光频率稳定的因素	253
6.1.3 激光器主动稳频的方法	256
6.1.4 对参考标准频率(参考谱线)的要求	258
6.2 兰姆凹陷稳频	258
6.2.1 兰姆凹陷	258
6.2.2 兰姆凹陷稳频原理	259
6.2.3 应用兰姆凹陷稳频时应注意的问题	260
6.3 塞曼效应稳频	262
6.3.1 塞曼效应	262
6.3.2 塞曼效应双频稳频激光器	263
6.3.3 塞曼效应吸收稳频	266
6.4 饱和吸收稳频(反兰姆凹陷稳频)	267
6.5 其他稳频激光器	270
6.5.1 CO ₂ 激光器的稳频	270
6.5.2 Ar ⁺ 激光器(用 ¹²⁷ I ₂ 饱和吸收)稳频	272
6.5.3 脉冲激光器的稳频	273
6.5.4 半导体激光器的稳频	274
6.6 频率稳定性及复现性的测量	276
6.6.1 拍频的原理	276
6.6.2 拍频技术测量的频率稳定性和复现性	278
习题与思考题	280
参考文献	280
第 7 章 非线性光学技术	281

7.1 概述	281
7.1.1 非线性光学效应	281
7.1.2 非线性极化	281
7.1.3 非线性介质中波耦合方程	284
7.2 激光倍频技术	286
7.2.1 倍频的波耦合方程及其解	286
7.2.2 相位匹配的意义与方法	289
7.2.3 准相位匹配方法(QPM)	294
7.2.4 倍频方式	296
7.2.5 倍频晶体	297
7.3 光参量振荡技术	299
7.3.1 光参量放大	299
7.3.2 光参量振荡	300
7.3.3 光参量振荡运转方式	302
7.3.4 光参量振荡器的频率调谐方法	303
7.4 受激拉曼散射	306
7.4.1 拉曼散射效应	306
7.4.2 波耦合分析	308
7.4.3 受激拉曼散射的调谐应用	311
7.4.4 拉曼频移激光器件	313
7.5 光学相位共轭	314
7.5.1 光学相位共轭的概念	314
7.5.2 光学相位共轭方法与应用	316
习题与思考题	320
参考文献	321
第8章 激光传输技术	322
8.1 光纤概述	322
8.1.1 光纤波导结构及弱导特性	322
8.1.2 光纤制造工艺简介	323
8.1.3 光缆	326
8.1.4 光纤的传输特性	328
8.2 光纤的射线特性分析	328
8.2.1 阶跃光纤	329
8.2.2 渐变折射率光纤	333
8.3 光纤衰减和色散特性	341
8.3.1 光纤的衰减	341

8.3.2	光纤色散、带宽和脉冲展宽参量间的关系	344
8.3.3	光线的色散特性	345
8.4	单模光纤的偏振和双折射	353
8.4.1	单模光纤的偏振特性	353
8.4.2	单模光纤的双折射	355
8.4.3	偏振型单模光纤	356
8.5	光纤中的非线性效应——光纤孤子	357
8.5.1	光学孤子的物理概念	358
8.5.2	色散介质中的双曲方程	359
8.5.3	非线性薛定谔方程	360
8.6	光纤连接耦合技术	362
8.6.1	光纤的处理与连接	362
8.6.2	光纤的光耦合	363
8.6.3	光纤的分光与合光装置	368
8.7	激光大气和水下传输	369
8.7.1	大气衰减	369
8.7.2	大气湍流及非线性传播效应	376
8.7.3	激光水下传输特性	382
	习题与思考题	385
	参考文献	386

绪 言

激光是 20 世纪的重大发明之一,由于激光器的发光机理不同于普通光源,故它具有一些很突出的优异特性,即很好的方向性、高亮度以及良好的单色性和相干性。它的这些特点,在现代科学技术各个方面发挥了独特的作用,已经遍及工业、军事、通信、医学和科学研究等诸多领域。1960 年第一台激光器问世,在随后的 40 多年中,陆续发明了多种不同类型的激光器,主要有固体激光器(Nd:YAG、Nd 玻璃、红宝石等)、气体激光器(He-Ne、Ar⁺、CO₂ 等)、半导体激光器(GaAs、In-GaAsP/InP 等)、准分子激光器(XeCl、KrF 等)以及自由电子激光器等,可以说激光器是品种繁多,性能各异。然而,各种激光器所具有的物理属性基本上是固定的,而且不可能同时所具有的上述特性都很好。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,为了能适于各方面实际应用的需要,这一期间,在研究开发激光器和研究激光与物质相互作用的同时,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。由于这些技术的应用,大大开拓了激光应用的领域,甚至出现了一些崭新的物理现象,形成了一系列新的激光分支和应用技术领域,如激光物理学、非线性光学、激光光谱学、激光医学、信息光电子技术等。

一台普通的脉冲固体激光器,其输出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,人们研究和发展了激光调 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 10⁻⁷s 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 20 世纪 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)量级的巨脉冲的产生已并不困难。调 Q 技术的出现,是激光发展史上的一个重大突破,大大推动了上述一些应用技术的发展;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)量级(1ps=10⁻¹²s),所以也称为超短脉冲技术,从 20 世纪 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。锁模技术能产生脉宽为飞秒(fs, 1fs=10⁻¹⁵s)、峰

值功率为太瓦(TW, $1\text{TW}=10^{12}\text{W}$)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。由于调Q和锁模技术使激光辐射在空间和时间上能高度集中,因而激光的单色亮度比普通激光提高了6~9个数量级,光源在亮度上又产生一个新的飞跃,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、新技术,因而成为科学技术研究的有力工具。如把激光调Q技术和多级放大技术组合运用,则能产生超大功率的激光,可以在空间极小的范围内产生极高的光能密度,从而产生几千万度高温的等离子体,可能用激光点火实现可控热核聚变反应。

另外,激光的某些应用领域要求激光束具有很高的光束质量(即方向性和单色性好),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,研究和开发了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性比较差,即频率(波长)的变化是一个随机起伏的,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20世纪60年代中期,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 CH_4 分子稳频He-Ne激光器的 $3.39\mu\text{m}$ 波长,其频率稳定度达到 10^{-14} ,复现性达到 3×10^{-12} ;另外,碘也是常用的吸收分子,如 $^{127}\text{I}_2$ 和 $^{129}\text{I}_2$ 稳频He-Ne激光器的 $633\mu\text{m}$ 波长,也获得了很高的稳定性和复现性。近10年来还陆续出现了其他激光器(Ar^+ 、 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获得频率稳定性极好、发散角极小的优质光束,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。

激光问世之后,人们立即开始了研究它在信息技术(信息的传输、存储、处理等)中的应用,因为激光是一种光频电磁波,它的传输速度极快、频率极高,故它作为载波的信息容量很大,可为光通信、光信息处理等应用提供极好的信息载波源,因而陆续出现了各种激光调制技术。随着各种光学晶体材料的不断出现,人们利用

某些物理效应(电光、声光、磁光等),研制出了各种光调制器件和技术,实现了激光加载信息的目的。特别是从20世纪60年代末到70年代初,克雷歇尔(Kressel)和阿尔菲洛夫(Alferov)等提出了双异质结半导体激光器新构思,并实现了室温下连续工作的器件;英国华裔科学家高锟和霍克海姆(Hockham)提出了基于光学全反射原理的光导纤维的新概念,并于4年后由美国康宁公司的凯普隆(Kapron)等人研制成功了实用光纤产品,从而揭开了光纤通信技术蓬勃发展的历史。另外,在近十几年来,多种空间光调制器研制成功,顾名思义,它是一种对光波的空间分布进行调制的器件,由于它具有可实时地在空间上调制光束的功能而成为实时光学信息处理、光计算、光存储和光学神经网络等系统的关键器件,因而大大推动了该领域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,特别是利用了调Q和锁模技术,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。1961年,弗兰肯(Franken)等人将红宝石激光束聚焦到石英晶体上,观察到了红宝石激光的二次谐波辐射,这就是倍频现象。但弗兰肯等人的实验是非相位匹配的,因而二次谐波辐射的转换效率很低(约 10^{-8});到1962年,克莱曼(Kleinman)、乔特迈(Giordmaine)、马克尔(Maker)等人提出了相位匹配技术,即利用晶体的双折射效应能够达到相速度匹配,从而实现了有效的倍频。1965年,非线性光学理论日臻完善,陆续出现了许多重要的非线性光学现象,如光混频(和频、差频)的产生,光参量放大和振荡,多光子吸收、自聚焦、受激散射等。随着激光技术及非线性光学材料的发展,人们把上述非线性光学现象和效应广泛地应用于扩展激光波段(如激光频率转换器),改变或控制激光器参数(如脉宽、功率、频率、稳定性等),另外,还提供了研究物质(原子或分子)微观性质的手段,从而为激光应用开辟了广阔的前景。展望未来,光与物质的非线性相互作用效应及其在各种非线性光学器件的应用研究仍将是今后重要的研究方向之一,如光纤通信中的光纤非线性效应、光孤子的形成与传输等。总之,激光在诸多领域之所以能“大显神通”,是由于利用了不同类型的激光器和相关激光技术组合运用的结果。

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,但从基本原理来看,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量(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20世纪80年代已发展到成熟阶段,其内容(包括基础理论和基本技术)也日益丰富,已经成为光电子技术和光电子信息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。本教材的主要目的将着重介绍各种主要激光单元技术(包括调制技术、调Q技术、超短脉冲技术、放大技术、选模技术、稳频技术、非线性光学技术以及传输技术)的基本概念、基本理论,以及所利用的诸物理效应在技术器件中的作用原理和实施方法,使读者对各种激光技术的物理过程有比较清晰而系统的了解,为解决一些实际应用技术打下基础。

第 1 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。由于激光具有很高的频率($10^{13} \sim 10^{15} \text{Hz}$),可供利用的频带很宽,故传递信息的容量大。再有,激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、 ω_c 为角频率、 φ_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,达到了“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,从而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 2 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。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、大容量的光通信中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。下面简要地介绍一下这几种调制的概念。

1.1.1 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

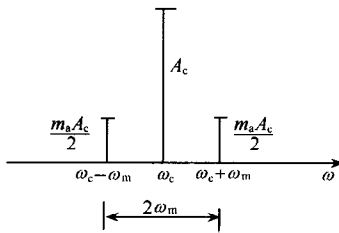


图 1.1-1 调幅波频谱

激光载波的电场强度如式(1.1-1)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、 ω_m 是调制信号的角频率。当进行激光振幅调制之后,式(1.1-1)中的激光振幅 A_c 不再是常量,而是与调制信号成正比的函数,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上式展开,即得到调幅波的频谱公式

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

式中, $m_a = A_m / A_c$, 称为调幅系数。由式(1.1-4)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(如图 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。

1.1.2 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 $\varphi(t)$ 的变化,因此统称为角度调制。

对频率调制来说,就是式(1.1-1)中的角频率 ω_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

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

调制波的表达式为