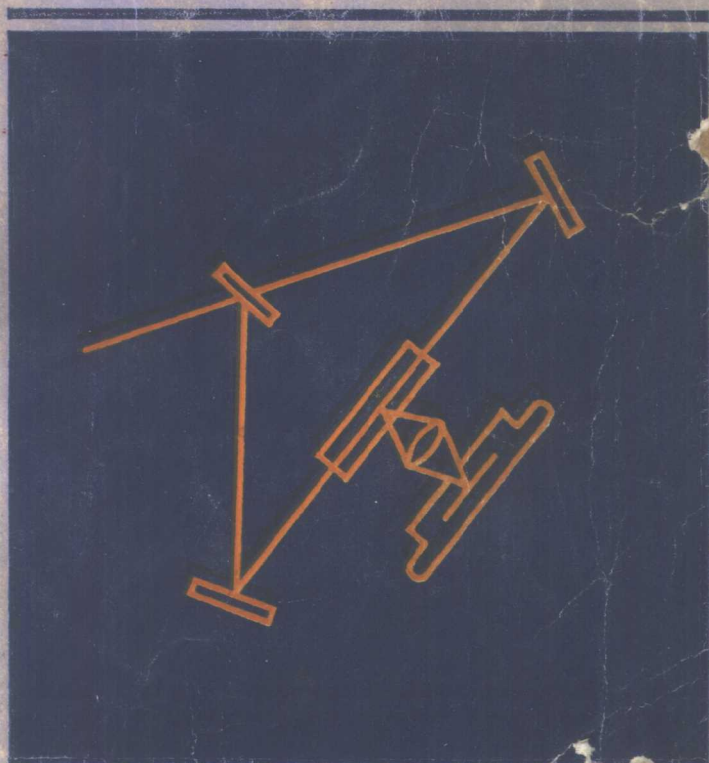


高等学校试用教材

激光技术

JIGUANG JISHU

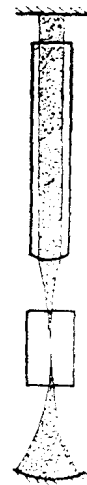
华中工学院
天津大学 合编
西北电讯工程学院



湖南科学技术出版社



激光技术



华中工学院：兰信钜 黄国标
张渝楠
天津大学：姚建铨 李 昱
西北电讯工程学院：安毓英

湖南科学技术出版社

激 光 技 术

华 中 工 学 院
天 津 大 学 合 编
西 北 电 讯 工 程 学 院
责 任 编 辑：周 翰 宗

*

湖 南 科 学 技 术 出 版 社 出 版
(长 沙 市 展 览 馆 路 14 号)
湖 南 省 经 济 科 学 出 版 社 发 行 湖 南 省 新 华 印 刷 二 厂 印 刷

*

1981年2月第1版 1983年8月第2次印刷
开本：787×1092毫米 1/16 印张：22.5 插页：1 字数：558,000
印数：4,501—9,800
统一书号：15204·50 定价：2.40元

前 言

本书是根据工科电子类激光专业教材会议的规划而编写的专业教材之一。学生在已经学习了《物理光学》《激光原理》和《激光器件》等课程的基础上，学习本书所介绍的各种激光技术的基本原理与技术基础，可以对各种技术的主要激光物理过程有比较系统的了解，并且能运用这些理论分析激光的某些问题和为今后能解决一些实际应用技术问题打下基础。

本书的内容主要有：调制技术，重点介绍了电光与声光调制的基本原理和技术基础；调Q、锁模、放大等技术，主要介绍了提高激光脉冲的功率和能量的基本理论和实现方法；选模、稳频技术，主要介绍了激光器实现单模输出和稳定振荡频率的实现方法及其原理；倍频与参量振荡技术，首先对非线性光学的物理概念进行了必要的阐述，然后着重讨论了这种技术的基本原理和技术基础；光传输和光探测技术，着重介绍了大气和光纤传输的理论及其典型的探测方法。

本书还需说明以下几点：一、各章的内容所涉及的知识范围比较广泛，与《物理光学》《激光原理》等有关章节密切相关，鉴于统编教材已有分工，故本书有些章节仅引用其结果，而不再做详细阐述。二、各章的内容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，所以有些章节仍然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。三、本书各章的相对独立性比较强，前七章是属于激光单元技术，它们与有关的激光器件几乎是不可分开的；后两章是属于激光应用技术，所以在学习本书各章时，可以根据具体情况灵活选用。标有“*”号的章节系参考章节。

本书由蓝信钜(华中工学院)负责主编并执笔编写第一、四、六章。第二章由黄国标(华中工学院)执笔；第三章由姚建铨(天津大学)执笔，第五章由张渝楠(华中工学院)执笔，第七章由李昱(天津大学)执笔，第八、九章由安毓英(西北电讯工程学院)执笔。并由成都电讯工程学院刘树杞教授和北京工业学院魏光辉负责主审。

本书在编写过程中，得到了中国科学院物理研究所、上海光机所、安徽光机所、清华大学、中国计量科学研究院、1411所、二〇九所等单位的大力支持和提供的宝贵资料，在此表示感谢。

由于本书编写时间相当仓促，加之水平有限，故不妥和错误之处在所难免，恳望读者指正，以便作为今后进行修改的参考。

编 者

一九七九年九月

目 录

第一章 调制与偏转技术.....	(1)
§ 1.1 概述	(1)
一、调制的基本概念	(1)
二、各种调制型式(调幅、调相、强度调制等)简介	(2)
§ 1.2 电光调制	(8)
一、纵向电光调制器	(8)
二、横向电光调制器	(13)
三、电光相位调制器	(16)
四、电光调制器的电学性能	(17)
五、设计电光调制器应考虑的几个问题	(21)
§ 1.3 声光调制	(22)
一、声光作用	(24)
二、声光调制器的工作原理	(29)
三、声光调制器的设计考虑	(30)
§ 1.4 其他调制方法	(34)
一、干涉调制	(34)
二、磁光调制	(35)
三、直接调制	(35)
§ 1.5 激光偏转技术	(36)
一、机械偏转法	(37)
二、电光偏转	(37)
三、声光偏转	(41)
第二章 调Q(Q开关)技术	(44)
§ 2.1 概述	(44)
一、一般固体脉冲激光器的输出特性	(44)
二、调Q原理	(45)
§ 2.2 调Q激光器的基本理论	(46)
一、调Q的速率方程	(46)
二、阶跃式Q突变的近似解	(49)
三、腔损耗按线性变化时Q突变的近似解	(54)
四、腔损耗按余弦变化时Q突变的近似解	(55)
五、多脉冲问题	(56)
§ 2.3 机械转镜调Q	(59)

一、转镜调Q的装置及原理	(59)
二、转镜调Q的最佳转速	(61)
三、转镜调Q的加速原理	(66)
四、实例	(69)
· § 2.4 电光晶体调Q	(70)
一、电光晶体调Q原理	(70)
二、带起偏器的电光Q开关	(72)
三、双折射偏离法电光Q开关	(74)
· 四、单块双45°电光Q开关	(76)
五、单块单45°电光Q开关	(86)
六、脉冲透射式调Q	(89)
七、电光晶体调制器的电极结构	(91)
八、晶体Q开关电路的特殊问题	(92)
§ 2.5 声光调Q	(94)
一、声光调Q的基本原理	(94)
二、声光调Q器件的结构与设计	(94)
三、动态试验及巨脉冲输出特性	(97)
四、腔倒空技术	(101)
五、实例	(102)
§ 2.6 可饱和吸收体调Q	(103)
一、基本原理	(103)
二、染料调Q激光器及其特性	(105)
三、实例	(108)
第三章 锁模技术	(110)
§ 3.1 概述	(110)
一、多模激光器的输出特性	(110)
二、多模激光器模式锁定特性	(112)
§ 3.2 锁模原理及实现锁模的方法	(115)
一、纵模锁定	(115)
二、横模锁定及纵横模同时锁定	(129)
· § 3.3 均匀加宽激光器内腔调制锁模特性分析	(130)
一、无失谐时的自洽解	(130)
二、失谐时的自洽解	(134)
三、标准具效应的讨论	(137)
§ 3.4 单一脉冲的选取及微微秒脉宽的测量	(138)
一、单一脉冲的选取	(138)
二、微微秒脉宽的测量	(140)
第四章 激光放大技术	(147)
§ 4.1 概述	(147)
§ 4.2 脉冲激光放大器的理论	(149)
一、脉冲放大器的速率方程	(149)

二、脉冲放大器速率方程的解	(150)
三、对矩形脉冲放大的分析	(152)
四、对其他脉冲波形的放大	(155)
五、脉冲信号在有损耗放大介质中的放大	(156)
§ 4.3 激光放大的特性	(158)
一、脉冲波形的变化	(158)
二、光束发散角的变化	(158)
三、谱线宽度的变化	(158)
§ 4.4 长脉冲激光放大器的稳态解	(159)
§ 4.5 设计激光放大器应考虑的几个问题	(160)
一、放大介质端面反馈的消除	(160)
二、级间去耦问题	(160)
三、级间孔径匹配问题	(161)
四、各级泵浦时间的匹配	(161)
五、不均匀性影响的消除	(161)
§ 4.6 实例 Nd^{3+} :YAG激光放大器	(163)
第五章 模式选择技术	(164)
§ 5.1 概述	(164)
一、横模选择及其意义	(164)
二、纵模选择及其意义	(166)
§ 5.2 横模选择技术	(166)
一、横模选择技术的有关理论	(166)
二、光阑法选模	(170)
三、谐振腔参数 g 、 N 之选择法	(172)
四、介稳腔之选模特性	(174)
五、非稳定谐振腔	(176)
六、其他选模方法	(180)
§ 5.3 纵模选择技术	(180)
一、色散腔法粗选频率	(180)
二、短腔法选纵模	(182)
三、法布里-珀罗标准具法	(183)
四、复合腔选纵模	(184)
五、单反射表面腔	(185)
六、行波腔选纵模	(187)
七、晶体双折射选纵模	(188)
八、其他选纵模方法	(189)
§ 5.4 模式测量方法	(189)
一、横模的直接观测法	(189)
二、光点扫描法测横模	(190)
三、扫描干涉仪	(190)
四、法布里-珀罗照相法	(192)
五、全息法测横模	(193)
六、拍频法	(194)

第六章 稳频技术	(195)
§ 6.1 概述	(195)
一、频率的稳定性和复现性	(195)
二、影响激光频率稳定的因素	(196)
三、激光频率主动稳定的方法	(197)
§ 6.2 兰姆凹陷稳频	(198)
一、兰姆凹陷	(198)
二、兰姆凹陷稳频原理	(199)
三、利用兰姆凹陷稳频应注意的几个问题	(200)
§ 6.3 无源腔稳频	(201)
§ 6.4 利用塞曼效应稳频	(202)
一、塞曼效应	(202)
二、塞曼效应吸收稳频	(202)
三、双频稳频激光器	(203)
§ 6.5 饱和吸收稳频(反兰姆凹陷稳频)	(206)
§ 6.6 频率稳定性及复现性的测量	(208)
一、“拍频”的原理	(208)
二、用拍频技术测量频率的稳定性和复现性	(209)
§ 6.7 激光波长值的“绝对”测量	(211)
附：激光稳频器电子伺服系统	(212)
第七章 倍频与参量振荡技术	(217)
§ 7.1 概述	(217)
一、线性光学与非线性光学	(217)
二、线性极化与非线性极化	(217)
§ 7.2 二次非线性光学效应	(219)
一、二次非线性效应	(219)
二、非线性光学系数	(221)
三、非线性波耦合方程	(224)
§ 7.3 倍频技术	(226)
一、影响倍频输出的因素	(226)
二、相位匹配	(228)
三、倍频器件设计	(234)
§ 7.4 光参量振荡技术	(241)
一、光参量放大和振荡的物理解释	(241)
二、光参量振荡器的增益系数	(242)
三、光参量振荡器的阈值条件	(245)
四、光参量振荡器的频率调谐	(245)
§ 7.5 频率上转换	(248)
一、频率上转换的原理	(248)
二、频率上转换的效率	(249)
三、相位匹配方法和非线性晶体	(250)

• § 7.6 泵光源和非线性材料	(250)
一、对泵光源的要求	(250)
二、对非线性材料的要求	(251)
三、非线性材料与泵光源的配合	(256)
• § 7.7 其他非线性光学现象	(258)
一、介质中的光自聚焦	(258)
二、受激喇曼散射	(259)

第八章 激光传输技术

§ 8.1 大气描述	(263)
一、大气的分层	(263)
二、低层大气状态的分类	(265)
§ 8.2 大气衰减	(266)
一、大气分子的吸收	(267)
二、大气分子的散射	(269)
三、大气气溶胶的衰减	(271)
§ 8.3 各种气溶胶状态的衰减	(271)
一、晴朗、霾、雾的衰减	(271)
二、雾、雨的衰减	(274)
三、雪的衰减	(276)
四、衰减系数的测量	(277)
§ 8.4 斜程衰减	(278)
一、垂直衰减换算法	(279)
二、等效水平距离法	(280)
三、各主要激光波长的等效水平距离方程	(283)
§ 8.5 激光大气湍流效应	(284)
一、大气湍流描述	(285)
二、激光大气湍流效应	(287)
§ 8.6 激光水下传输	(292)
一、衰减特性	(293)
二、前向散射	(294)
三、后向散射	(294)
§ 8.7 光纤波导的模式理论	(295)
一、光纤波导中的模式	(296)
二、截止条件	(298)
三、远离截止条件	(299)
附录 包层光波导中传输模式的数学推导	(300)
§ 8.8 光纤波导的传输特性	(305)
一、传输损耗	(305)
二、传输带宽	(306)
三、其他几种光纤波导	(308)
§ 8.9 光纤波导的激励和连接	(309)
一、光纤波导的激励	(309)

二、连接技术	(312)
第九章 激光探测技术	(315)
§ 9.1 激光探测器的分类及其特性参数	(315)
一、激光探测器的分类	(315)
二、激光探测器的性能参数	(318)
§ 9.2 探测器的噪声及背景辐射	(321)
一、探测器的噪声	(321)
二、背景辐射	(323)
§ 9.3 光电倍增管	(326)
一、基本工作原理	(326)
二、光电倍增管的基本工作电路	(327)
三、光电倍增管的工作特性	(329)
§ 9.4 光电二极管	(331)
一、硅光电二极管	(331)
二、其他光电二极管	(335)
§ 9.5 光电导探测器	(336)
一、工作原理及特性	(336)
二、典型的光电导探测器	(337)
§ 9.6 热释电探测器	(338)
一、热释电材料	(338)
二、工作原理	(339)
三、信号和噪声特性	(340)
四、几种热释电探测器比较	(341)
§ 9.7 直接探测分析	(341)
§ 9.8 光外差探测分析	(345)
一、光外差的基本原理	(345)
二、信噪比分析	(346)
三、外差探测的空间相位条件	(348)
四、大气传输对光外差探测的影响	(349)

第一章 调制与偏转技术

§ 1.1 概 述

传递信息（包括语言、文字、图象、符号等）在人类生活中起着重要的作用。利用光传递信息已有悠久的历史，但是，在激光出现之前这段漫长的岁月里，光传递信息技术进展不大，其原因主要是光源不理想，人们所能得到的光源都是热辐射源，光频率成分复杂，调制困难，不宜作光载波。同时光的传输也没有找到一种合适的介质，因而就限制了光传递信息技术的发展和应

用。一九六〇年激光问世之后，人们第一次获得了相干的光频电磁波，这对光学技术和电子技术的发展和应

用具有十分巨大的意义。激光具有极好的时间相干性和空间相干性，它与无线电波相似，易于调制，且光波的频率极高，能传递信息的容量很大；加之，激光束发散角很小，既易于保密，又能传输较远的距离。因而这为光传递信息提供了一种极为理想的光源。

一、调制的基本概念

欲用激光作为传递信息的工具，首先要解决如何将信号加载到激光辐射上去。例如，激光通话，就需要将欲传递的语言信息加载于激光，由激光“携带”着信息通过一定的传输通道（大气、光纤等）送至接收器，由光接收器鉴别出它的变化，再现出原来的语言信息，从而完成通话的目的。

我们把欲传输信息加载于激光辐射的过程称为激光调制，把完成这一过程的装置称为激光调制器，由已调制的激光辐射还原出所加载信息的过程则称为解调。因为激光在这里实际上只起到“携带”低频信号的作用，所以称为载波，而起控制作用的低频信号是我们所需要的，通常称为调制信号。被调制的载波称为已调波或调制光。

激光调制根据其与激光器的关系，可以分为内调制和外调制两类。内调制是指加载调制信号在激光振荡的过程中进行的，即以调制信号的规律去改变激光振荡的参数，从而达到改变激光输出特性以实现调制。最简单的方法是通过直接控制激光器泵浦电源来调制输出的激光强度，如注入式砷化镓激光器就是采用这种调制方式，它输出激光的强弱和有和无都是受电源控制的。如果我们利用欲传递的信号去控制激光电源，使之通过激光器的电流变化受信号控制，这样发射的激光也就受信号调制了。再一种内调制方法是在谐振腔内放置调制元件，用信号控制调制元件物理特性的变化，以改变谐振腔的参数，从而改变激光输出特性以实现其调制。

外调制是指加载调制信号在激光形成以后进行的。其具体方法是在激光器谐振腔外的光路上放置调制器，在调制器上加调制信号电压，使调制器的某些物理特性发生相应的变化，当激光通过它时即得到调制。所以外调制不是改变激光器的参数，而是改变已经输出的激光的参数（强度、频率等）。外调制是当前人们比较重视的一种调制方法。

按调制的性质而言，激光调制与无线电波调制相类似，可以采用连续的调幅、调频、调相以及脉冲调制等型式，但激光调制多采用强度调制。下面我们对这几种调制型式的基本概念进行简单介绍，以便对它们的特点有一个基本了解。

二、各种调制型式简介

激光振荡的瞬时电场可表示为

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

式中， A_c 为激光振荡的振幅， ω_c 为振荡的角频率， φ_c 为振荡的相位角， $\psi(t)$ 为总相角。

激光辐射的强度则定义为电场的平方，即

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

式(1.1-1)中，如果振幅、频率和相位都是常数，则 $e_c(t)$ 表示一个未调制的正弦振荡即载波。如果上述三个参数之一受到外加信号的控制而发生变化，则 $e(t)$ 就成为已调制振荡。按照调制时被控制参数(A_c 、 ω_c 或 φ_c)的不同，激光调制可以分为下列几种主要型式。

1. 幅度调制(简称调幅) 即是振幅按调制信号的规律变化的激光振荡。图1.1-1为正弦变化的调制信号和已调幅的波形。由图可以看出，用虚线表示的包络线的形状(已调幅振荡

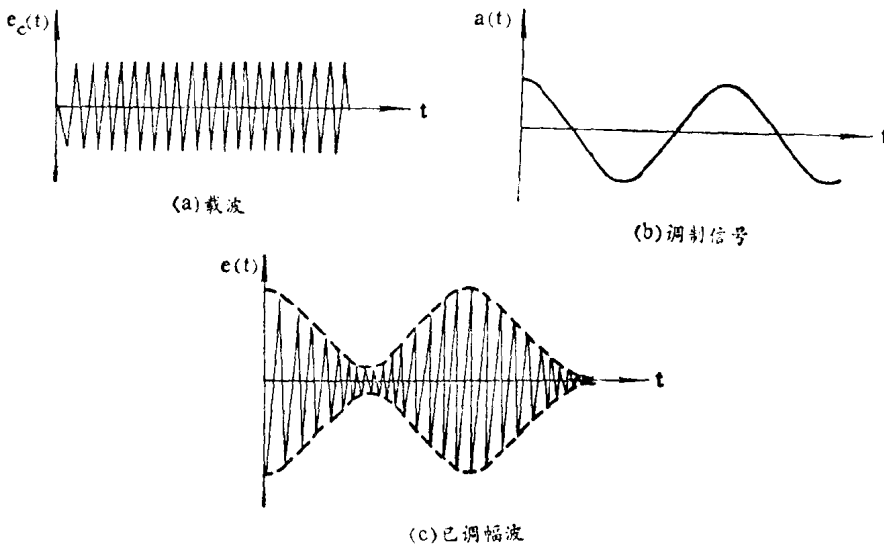


图1.1-1 调制信号及调幅振荡

波形)和调制信号的形状完全一样，其载频仍维持不变，但其振幅较之未调制振荡(载波)的振幅多了一个与调制信号成比例的增量，即调幅振荡的表示式可写为

$$e(t) = A(t) \cos(\omega_c t + \varphi_c) = [A_c + Ka(t)] \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.1-3)$$

式中， K 是比例系数， $a(t)$ 是调制信号。可见上式所表示的光载波振荡的振幅变化已包含了欲传递信号 $a(t)$ ，也就是说调制信号 $a(t)$ 已被加载到光载波上了。幅度调制的程度常用调幅系数表示，它定义为调幅振荡中振幅最大增量与振幅平均值之比，即

$$m = \frac{\Delta A}{A_c} = \frac{A_{\max} - A_c}{A_c} = \frac{A_c - A_{\min}}{A_c} \quad (1.1-4)$$

由上式可见，调幅系数 m 不能大于1。若 $m > 1$ 则调幅波就要发生畸变，这样的已调波经解调之后，就得不到原来的调制信号。

为了讨论方便, 设调制信号是正弦变化的, 即 $a(t) = A_o \cos \omega_m t$ 。式中 A_o 、 ω_m 分别为调制信号的振幅和角频率。把它代入(1.1—3)式, 得到已调幅振荡的瞬时值为

$$e(t) = [A_c + KA_o \cos \omega_m t] \cos(\omega_c t + \varphi_c)$$

将 KA_o 记为 ΔA , 且令 $\frac{\Delta A}{A_c} = m$, 则已调幅振荡的表示式可改写为

$$e(t) = A_c [1 + m \cos \omega_m t] \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.1-5)$$

根据以上讨论可见, 调幅的结果, 其载波的角频率和初相位均保持不变, 振幅却已发生了变化, 即调幅波不再是一个简单的正弦波形。按照傅里叶分析法, 它可分解为许多不同频率的正弦振荡之和, 故已调幅振荡就具有一个频谱。现仍以最简单的正弦调制为例进行分析, 利用三角函数关系, 式(1.1—5)可写成如下形式:

$$\begin{aligned} e(t) &= A_c [\cos(\omega_c t + \varphi_c) + m \cos \omega_m t \cos(\omega_c t + \varphi_c)] \\ &= A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + \frac{mA_c}{2} \cos [(\omega_c + \omega_m)t + \varphi_c] \\ &\quad + \frac{mA_c}{2} \cos [(\omega_c - \omega_m)t + \varphi_c] \end{aligned} \quad (1.1-6)$$

由该式可知正弦调制的调幅波是由三个不同频率的正弦波组成。式中的第一项为载波分量, 就是原来的频率为 ω_c 的未调制振荡。第二、三两项相当于因调幅过程而产生的新振荡, 称为边频分量, 它们的频率分别为 $(\omega_c + \omega_m)$ 和 $(\omega_c - \omega_m)$ 。这两个边频的幅度相等, 都等于未调制振荡幅度的 $m/2$ 倍, 它们的相位对称于载频振荡的相位, 其频谱如图1.1—2所示。由图可见, 调幅振荡的频谱是不连续的, 两边频分量对称地排列在载频分量的两侧, 其频谱宽度等于调制频率的二倍。

如果调制信号是一个复杂的周期性信号, 则已调幅振荡的频谱将是由载频分量 and 对称的两个边频带(若干边频分量)所组成。

2. 频率调制和相位调制(简称调频和调相) 调频或调相就是激光载波的频率或相位受调制信号的控制而变化的振荡。因为这两种已调振荡都表现为总相角 $\varphi(t)$ 的变化, 因此统称为角度调制。如图1.1—3所示。

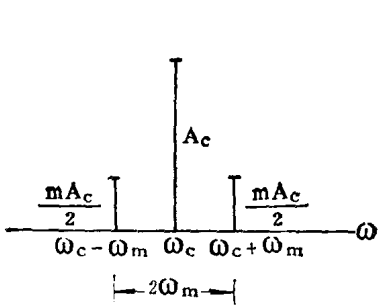


图1.1—2 正弦调制的调幅频谱图

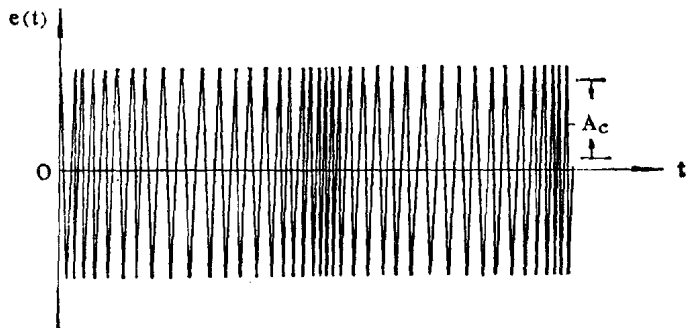


图1.1—3 调角振荡

如果是频率调制, 则已调振荡的角频率较之未调制时的角频率有一个与调制信号成比例的增量, 即已调振荡的总相角为

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \varphi_c = \int_0^t [\omega_c + K_f a(t)] dt + \varphi_c$$

$$= \omega_c t + \int_0^t K_f a(t) dt + \varphi_c \quad (1.1-7)$$

式中, K_f 为比例系数, $a(t)$ 为调制信号, 将式 (1.1-7) 代入式 (1.1-1), 就得到已调频振荡的表示式为 $e(t) = A_c \cos \psi(t) = A_c \cos [\omega_c t + \int_0^t K_f a(t) dt + \varphi_c]$ 。由此式可看出: 已调频振荡的振幅和初相位均保持不变, 而角频率在 ω_c 之外还有一个按规律 $K_f a(t)$ 随时间变化的增量, 说明频率已得到了调制。

若调制信号为正弦变化 $a(t) = A_0 \cos \omega_m t$, 将其代入式 (1.1-7), 并且令 $K_f A_0 = \omega_d$ 且 $\frac{\omega_d}{\omega_m} = m_f$, 则

$$\psi(t) = \omega_c t + m_f \sin \omega_m t + \varphi_c \quad (1.1-8)$$

于是正弦调制的已调频振荡的表示式为

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

其中 ω_d 称为频移的幅值(是指频率变化时, 相对于中心频率的偏离程度), m_f 称为调频系数, 可取任意值。

同样, 对相位调制来说, 其已调振荡的相位多了一个与调制信号成比例的增量, 所以已调振荡的总相角为

$$\psi(t) = \omega_c t + \varphi_c + K_\phi a(t) \quad (1.1-10)$$

若调制信号是正弦变化的 $a(t) = A_0 \sin \omega_m t$, 代入式 (1.1-7), 则

$$\psi(t) = \omega_c t + \varphi_c + K_\phi A_0 \sin \omega_m t \quad (1.1-11)$$

令 $K_\phi A_0 = m_\phi$ 为调相系数, 这时角频率为

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \omega_c + K_\phi A_0 \omega_m \cos \omega_m t = \omega_c + m_\phi \omega_m \cos \omega_m t \quad (1.1-12)$$

于是正弦调制的已调相振荡的表示式为

$$e(t) = A_c \cos \left[\int_0^t \omega(t) dt + \varphi_c \right] = A_c \cos [\omega_c t + m_\phi \sin \omega_m t + \varphi_c] \quad (1.1-13)$$

由式 (1.1-13) 可知, 已调相振荡的振幅和频率均保持不变, 而初相位在 φ_c 之外有了一项增量, 这说明调制信号 $a(t)$ 通过调相已加载于载波了。

从以上对调频和调相的简单分析可以看出: 正弦调制下的调频和调相的表示式在形式上是相同的, 即两者对改变光载波的总相角是等效的, 这从式 (1.1-8) 和式 (1.1-11) 就可清楚地看出来。但调频和调相却是区别的: 其一, 两者的调制方法截然不同; 其二, 调频系数 ($m_f = \omega_d / \omega_m$) 与调相系数 ($m_\phi = K_\phi A_0$) 的性质不同。

角度调制的频谱也可分解为若干不同频率的正弦振荡之和。例如, 我们将在正弦调制情况下调角振荡的式 (1.1-9) 或式 (1.1-13) 展成如下形式

$$e(t) = A_c [\cos(\omega_c t + \varphi_c) \cos(m \sin \omega_m t) - \sin(\omega_c t + \varphi_c) \sin(m \sin \omega_m t)] \quad (1.1-14)$$

此振荡乃时间的周期性函数, 故可分解为傅里叶级数。

当调制系数比较小, 即 $m \ll 1$, 则可认为 $\cos(m \sin \omega_m t) \approx 1$, $\sin(m \sin \omega_m t) \approx m \sin \omega_m t$ 。于是式 (1.1-14) 可写为

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

$$-\frac{mA_c}{2} \cos[(\omega_c - \omega_m)t + \varphi_c] \quad (1.1-15)$$

由此可知，当调制系数很小时，调角振荡的频谱和调幅振荡的频谱一样，也是由角频率为 ω_c 的载频分量和角频率为 $\omega_c \pm \omega_m$ 的两个边频分量所组成。

当调制系数 m 很大时，则必须将式(1.1—14)用贝塞尔函数展开，可以证明这时的已调振荡的频谱系由多个边频组成。

3. 强度调制 强度调制是光载波电场振幅的平方比例于调制信号，即 $A_c^2 \propto a(t)$ 。使输出的激光辐射强度按照调制信号的规律变化，如图1.1—4所示。强度调制在许多书中就叫做幅度调制，因为强度调制器和幅度调制器在构造上并没有什么区别；这主要取决于对调制光的检测方法。激光调制通常多采用强度调制型式，就是因为光接收器(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。

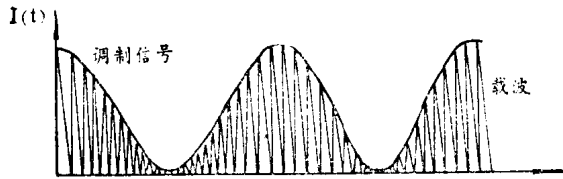


图1.1—4 强度调制

瞬时光载波的强度定义为电场的平方，其表示式为

$$I_0(t) = e^2(t) = A_c^2 \cos^2 \omega_c t \quad (1.1-16)$$

于是已调制光强的表示式则为

$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + K_p a(t)] \cos^2 \omega_c t \quad (1.1-17)$$

若调制信号是正弦变化的，即 $a(t) = A_0 \sin \omega_m t$ 。

则式(1.1—17)即可写为下列形式

$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + K_p A_0 \sin \omega_m t] \cos^2 \omega_c t$$

式中 K_p 为比例系数，令 $K_p A_0 = m_p$ 为强度调制系数。则

$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + m_p \sin \omega_m t] \cos^2 \omega_c t \quad (1.1-18)$$

这是当调制系数 $m_p \ll 1$ 时，比较理想的强度调制公式。

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，即先将欲传递的低频信号对一高频副载波振荡进行频率调制，然后把调频后的副载波再进行光的强度调制，使光的强度按照副载波信号发生变化。这是因为传输过程的大气抖动，会直接叠加到光信号上，因而经检测后的电信号同样会受到幅度抖动的干扰。而调频信号则是对频率的变化发生响应，而对幅度变化有较强的抗干扰能力。所以在光通信等应用中，一般都不采用直接强度调制，而是采用副载波进行光强度调制的方式。

4. 脉冲调制与脉冲编码调制 上述几种调制型式所得到的已调波都是一种连续振荡。另外，还有一种工作在不连续状态的脉冲调制和脉码调制型式。

(1) 脉冲调制 即是用一种断续的周期性脉冲系列做为载波，这种载波受到调制信号的

控制,使脉冲的幅度、位置、频率等随之发生变化(调制)而传递信息。

脉冲调制的型式主要有以下几种:脉冲调幅(PAM)、脉冲强度调制(PIM)、脉冲调频(PFM)、脉冲调位(PPM)及脉冲调宽(PWM)等。如图1.1—5所示。

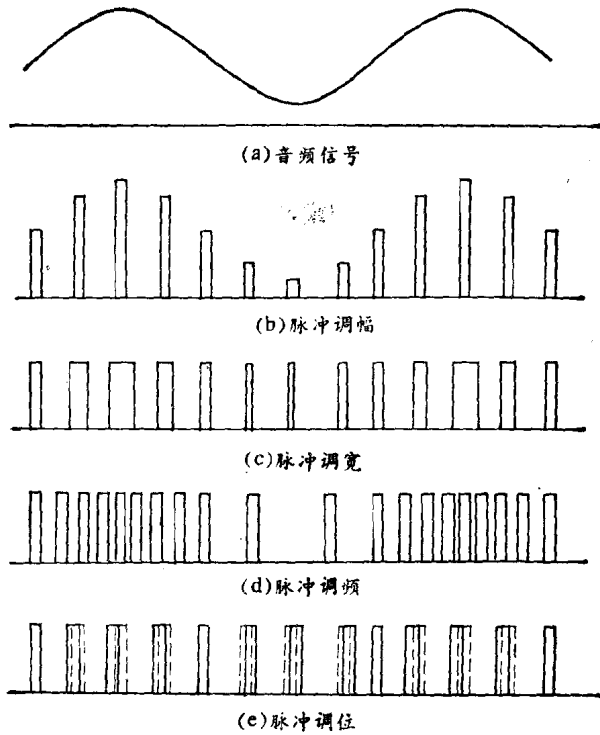


图1.1—5 脉冲调制型式

脉冲调幅是以调制信号控制脉冲系列的幅度,使其发生周期性的变化,而持续时间和位置均保持不变,如图1.1—5(b)所示。脉冲调幅波的表示式为

$$e(t) = \frac{A_c}{2} [1 + M(t_n)] \cos \omega_c t \quad (\text{当 } t_n \leq t \leq t_n + \tau) \quad (1.1-19)$$

式中, t_n 为信息取样时间, τ 为脉冲宽度, $M(t_n)$ 是信息的振幅,它可以是连续的或量化的。

脉冲强度调制即是脉冲载波的强度比例于调制信号的振幅而变化。其表示式为

$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + M(t_n)] \cos^2 \omega_c t \quad (\text{当 } t_n \leq t \leq t_n + \tau) \quad (1.1-20)$$

如果用调制信号只改变其脉冲列中每个脉冲产生的时间,而不改变其形状和幅度,且每个脉冲产生时间的变化量仅比例于调制信号电压的幅度,而与调制信号的频率无关,这种调制称为脉位调制,如图1.1—5(e)所示。其脉位调制波的表示式为

$$e(t) = A_c \cos \omega_c t \quad (\text{当 } t_n + \tau_d \leq t \leq t_n + \tau_d + \tau) \quad (1.1-21)$$

脉冲前沿相对于取样时间 t_n 的延迟时间为 $\tau_d = \tau_f [1 + M(t_n)] / 2$ 。为了防止脉冲重叠到相邻的样品周期,所以脉冲的最大延迟必须小于样品周期 τ_f 。

若调制信号使脉冲的重复频率发生变化,频移的幅度比例于信号电压的幅值,而与调制

频率无关，这种调制称为脉冲调频，如图1.1—5(d)所示。脉冲调频波的表示式可写为

$$e(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + \omega_d \int M(t_n) dt \right] \quad (\text{当 } t_n \leq t \leq t_n + \tau) \quad (1.1-22)$$

脉冲调位与脉冲调频都可以采用宽度很窄的光脉冲，光脉冲的形状不变，只是脉冲位置或脉冲重复频率随调制信号变化。这两种调制型式具有较强的抗噪声能力，故目前在半导体激光通信中得到较广泛应用。

(2) 脉冲编码调制 (PCM) 这种调制是用“有”脉冲和“无”脉冲的不同排列形式(即编码信号)来表示各个时刻的模拟信号(如语音、电视等信号)的瞬时值；也就是先把模拟信号转换成脉冲系列，进而再变成代表信号的代码(脉冲有、无的组合)来传递信息的。

要实现脉码调制必须经过三个过程：即抽样、量化和编码，如图1.1—6(a)所示。

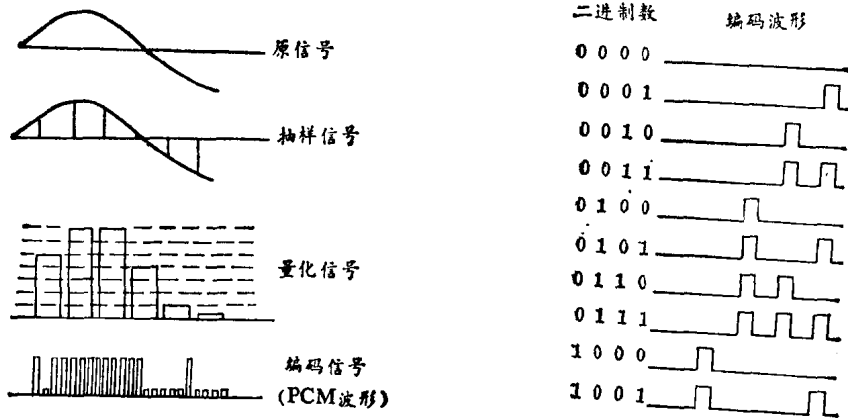


图1.1—6 脉码调制的三个过程

抽样：即是把连续的信号波分割成不连续的脉冲系列，用一定周期的脉冲列来表示，且脉冲列(称为样值)的幅度是与信号波的幅度相对应。也就是说，通过抽样之后，原来的模拟信号变为一脉幅调制信号。按照抽样定理，只要取样频率比所传递信号的最高频率大二倍以上，就能恢复原信号波形。

量化：就是把抽样之后的脉幅调制信号做分级取“整”处理，用有限个数的代表值来取代抽样值的大小，这个过程就叫量化。所以抽出来的样值通过量化这一过程才能变成数字信号。

编码：通过量化变成用数字表示的信号，再把这种信号转换成相应的二进制代码的过程叫做编码。即用一组等幅度、等宽度的脉冲作为“码子”，用“有”脉冲和“无”脉冲分别表示二进制的数码“1”和“0”，如图1.1—6(b)所示。

总之，脉码调制是先将连续的模拟信号通过抽样、量化和编码，转换成一组二进制脉冲代码，用幅度和宽度相等的矩形脉冲的有、无来表示。再将这一系列反映数字信号规律的电脉冲加在一个调制器上以控制激光的输出，由激光载波的极大值代表信息样品振幅二进制编码的“1”比特，而用激光载波的零值代表“0”比特。这样用码子的不同组合就可以表示欲传递的信息信号。这种调制型式也称为数字强度调制(PCM/IM)。