

# 激光调频技术的发展

四川大学物理系 曾传相  
中国科学院物理研究所 王联治

## 一、引言

在科学技术的许多领域,诸如光谱学、无线电电子学、光化学以及医学、生物学中,都需要可调频的相干电磁辐射源。然而,在广阔的电磁波谱中,过去只有在无线电波段上才有可调频的辐射源,即各种电子振荡器。在激光技术出现之前,在光波范围中尽管有形形色色的光源,然而没有哪种是可调频的。为了得到不同频率的单色光,通常是利用分光及滤波方法来实现的。但由此得到的光波,单色性很差,强度很低,远不能满足科学技术发展的需要。

激光技术的出现,为我们提供了具有高度单色性、相干性、方向性和高强度的光源——激光器。然而激光一般限于激光器工作物质的一些分立谱线上,对一定的工作物质而言,我们所得到的频谱是很有限的。显然,如果把它作成象电子振荡器一样能使辐射频率可调的话,则将会给科学技术的许多领域带来新的有力工具。

十多年来,这个领域已经取得了重大的进展,产生了许多种调频技术,有的已成功地得到实际应用<sup>[1,2]</sup>。本文对这个重要领域的发展概况和可能的应用作一简略的评述。

## 二、激光调频技术的特殊性

毛主席教导我们:“对于物质的每一种运动形式,必须注意它和其他各种运动形式的共同点。但是,尤其重要的,成为我们认识事物的基础的东西,则是必须注意它的特殊点,就是说,注意它和其他运动形式的质的区别。”(《矛盾论》)无线电调频和激光调频,都是通过某种手段实现频率调制,这是他们的共性。但是,当相干辐射源从无线电波振荡器过渡到激光时,由于器件在工作原理上有着本质不同,从而在调频技术上必须也有着质的差异。

我们先回顾一下无线电波调频技术。无线电波振荡器本质上是利用载流子在直流场中运动,以其动能同电磁波进行能量交换来放大和产生相干无线电波的。它的振荡频率由器件的谐振结构所决定。由于载流子动能没有量子化,即可连续变化,故我们连续改变振荡器的谐振结构参量就可达到连续调频的目的,而调频技术同载流子在放大元件中的运动情况关系不大。当然,在广阔的无线电波段,随着波长的缩短,器件的谐振结构从无线电长波侧的 $LC$ 回路过渡到微波区域的谐振腔,谐振结构有了重大变化,由改变谐振结构来改变频率的作用也在缩小。但器件的振荡频率主要由谐振结构决定这一本质并未改变。

然而,在激光器中情况则大不一样。它是借助于原子、分子系统中电子在能级间作量子跃迁时的感生辐射过程来产生相干光波的。在此过程中,它利用了粒子在能级间跃迁位能的跳

跃式变化。由于原子、分子的位能是量子化了的,不能连续变化,故工作物质一定时,它所产生的频率也就限于该物质的一些相应的分立谱线上。改变工作物质只能得到另外不同谱线,如同无线电波段中,不同频段上用不同电子管一样。激光器的工作频率主要由工作物质的能谱结构和谐振腔二者决定,而且在一般情况下前者起主导作用,谐振腔只能局限在谱线线宽范围内进行频率选择。这就造成激光调频技术与无线电波调频技术的根本不同。激光调频同放大元件的能级结构或光在放大元件中的传播性质有密切关系,不能仅仅通过改变谐振腔参量实现大范围连续调频。

根据激光器的基本原理、频率特性以及已有的无线电调频方式的知识,我们不难想像在激光技术中,原则上可用下面几大类方式实现调频:

(i) 以某种外加作用,例如电场、磁场、温度、压力等,改变原子、分子系统中产生激光跃迁的能级间隔。这种方式看来是可行的,但在许多工作物质中,靠外来作用改变能级间隔往往是很有限制的,一般只能实现小范围调频<sup>[3]</sup>。然而在某些半导体激光器中情况往往有点例外,由于禁带宽度随压力、温度、磁场、激励强度、半导体成份等因素有较大的变化,故可在较大范围内调频。

(ii) 选用发光带宽的工作物质,或设法使发光带窄的物质的发光带加宽;用改变谐振腔结构参量或腔内加选频元件进行调频。调频范围显然由发光带的宽度决定。目前广泛使用的染料激光器,就是利用荧光染料的宽带结构。而在一些气体激光器如二氧化碳激光器中,则用增高气压使能级产生碰撞加宽。

(iii) 利用激光在非线形介质中的参量相互作用实现调频。将激光通过非线性光学介质,利用它的非线性极化特性,在介质中产生光波与光波或光波与声波的参量相互作用,以实现调频。目前广泛使用的倍频、混频、光参量振荡器和自旋反转喇曼激光器,都属于这种方法。此外,也利用其他一些物理效应,如利用电光、声光效应调制激光,利用从声波产生激光的布拉格衍射,利用多普勒效应等,产生小范围的调频<sup>[3]</sup>。

上述三大类方式本质上是不大一样的。第一类方法是涉及改变激光工作物质的能级结构;第二类方式同时涉及到工作物质的能级结构及外加的选频元件;第三类方式同能级结构无关。

### 三、主要的激光调频技术

前述的三类调频方式是按其本质来分类的,但从使用角度着眼,我们可把已有的调频方式分成两大类,即大范围调频和小范围调频。小范围调频在实用中有一定的局限性,我们感兴趣的是大范围连续调频。

#### 1. 调频染料激光器

在大力寻求激光器的新工作物质时,有许多人很早就想到用种类繁多的荧光染料作激光工作物质。然而,由于一般荧光染料能级结构及光谱性质很复杂,故最初的企图没有成功,直到1966年用激光快速激励染料取得成功时,才在染料中获得激光<sup>[4]</sup>。随后这方面的工作大力开展起来,取得了相当大的进展。

染料激光器有大量的荧光染料作为工作物质,染料分子的荧光波长主要决定于分子中碳原子键的长度,故可通过适当的选择染料,在从近紫外到近红外波段几乎所有的波长上都可获

得强相干光。更主要的是荧光染料分子共轭链的电子态比原子或离子的电子态有范围宽得多的能量,因此一般有宽的荧光带。通过改变染料溶液的状况或改变腔的结构和参量或腔内加选频元件,就可方便地把单一染料激光器的波长,在几百埃甚至上千埃范围内连续调频。并且在调频时,宽线变为窄线,宽线中的大部分能量聚集到窄线中去,不会因线宽变窄而对输出能量有过大影响。同光参量振荡相比,它是一种在可见光区域较为简便和价廉的调频光源;同固体激光器相比,它制备简单、种类多;同气体激光器相比,它的发光中心浓度高,增益大;它还具备液体激光器的其他一些优点,如可循环冷却,体积不受限制等。但是荧光染料的荧光寿命一般为毫微秒量级,加之三重态对发光性质影响很大,故对泵浦方式上有一些特殊要求。

染料激光器的性质主要取决于荧光染料的性质及泵浦方式。

在目前所知的上千种染料中,有许多是可发荧光的。染料激光器是利用染料分子的电子跃迁,这些染料分子的分子量通常是几百,他们并不溶于溶剂中,大多数情况下,激光器溶液是染料加上纯的溶剂。溶液的光谱性质由染料本身的物理、化学结构以及它们同溶剂的相互作用情况所决定。对不同的染料来说,其吸收光和发射光的波长、宽度、强度及光谱结构是不一样的;对于同一种染料,上述情况随制备溶液的溶剂、浓度、温度、激励光强和时间、染料盒的几何因素等不同也有很大变化。尽管荧光染料的能级结构和光谱性质比较复杂,但大多数荧光染料具有下列性质:

(1) 从光吸收性质来看,荧光染料有宽而强的主吸收带。它是由基态电子的自旋单重态  $S_0$  向激发态的单重态  $S_1$  跃迁而形成的。由电子态相应的振转能级结构形成带宽一般为  $1000 \text{ 厘米}^{-1}$  的近乎连续的能带。吸收光谱通常处于可见光和紫外区,其带宽通常是几十毫微米。

(2) 从发射光谱来讲,从激发态的单重态  $S_1$  向基态单重态  $S_0$  跃迁形成宽的荧光带,荧光寿命通常短达毫微秒量级。跃迁几率很高,通常  $S_0$  与  $S_1$  间只有快激励才能实现粒子数反转。一旦反转,就会有高的增益。荧光的量子效率因外界条件而异,在多数情况下其值可接近于 1。由于振转能级间存在无辐射跃迁,所发荧光峰值波长比主吸收峰值波长长,有个斯托克斯位移。

(3) 染料的激发态三重态  $T$  对染料的发光情况有重大影响,最低的激发态三重态  $T_1$  的寿命较长,为毫秒量级,从  $S_1$  过渡到  $T_1$  的粒子积累,减小了从基态  $S_0$  向  $S_1$  的激励,对产生  $S_1$  向  $S_0$  的荧光跃迁不利。 $S_1 \rightarrow T_1$  过程的寿命大约为  $5 \times 10^{-8}$  秒,如果没有移去  $T_1$  上粒子的措施,几乎所有的粒子都可积聚到  $T_1$  上。更为严重的是,  $T_1$  的粒子向更高的三重态  $T_2$  跃迁时的吸收带,一般与荧光带重叠,给  $S_1$  向  $S_0$  的激光跃迁带来重大损耗,故应尽可能减小  $T_1$  态上的粒子数积累。方法有两个:一是用快速激励,使  $T_1$  态上未积累大量粒子之前就在  $S_1$  和  $S_0$  之间实现反转,产生激光。显然这是一种消极的方法,它对泵浦有很高的要求;另一种方法是加一些物质即所谓淬灭剂,减小  $T_1$  态的寿命,这是一种有效的积极方法,对产生连续的染料激光有更大作用。通常是在溶液中加入氧气,使其饱和,因氧是顺磁分子,它可增大从  $T_1$  到  $S_0$  自旋禁戒跃迁的几率。此外也用  $C_8H_8$  等其他物质作淬灭剂。

综上所述,可看出荧光染料的光谱学性质一方面为调节激光器工作波长提供了方便,但另一方面也对泵浦方法及溶液的制备提出了一些特殊要求。

染料激光器的激励方法可分为两大类:一是快速脉冲激励;一是用连续激光进行激励。由于染料的光谱学特性,用快速脉冲激励时,一般容易得到振荡。常用的脉冲激励方式中,一种是用激光器的巨脉冲,常用的有掺钕的钇铝石榴石或钕玻璃激光器的二次、四次谐波(5300 埃、2650 埃),红宝石激光及其二次谐波(6943 埃、3472 埃),氮分子激光(3371 埃)等高功率巨

脉冲激光。特别是用氮分子巨脉冲激光激励染料,因它是紫外激光,可在整个可见光区域中产生染料激光<sup>[5,6]</sup>。另一种脉冲激励是用特殊氙灯或氩弧进行快速脉冲激励,一般要求光源发光上升迅速,峰值功率较高<sup>[7,8]</sup>。但有的染料用发光时间为几百微秒的普通氙灯来激励也是可以的。此外,考虑到染料需要良好的循环冷却及防止其光照变质等因素后,用氩激光器等作连续激励,已获得一定的结果<sup>[9,10]</sup>。按激光入射方向同染料激光腔轴线的关系可以把激光激励的方法具体地分为纵向、横向及斜入射等三种。而闪光灯及氩弧激励同普通光泵浦激光器相似。

此外用染料蒸汽发射的激光器已获得 30 千瓦的输出脉冲<sup>[11,12]</sup>,同时用染料也作成了波导超辐射染料激光器<sup>[13]</sup>。染料循环除了用染料管,还大量使用喷流技术,用喷嘴代替染料盒,以便进一步减小损失,降低阈值<sup>[14]</sup>。

调频方式一般有下面几种:

(1) 使染料激光器的共振腔对波长有大的选择性。方法是用衍射光栅代替腔的一个反射镜,使腔的  $Q$  值只对某一波长较高,转动光栅就可改变谐振波长,实现调频。

(2) 腔内加选频元件,通常加色散棱镜和标准具。

(3) 改变染料的溶剂浓度、温度、腔损耗、染料盒长度等因素也会改变波长。但比起前二种方法来,改变这些因素较麻烦,使用上不方便。此外每种染料一般在几十毫微米范围内调频,个别的可近于 200 毫微米。放大范围连续调频时一般需要调换多种染料,才能复盖宽的频带。目前在近紫外区用的是 PPO、 $\alpha$ NPO 等染料;在可见光区域用的是荧光素、若丹明、香豆素、吡啶等染料;在近红外区用的是多甲川等染料。现在用作激光器工作物质的染料达数百种之多<sup>[15,16]</sup>。

由于人们大力研究的结果,染料激光器在国际上已是一种较成熟的调频光源。调频范围主要限于从近紫外到近红外,更换多种染料可能从 340 毫微米调到 1200 毫微米。脉冲激励的染料激光器已获得几瓦的平均功率、10 兆瓦量级的峰值功率<sup>[17]</sup>。用氮激光器激励时,脉冲重复率高达 500 赫量级,用火花激励已做到 2000 赫<sup>[18,19]</sup>。连续工作的染料激光器主要用氩激光激励,用若丹明、荧光素等染料作工作物质,输出功率已达瓦的量级<sup>[10]</sup>。无论脉冲工作还是连续调频染料激光都获得了 1.5~5 微微秒脉宽的锁模脉冲序列。激光泵浦的脉冲和连续染料激光器的转换效率一般在 10~50%。闪光灯激励的染料激光器的电能转换效率在 0.1~1%。

染料激光目前存在光化变质及谱线较宽等问题,解决这方面的问题是目前努力的方向之一。此外从染料激光器发展的趋向来看,一方面在把染料激光向红外和紫外扩展,为此在积极探索新染料及其他频率变换技术;另一方面在积极发展染料的泵源如电子束激励染料蒸汽,可能获得效率为 70% 以上的激光器件及快速调频技术。上述几方面问题的解决,将使染料激光更加完善。

## 2. 光参量振荡器

在无线电电子学中,利用非线性电子元件来产生电磁波间的参量耦合是一种熟知的现象。利用它可将一束强的泵频  $\omega_p$  分解成信号频率  $\omega_s$  和闲散频率  $\omega_i$ 。它们间满足关系  $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 。改变非线性元件的参量就可调节  $\omega_s$ ,从而也调节了  $\omega_i$ 。在光频中原则上也会有这样的现象。不过必须用非线性光学材料代替电子学中的非线性电子元件。因此在激光器出现不过两年的时间就有人提出光参量振荡器方案来调激光频率。经过几年的努力,在 65 年有些人差不多同时各自独立地分别在 ADP 晶体和  $\text{LiNbO}_3$  晶体中获得参量振荡<sup>[19,20]</sup>。前者用改变匹配角的

方法,后者用改变温度的方法来调频。

我们知道,当强光作用于非线性物质时,物质的电极化  $\mathbf{P}$  同光的场强  $\mathbf{E}$  成非线性关系,即  $\mathbf{P} = \chi_1 \mathbf{E} + \chi_2 \mathbf{E}^2 + \chi_3 \mathbf{E}^3 + \dots$ , 它的头一项产生传统光学中的线性光学现象,从第二项起就会产生所谓非线性光学现象。例如它的二次项就会出现激光倍频、混频、差频、光参量放大等现象。这几种现象都可用来变换激光频率,不过前三种产生跳跃式的大变化,但与连续可调频激光配合也可产生新频段上连续调频激光。第四种可大范围连续调频。

如果有三束角频率分别为  $\omega_p$  (泵频)、 $\omega_s$  (信号频率) 和  $\omega_i$  (闲散频率) 的单色光,其中  $\omega_p$  光强很强,并且它们满足条件:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_i \quad (2)$$

则会产生泵频光能量向信号和闲散频率光转换。就是说它们产生放大。这里,  $\mathbf{k}$  为光的波矢,  $\mathbf{K} = \frac{n\omega}{c} \mathbf{k}$  ( $\mathbf{k}$  为单位波矢), 其方向为光波传播方向。这种现象可看成泵光的光子同信号与闲散光子通过非线性介质产生相互作用。条件(1)相当于能量守恒,条件(2)相当于动量守恒。

第二条件可写为:

$$n_p \omega_p \mathbf{k}_p = n_s \omega_s \mathbf{k}_s + n_i \omega_i \mathbf{k}_i \quad (2a)$$

$n_p$ 、 $n_s$ 、 $n_i$  分别为泵光、信号光和闲散光在非线性介质中的折射率。显然从(1)和(2a)不难看出,当  $\omega_p$  和折射率  $n$  一定时,  $\omega_s$  和  $\omega_i$  就一定。如果能用某种方法连续改变非线性介质的折射率,那末就可能改变  $\omega_s$  从而改变  $\omega_i$ 。例如在  $\text{LiNbO}_3$  中改变温度和在  $\text{ADP}$  中改变角度就可作到这点。当然把光参量放大元件放入相应的谐振腔中就可作为光参量振荡器。

在光参量振荡器中,非线性光学元件是关键,对它的要求是二次项非线性极化率  $\chi_2$  要尽可能大;对调频范围内三种光透明性都要好,能以某种方式满足位相匹配条件(2);另外能制成具有一定尺寸和较高光学均匀性的元件。目前所用的晶体主要有  $\text{ADP}$ 、 $\text{KDP}$ 、 $\text{LiIO}_3$ 、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  等非线性晶体。前三种为水溶液生长晶体,体积可长得较大,均匀性好,但它们都易潮解,并且  $\text{ADP}$ 、 $\text{KDP}$  非线性系数较小;后二者由提拉法生长,尺寸较小,光学质量较难保证,但非线性系数较大。

光参量振荡器的激励可分为脉冲激励与连续激励两种类型。脉冲激励一般用红宝石激光、钕玻璃激光和钇铝石榴石激光的二次谐波。同时有人用  $\text{HF}$  激光器等激励  $\text{CdSe}$  光参量振荡器,获得远红外大幅度调频<sup>[221]</sup>。其中以重复脉冲的  $\text{YAG:Nd}$  激光的倍频作泵源用得最多。连续泵浦主要用氩激光或连续  $\text{YAG:Nd}$  激光倍频作泵源,对泵光除了要求有高的强度外,还要求模式单一。

初期的光参量振荡器效率极低,通过非线性元件和泵浦技术的改进,目前脉冲激励的光参量振荡器转换效率可达 75%<sup>[221]</sup>。连续工作的光参量振荡器转换效率已达百分之几<sup>[231]</sup>。脉冲工作的光参量振荡器已实现从红外到可见光区的调频,最长波段已达到 9.5~24 微米<sup>[21]</sup>。连续工作的光参量振荡器由于受到激励光源的限制,相对来说调频范围要小些,但在可见光区和红外区也实现了几百毫微米调频<sup>[241]</sup>。

光参量振荡器比起染料激光器来,技术较复杂,对光源及非线性材料要求较高,价格昂贵,但它工作频段较染料激光器宽,而且稳定,特别是在红外区,更是如此。光参量振荡器的发展,有待于优良的非线性晶体材料的研究和泵浦技术的改进。

### 3. 其他调频激光器

目前除了调频染料激光器和光参量调频器件研究较多而又取得了重要的进展之外, 由于它们存在一些问题, 诸如染料激光器在波长大于1微米时, 器件变得很不稳定; 在波长短于蓝色区域后, 用于光参量振荡器的透明非线性材料很少。因此, 为了满足调频技术的需要, 还大力开展了如下几种调频激光的研制, 并取得了相当大的进展。

#### (1) 压力加宽可调频激光器

最近几年来由于横向激励技术的出现, 分子气体激光器在向超大气压工作方向发展。这一方面固然是为了在单位体积中获得更高的储能, 从而有更大的输出, 但另一个重要着眼点在于超大气压器件可使分子的各个振转跃迁产生碰撞加宽, 以便实现调频。例如对二氧化碳激光器而言,  $00^{\circ}1$  到  $10^{\circ}0$  的激光跃迁, 相邻线间隔约  $1.8 \text{ 厘米}^{-1}$ , 增高压力时各条线的半宽度以5千兆赫/大气压的速率增大, 在10个大气压下各条谱线就会重迭, 有可能得到约  $30 \text{ 厘米}^{-1}$  的调频宽度。调频方式类似于染料激光器, 可用衍射光栅代替一个反射镜或在腔内加色散元件等。在资料[25]中已在15个大气压下工作的  $\text{CO}_2$  激光器获得  $20 \text{ 厘米}^{-1}$  的调频。目前用电子束产生电离, 已使  $\text{CO}_2$  激光器能在50个大气压下工作<sup>[26]</sup>。

#### (2) 调频喇曼激光器

我们知道, 激光入射于可产生喇曼散射的物质时, 当光强超过一定限度后, 会产生具有激光基本特性的受激喇曼散射, 散射光的强度同入射光强差不多。它所产生的频移由散射物质的有关能级间隔决定。显然, 改变散射物质就可得到不同的散射频率, 但这是不连续调频。当把磁场加到有的半导体上时, 就可产生朗道能级间的喇曼跃迁, 利用连续改变磁场大小的方法, 就可产生能级间隔大小的连续变化, 使散射光的频率连续改变, 在资料[27]中用  $\text{CO}_2$  激光  $10.6$  微米波长激励  $\text{InSb}$ , 用这种方法得到  $10.9 \sim 13.0$  微米的调频。附带说几句, 利用绝缘体中的极子产生光的散射, 由于极子能量依赖于散射角, 故改变晶体的角度可使散射光连续调频。资料[28]中已使红宝石激光在  $\text{LiNbO}_3$  中在  $50 \sim 238$  微米的波长范围内调谐。

#### (3) 调频半导体激光器

在有些半导体材料中, 由于能带宽度随温度压力、磁场强度及半导体的成份等因素而有较大变化, 故可用作大范围调频。在资料[29]中,  $\text{PbSe}$  通过在  $77^{\circ}\text{K}$  的温度下加压实现  $7.5 \sim 11$  微米间的调频。又如一些混晶半导体如  $\text{Ga}(\text{As}_x\text{P}_{1-x})$  和  $(\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x})\text{Te}$  等通过改变混晶比就可在大范围内改变振荡波长。

除上述几种调频激光器之外, 近来还大力开展用倍频、混频、差频法来做激光器<sup>[30]</sup>。显然, 如产生倍频的光, 或产生混频光中的一束光是可连续调频的, 则通过倍频和混频可在新的频段内得到调频光。前述几种调频方法无法复盖的波段, 可用这种方法与他们相配合来扩展频段。

目前还用晶体中的色心来作调频激光器<sup>[31]</sup>。用  $\text{Kr}^+$  激光器的波长为  $6471$  埃的连续工作激光射入  $\text{KCl}:\text{Li}$  晶体上, 该晶体的  $F_A(\text{II})$  色心有两条宽的吸收带连成一片, 复盖红、蓝、绿可见光区。  $F_A(\text{II})$  色心吸收光后快速驰豫到新能级, 这个新能级产生  $2.6 \sim 2.8$  微米的可调激光。调频方式类似于染料激光器, 但它显然较染料激光器工作更稳定。

## 四、调频激光器的应用

由于科学技术的许多领域对调频激光有着强烈的内在要求, 所以激光调频技术很快在许

多科学技术中得到了重要应用。可把它概括成如下几个方面:

### 1. 调频激光在激光光谱学中的应用

把调频激光用于光谱学,能为这门学科提供一种重要的工具,大大扩充了光谱学所研究的广度和深度,给传统光谱学的许多方面带来重要的革新。因为对光谱来说,激光的高度时间与空间相干性和高强度,特别是能自由选择波长,使它成为光谱学中的理想光源。首先,用调频激光作吸收光谱的研究可以不用分光装置,可快速、简便、高灵敏度、高分辨地测出物质的吸收光谱特性,特别是对于非线性饱和吸收光谱的研究,利用这种调频激光器尤其有效;调节激光波长可以方便地研究共振喇曼效应;用调频激光激励物质,通过其散射光或荧光测量,就可研究物质结构;用调频激光可方便地用作多光子光谱的研究;用调频激光与频率上转换技术配合,有利于红外光的检测,从而促进红外波段的开发。利用调频激光对物质的吸收、荧光散射和共振喇曼光谱测量,可把它作为光谱分析的手段,特别是微区光谱分析。这些手段在地质、化学、钢铁等工业以及测定污染物的成分和分布中,有广泛的应用前景<sup>[32]</sup>。

### 2. 调频激光在化学上的应用

把调频激光用在化学中,对这个领域将是一个极大的推动。这方面的工作在激光出现之后引起了很大的注意。而激光调频技术的发展,有力地推动了激光在化学中应用的开展,出现了激光化学等新的科学分支<sup>[33]</sup>。

首先,把调频激光用于同位素分离,它引起了同位素分离技术的重大革新。物质同位素的吸收光谱往往是不一样的,因此我们可用适当频率的调频激光照射某种同位素化合物,使它处于受激态,然后选择适当的化学反应和物理方法将其分离。激光分离同位素目前已成为大家很感趣兴的课题,并已成功地用于许多重要物质如铀的同位素分离,它较之于传统方法更为简便,成本亦可降低<sup>[34]</sup>。

激光器的出现迅速改变了在光的作用下进行化学反应的途径。用调频激光对化学反应进行选择激励,选择适当频率,就可共振激励特定化学键,从而人为地改变分子中的化学反应中心,达到控制化学反应的目的。此外,通过选择激励对化学反应有贡献的化学键,可合理地把能量注入化学反应,以节省反应进行时所消耗的能量。同时用激光进行化学键的共振激励可加快反应速度。共振激励还可能改变分子中键的性质,有可能为化学合成开辟新的途径,也有利于了解化学过程的性质。

### 3. 调频激光在光电子学中的应用

如同无线电电子学离不开可调频的无线电波一样,光电子学是离不开调频激光的。首先从光通讯和光雷达的角度来看。光在大气、海水或其他介质中的传播,往往是有选择性的。故通过激光调频,可选择适当频率的波;从接收来讲,光探测器一般也是有选择性的,通过调频激光与信号之间进行混频或差频,可把接收信号移到接收器灵敏区。用调频激光我们可方便地测量接收器和光学材料的频率特性。在激光电视中,用调频激光可方便地得到彩色电视的三原色。同样,调频激光在彩色全息术、光存储技术中将会得到应用。

### 4. 调频激光在医学、生物学中的应用

由于人体和许多生物对光的作用往往是有频率选择性的,因此,在医学和生物学中,调频激光将会得到有价值的应用。例如用激光治疗眼科疾病时,根据不同病症选择不同的频率光波,将会收到良好效果。在生物学中,用适当频率的光去照射,可能加速生物的生长,在农业中达到增产的目的。由于光同动物、植物关系密切,用调频激光可方便地研究光对它们的作用。

总之,在同光有密切关系的科学技术领域中,由于它们往往对光有一定的频率选择性,因此,调频激光在一切对频率有选择性的领域中将会找到有价值的应用,上面所述的只是其中几个主要方面。

## 结 束 语

激光调频技术是激光技术中的一个重要领域,由于它在科学技术中有重要应用,十多年来它已得到很大发展。但从目前状况来看,还不能满足客观需要,所得到的应用也是初步的。在社会实践需要的强烈推动下,它一定能得到迅速的发展,在科学技术的许多领域中充分发挥其作用。因此,我们应充分注意这一新技术的研究,促进科学技术的发展。

## 参 考 资 料

- [1] 栉田 孝司;《分光研究》,1972, **21**, No. 2, 67.
- [2] B. B. Snavely; *Electro-Optical System Design*, 1973, **5**, No. 4, 30.
- [3] R. G. Smith; Second Conference on the Laser, Annals of the New York Academy of Sciences, 1970, **168**, Art. A3, 685.
- [4] P. P. Sorokin, J. R. Lankarad; *IBM J. Res. Develop.*, 1966, No. 10, 162.
- [5] C. V. Shank et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**, 405.
- [6] J. A. Myer et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**, 3.
- [7] B. A. Snavely; *Proc. IEEE*, 1969, **57**, 1344.
- [8] C. M. Ferrar; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**, 548.
- [9] O. G. Peterson et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**, 254; F. P. Schäfer et al.; *Phys. Lett.*, 1967, **24A**, 280.
- [10] A. Dienes et al.; *IEEE J., Quantum-Electron.*, **OE-8**, 1972, No. 3, 388.
- [11] B. Steye, F. P. Schäfer; *Opt. Comm.*, 1974, **10**, 219.
- [12] P. W. Smith et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**, 144.
- [13] P. Bunlamarchi, R. Pratesi; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**, No. 7, 334.
- [14] J. M. Yarborough; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24**, 629.
- [15] F. P. Schäfer; "dye Laser", (1973, New York.)
- [16] D. Basting, F. P. Schäfer; *Appl. Phys.*, 1974, **3**, No. 1, 81~88.
- [17] J. Bunkenburg; *Rev. Sci. Instr.*, 1972, **43**, No. 11, 1611.
- [18] J. A. Myer et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**, 3~5.
- [19] C. C. Wang, G. W. Racette; *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **6**, 169; С. А. Ахманов, и др.; *Письма в ЖЭТФ*, 1965, **2**, 456.
- [20] J. A. Gioramaine, R. C. Miller; *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14**, 973.
- [21] D. C. Hanna et al.; *Appl. Phys., Lett.*, 1974, **25**, 142.
- [22] E. O. Ammann et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**, 309.
- [23] R. G. Smith et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **12**, 308.
- [24] R. L. Byer et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **13**, 109.
- [25] A. J. Alcock et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**, No. 10, 562.
- [26] Н. Г. Васов и др.; *ЖЭТФ*, 1973, **64**, 108.
- [27] C. K. N. Patel, E. D. Shaw; *Phys. Rev.*, 1971, **B3**, 1279.
- [28] J. M. Yarborough et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**, 102.
- [29] J. M. Besson et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**, 206.
- [30] R. W. Wallace; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**, 497.
- [31] L. F. Mollenauer D. H. Olson; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24**, 386.
- [32] S.M. Jarrett; *Electro-Optical Systems Design*, 1973, **5**, No. 10, 24~27.
- [33] Н. Г. Васов, Е. П. Маркин и др.; *Природа*, 1973, № 5, 18~26.
- [34] C. B. Moore; *Laser Focus*, 1974, **10**, No. 4, 65.