

参考资料

# 可调谐激光器

北京光电技术研究所

# 可调谐激光器

## 目 录

引言	3
<b>一、染料激光器 (DL)</b>	<b>5</b>
(一) 染料激光机理	5
(二) 调谐方法	9
(三) 泵浦技术	13
(四) 锁模技术	19
(五) 混频技术	20
(六) 新的进展	21
<b>二、光参量振荡器 (OPO)</b>	<b>22</b>
(一) 光参量放大	22
(二) 泵浦源	26
(三) 调谐方法	27
(四) 脉冲参量振荡器	29
(五) 连续波光参量振荡器	35
(六) 非线性材料	36
<b>三、其他各种可调谐激光器</b>	<b>39</b>
(一) 半导体二极管激光器 (DSL)	39
(二) 自旋反转拉曼激光器 (SFRL)	41
(三) 谐波光、和频光、差频光、四光波参量混合	43
<b>四、可调谐激光器的应用</b>	<b>45</b>
(一) 在光谱学中的应用	45
(二) 可调谐激光器分离同位素	52
(三) 污染检测	57
(四) 可调谐激光器在生物学上的应用	60
(五) 其它应用	62
<b>五、可调谐激光器国外研制动态</b>	<b>64</b>

(一) 产品情况 .....	64
(二) 国外可调谐激光器研制机构 .....	66
结束语 .....	67
附图 (国外主要产品介绍) .....	69
参考文献 .....	78

# 引 言

“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上”。

自第一台激光器问世以来虽然只过了十六年，但激光技术发展之快已经超过了以往的任何其他科学技术。由于激光的亮度高、单色性和方向性好，因此得到了极为广泛的应用，特别在探索微观世界方面展示了崭新的前景。激光的出现使光学与电子学并驾齐驱，成为开辟现代科学技术的先锋；它对化学和光谱学也将引起一场深刻的革命，使一些原来进展迟缓的技术出现了飞跃。激光技术出现的意义决不仅是技术领域里增添了一个新的分支，而且派生出了许多新的科学分支和技术科学，对于自然科学和技术的各个领域今后的发展将起着巨大的推动作用。

激光器的连续振荡输出和脉冲振荡峰值输出每年都以提高一个数量级的惊人速度增长着。各种激光器的输出波长已由真空紫外的 116.1 毫微米复盖至红外的 1.81 毫米。但是，一般激光器的发射波长是固定的。这在应用时常常感到很不方便。为了选择另一个波长，不得不将一个精心设计、造价昂贵的装置搁置一旁而另搞一套。而且，在深入探索物质的结构时，没有可调的相干辐射源根本不行。因此，在第一台激光器出现不久，就提出了能否制造出像无线电发射机那样可以任意调谐输出波长的可调谐激光器的设想。经过十年多的努力，现在已制造出可在红外区、可见区、紫外区输出可连续调谐波长的激光器。

可调谐激光器，又称为波长可变激光器或调频激光器，是指输出波长（或频率）可在  $100 \text{ 厘米}^{-1}$  ( $1 \text{ 厘米}^{-1} \approx 30 \text{ 千兆}$ ) 以上范围内变化的激光器。根据它的作用原理，可分为两大类。下表列出可调谐激光器分类及其水平。

表 1 可调谐激光器的分类及其水平

工 作 原 理	器 件	波 长	可 调 范 围	输 出	技 术 要 求
以感应荧光为基础	染料激光器	主要可见	$\leq 200 \text{ 毫微米}$	微瓦至兆瓦	要求激光泵浦
	高压气体激光器 (例如 TEA $\text{CO}_2$ 激光器)	主要红外	$\leq 1000 \text{ 厘米}^{-1}$ (不连续)	毫瓦至瓦	
	半导体二极管激光器	主要红外	$\leq 10 \text{ 厘米}^{-1}$	微瓦至瓦	要求致冷(低温技术)
以非线性光学效应为基础	光参量振荡器 倍频器或混频器 (谐波光、和频光、差频光、4光波参量混合)	红外—可见 红外—紫外	$\leq 100 \text{ 毫微米}$ $\leq 20 \text{ 毫微米}$	毫瓦至瓦 微瓦至千瓦	要求激光泵浦 要求激光泵浦
	自旋反转拉曼激光器	只有红外	$\leq 100 \text{ 厘米}^{-1}$	毫瓦至瓦	要求大磁铁和激光泵浦
	感应拉曼散射 极化子拉曼激光器 染料激励的拉曼激光器	可见—红外 可见—红外			

目前,可调谐激光器的波长调谐范围可从真空紫外的118.8毫微米到毫米波的8.3毫米(见表2)<sup>(1)</sup>。

表2 可调谐激光器的波长范围

种类	波长可变范围 ( $\mu\text{m}$ )	
染料激光器	0.32	1.22
半导体激光器	0.32	45
高频光和频光	0.119 0.190 0.21 0.36	5.6 5.8
差频光	1.5	24.3
光参量振荡器	0.42	8.5 9.6 10.4
4光参量混合	2	25
自旋反转拉曼激光器	0.49 0.51	3 5.2 6.2 9.0 14.6
极化子拉曼激光器	0.69 0.704	50 238
里科伊拉曼激光激光器	0.47	2.1
波长范围	0.2 0.4 0.8 2.5 25 1000 10000	真空紫外 紫外 可见 近红外 普通红外 远红外 毫米波

在上表列出的可调谐激光器中,研制成熟应用较广的是染料激光器。TEA CO<sub>2</sub>激光器由于在铀同位素分离上取得很多成就而受到了重视。光参量振荡器、半导体二极管激光器、自旋反转拉曼激光器,近年来由于在污染检测上的有效应用而得到迅速发展。可调谐激光器的研究至今才十年,可是已在高分辨率光谱学、同位素分离、污染物质探测、光化学、全息摄影、光通讯、生物学、医学等方面得到广泛的应用并取得了显著的成绩。作为一个可调相干辐射源,凡是固定波长激光器可以应用的地方都可应用可调谐激光器。如果说激光技术出现是对现代科学技术的一次革命,那么可调谐激光技术的研制成功是这个革命的深入,而这种深入很可能引起又一次新的技术革命。如果说前者为科学技术发展描绘了一幅富有吸引力的动人画面的话,那么后者就为科学技术发展拍摄了一部丰富多彩的全景电影。

在1972年的第七届国际量子电子学会议上,以“波长可调激光器”为题召开了专题讨论会,在1974年的第八届国际量子电子学会议上,可调谐激光器及其光谱学已成了会议讨论的主要课题。美、苏、西德、日本、英、法、加拿大等国家都在重点研究激光的研究所、大学、实验室、工厂动员组织了相当的人力、物力来从事可调谐激光器的研究\*,并已获得一定成果。1975年美国已有44种可调谐激光器产品,其中不少已系列化。

为了更好地完成“抓革命、促生产”的光荣任务,为了赶超世界科技先进水平,我们应对可调谐激光器的研究给予应有的重视和组织一定的力量。

本文主要介绍染料激光器和光参量振荡器。

\* 详见本文的第五部分。

## 一、染料激光器 (DL)

1960年红宝石激光器试制成功后, 就有人提议用有机化合物做工作物质制作激光器, 试图利用长寿命三重态产生的磷光作激光机构, 但没有成功。1964年又有人提出用单态产生的荧光作为激光机构, 这种想法虽然正确, 但由于选用的染料不合适, 实验没有成功。1966年 Sorokin 和 Lankard<sup>(2)</sup>; Schaefer 和 Schmidt, Volze<sup>(3)</sup> 分别用巨脉冲红宝石激光器泵浦氯化铝酞花青 (CAP) 和花青类染料获得了受激辐射, 第一台染料激光器试制成功。1967年 Soffer 和 McFarland 用衍射光栅代替谐振腔的一个反射镜, 使激光线宽减窄到 1%, 并在 50 毫微米范围内连续可调, 使染料激光器成为可实际应用的器件<sup>(4)</sup>。1970年 Peterson, Tuccio 和 Snavely 用氩离子激光器泵浦加了退聚合剂的  $2.5 \times 10^{-4}$  克分子若丹明 6 G 的水溶液, 首先实现了染料激光器的连续输出<sup>(5)</sup>。1972年在技术上的两项突破——三镜象散补偿的折迭式光学腔和自由流动的染料喷流<sup>(6)</sup>, 使染料激光器的可靠性和稳定性有了迅速提高, 使它的应用得到了很大的发展。

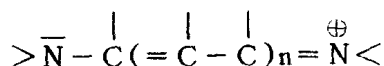
染料激光器是以染料作为激活介质的激光器。当前能产生激光的染料已有 350 种以上, 用作激活介质的染料大多数是溶于乙醇、苯、丙酮、水及其它溶剂中, 配成  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  克分子/升量级的浓度, 装入盒 (池) 中或者使其在管中循环使用, 也可采用喷流的办法。除了液体溶液的染料激光器外, 将染料溶入塑料中, 可以做成固溶体的染料激光器<sup>(7)</sup>, 也可做成横向尺寸只有数微米的固体薄膜激光器<sup>(8)</sup>, 特别是可做成在技术上有特殊意义的气相染料激光器<sup>(9)</sup>。

### (一) 染料激光机理

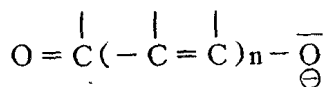
#### 1. 染料分子结构

从目前已知能够激射的几百种染料中发现最有效的染料都有一条交替的单键和双键的碳原子链——共轭链构成的致色系统。这种致色系统通常有三种:

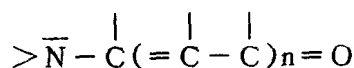
胺离子系统



羧基离子系统



酰胺系统

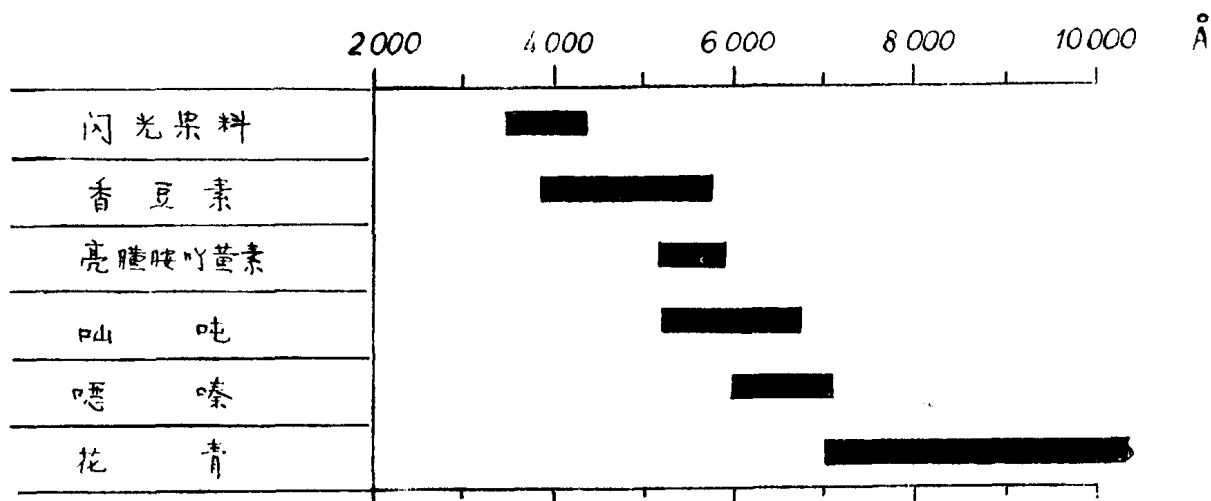


染料分子的荧光波长主要取决于键的长度, 越长的键产生的染料越“红”。重复括号中的双碳原子结构  $n$  次, 结构就可以延长。但是如果  $n > 3$ , 则链变得不稳定而容易断裂。

致色系统结合到大分子时并不一定是直线的，也可以是弯曲的，例如在若丹明和香豆素染料中。在寻找新的激光染料分子时，必须寻找包含了某一种致色系统的结构，还要考虑到，致色团不能是分枝而应当是基本的起点。

共轭链的电子态比原子或离子的电子态有宽得多的能量。此加宽是链的振动对电子能级产生微扰以及分子与溶剂相互作用的结果。正是这种加宽使染料激光器的可调谐性成为可能。目前，染料激光器的波长可调范围可从紫外的 0.321 微米到近红外的 1.168 微米（见表 3）<sup>(10)</sup>。

表 3 重要染料系及其调谐波长



在上列的染料系中经常使用的有：吡吨类中的若丹明——它是通常应用的一种红色染料，输出的激光能量最高，转换效率可超过 25%。

花青类中的碘化 3,3 二乙基噻三羰花青——它是第一个用来观察到激光现象的物质。

香豆素类中的 7-羟基香豆素——这种染料在水溶液中具有很高的潜在应用的价值。

## 2. 染料分子的能级图

染料分子是由许多原子组成的，为了简便起见，可以模仿简单的双原子分子画成能级图（见图 1(a)）。分子的每个电子态都有一组振动—转动能级，电子态之间的能量间隔为  $10^4$  厘米<sup>-1</sup> 数量级，振动能量间隔为  $10^3$  厘米<sup>-1</sup> 数量级，转动能量间隔很小，约为  $1 \sim 10$  厘米<sup>-1</sup>。一个典型的染料分子有五十个或更多个原子，所以就有一百五十个振动状态，由于溶剂分子引起的碰撞和静电扰动加宽了这些振动能级。每个振动能级又有一组转动能级，这些转动能级由于与阻碍转动的溶剂分子的频繁碰撞而变得很宽，因而在每个电子能级上都迭加了一个准连续态。又因染料分子每秒至少与溶剂分子碰撞  $10^{12}$  次，在一个导致非平衡态的电子跃迁后，在室温下的溶液中可在微微秒时间内达到平衡，所以吸收实际上是在整个吸收带上连续的。对于一个具有  $N$  个自由电子的染料分子，在基态时， $N$  个电子充满  $\frac{N}{2}$  个最低能级，每个能级上有二个电子，其自旋相反，形成总自旋为零的状态。当分子处于激发态时，其中一个电子有可能获得较高的能量，其自旋和另一个平行，形成总自旋  $S = 1$  的状态，因为在外磁场中可以同磁场平行、反平行或垂直，因而称为三重态（以

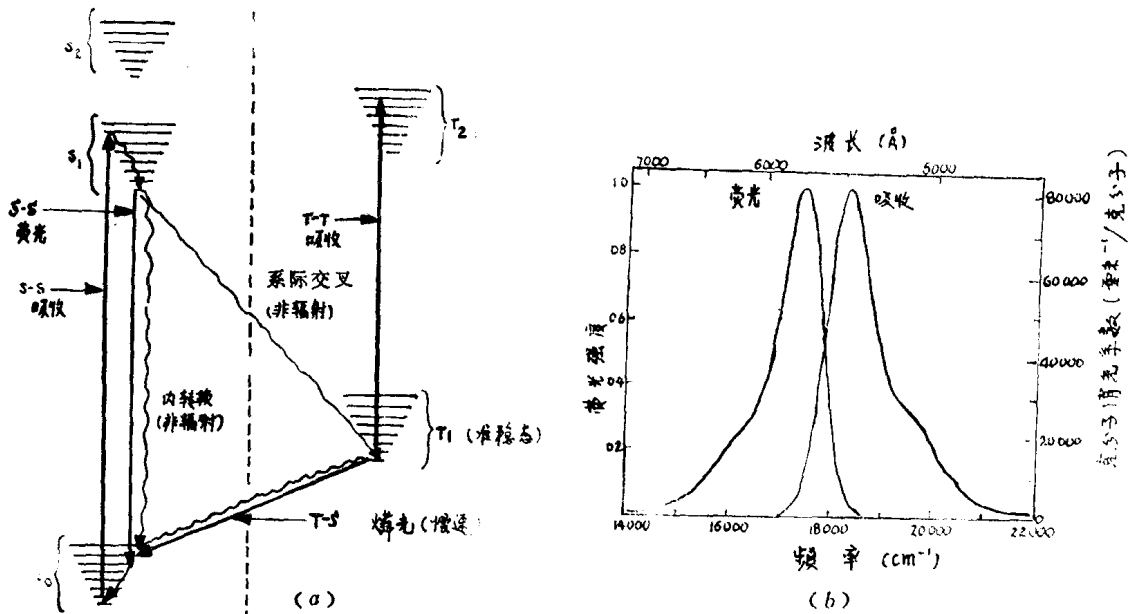


图1 若丹明B的能级图(a)和吸收—荧光光谱图(b)<sup>(11)</sup>

$T$ 表示)。对于每个激发态都对应地存在一个三重态，其能量较单态（以 $S$ 表示）为低。

### 3. 染料分子的吸收和发射过程

光照射染料溶液时，染料分子吸收光，电子从基态  $S_0$  跃迁到激发态  $S_1$  中的较高振转子能级上，由于周围溶剂分子的碰撞，电子在此能级的寿命仅为  $10^{-12}$  秒，很快地把能量传给周围溶剂分子，无辐射地弛豫到  $S_1$  的最低能级上；从  $S_1$  的最低态跃迁到  $S_0$  的较高振转子能级，就发射出荧光。由于在  $S_1$  的高振转能级无辐射跃迁到  $S_1$  的最低能级时放出一部分能量，所以发射荧光的波长较吸收光的波长向长波方向移动（称为斯托克斯移动），因而使染料的荧光光谱较之吸收光谱朝长波方向有个位移。在  $S_0$  高振转能级的电子又很快地通过非辐射跃迁回到  $S_0$  的最低振动能级。由此可见，染料激光器是一种四能级的激光器。由染料分子的吸收和发射过程可知它发射的荧光带一般是吸收带的镜反射像（见图1(b)）。因为  $S_0$  的较高振转能级的布居数在室温的热平衡分布中几乎为零，因此为了达到产生激光所需的粒子数反转，只需低的泵浦功率。荧光光谱的宽波段是耦合到电子态的连续振转能级之间跃迁的结果。这种展宽本质上是均匀的，其储藏能量的大部分可调谐到单个发射线，这是染料激光器的独特优点。

### 4. 三重态影响及淬灭方法

$S_1$  到三重态第一激发态  $T_1$  的跃迁称为系际交叉。这种交叉跃迁是与激光发射相竞争的无辐射过程，对染料激光是很不利的。由于  $T_1 \rightarrow S_0$  的跃迁是自旋禁戒跃迁，所以  $T_1$  有较长的寿命，约  $10^{-3}$  秒，并由非辐射跃迁或弱磷光退激发。 $T_1$  一方面从  $S_1$  移走分子减小了粒子数反转，另一方面又能引起从  $T_1$  到三重态第二激发态  $T_2$  的自旋允许跃迁引起的吸收，使吸收带中的某些波长与  $S_1 \rightarrow S_0$  单态跃迁的荧光带重叠，降低了荧光效率，起着淬灭荧光的作用。影响系际交叉速度的参数有自旋轨道耦合、重原子效应。在轨道磁矩大的染料分子中，自旋轨道因素的影响就大，如吡啶黄中三重态效率达 20%（轨道磁矩小的若丹明 6 G 的三重态效率仅 1%）。重原子效应是在染料分子中取代氢原子的那些重



原子场里的  $\pi$ -电子随着原子序数的增高而可能使其自旋反转几率增大, 从而影响系际交叉速度。如四溴荧光素的三重态效率为10%, 曙红就达78%, 而四碘荧光素高达98%<sup>(12)</sup>。因此要实现连续发射激光(连续波染料激光器)就必须减少三重态布居数, 一个办法是在染料中添加三重态淬灭剂(促使缩短  $T_1$  寿命的物质)。最早是使用氧作淬灭剂, 因为这种分子具有较大的轨道磁矩, 它和染料分子之间的自旋轨道耦合很强, 可以增大  $T_1 \rightarrow S_0$  跃迁的几率, 即把三重态的能量移走, 起到了淬灭三重态的作用。但氧分子在增加  $T_1 \rightarrow S_0$  的跃迁几率同时, 也增加  $S_1 \rightarrow T_1$  的跃迁几率, 所以氧分子对染料激光是否有利, 取决于它淬灭三重态与淬灭荧光的相对重要性。已提出采用能量迁移方式来淬灭三重态<sup>(13)</sup>, 用 N-氨基类吡啶, 1,3-环辛二烯和离子  $\text{NO}_2^-$  作为添加剂, 由于它的三重态低于染料的三重态, 可以作为受主而接受染料三重态的激发能, 从而起到淬灭染料三重态的作用。另一办法是使用上升十分迅速的脉冲激励光, 使染料分子在  $T_1$  态积聚之前就完成了激光振荡, 这就要求用脉宽小的激光脉冲或上升时间小的闪光灯作泵浦源。采用染料快速流过激活区或喷流的办法也能起同样的作用<sup>(9)</sup>。

#### 5. 内转换效应及其消除方法

内转换过程是把电子能变成被溶剂分子消散的振动能。这也是与荧光发射过程相竞争的过程, 对染料激射是不利的。影响内转换的因素有染料分子键的扭转、染料分子与溶剂分子的碰撞。

由于染料分子在某些键上容易扭转, 使基态发生严重形变, 以致分子可能从一个能态通过隧道效应转变为另一能态, 即把电子能转换为振动能。防止键扭转的办法是在键间架接氧桥。用这种办法使焦宁 Y 在甲醇中的荧光效率增加到 40%, 在甘油上接近到 100%。现在已将与此相同的方法应用于吡吨和香豆素族的一些染料, 都增加了荧光量子效率<sup>(11)</sup>。

染料分子与溶剂分子碰撞时, 染料的电子能量转变为溶剂的振动能, 转换的可能性随着振动量子数的增大而变小。因此在具有 O—H 伸展振动频率为 3700 厘米<sup>-1</sup> 的甲醇中, 上面未取代的若丹明的荧光量子效率是 85%, 而在氟化了的甲醇里, 伸展振动频率为 2600 厘米<sup>-1</sup>, 量子效率是 92%。对于吸收扩展到红光区的染料, 这个效应变得特别重要。例如, 结晶紫, 相应的数目是 70% 和 90%<sup>(11)</sup>。

#### 6. 溶剂对染料分子的影响

大部分激光染料是盐类, 染料通常是阳离子, 而平衡离子差不多是一些无机的或有机的阴离子, 因此它在吸收方面没有影响, 只在溶解度, 稳定性和相似性质方面有影响。如果将其靠得较近时, 由于重原子效应或电子能转移, 其中某些离子能淬灭激发染料分子的荧光, 这将随氧化还原电位而定。在一般的阴离子中淬灭效率最高的是碘化物, 最低的是过氯酸盐, 其他一些则表现为中等的效应。例如在极性溶剂甲醇中, 离子的库伦吸引力是相当低的, 它们能独立的移动, 荧光效率通常很高, 阴离子对它没有影响。在非极性溶剂, 如氯仿中, 将形成离子对。在这种情况下, 若丹明碘化物是无荧光的, 而相应的若丹明过氯酸盐仍有强的荧光。在水这样极性很高的溶剂中, 染料阳离子间的库伦斥力变得比分散力还小, 这就必然由于吸引而生成二聚物, 在某些情况下还生成无荧光的多聚物。因此在大多数染料的浓水溶液中只有微弱的荧光。在激光器中, 它是损耗泵浦功率的重要因素。通常采用的措施是用低极性溶剂如乙醇、三氯甲烷, 或在水溶液中加入抑制剂(通常是加

洗涤剂),使溶液只形成含有一个染料分子的微胞,以免二聚物、多聚物产生。这在连续波染料激光器中特别重要。

当光照射染料时,还会引起光致电离作用和光分解作用,这通常导致分子的不可逆破碎。对激光染料的研究指出,不可能在更短的波长上去探索新的染料,因为当泵浦波长降至~300毫微米以下时,单个入射光子能量~4电子伏,足可使染料分子的化学键断裂。在红外端,由于不少染料在室温下就能自发地分解,一般认为染料直接发射的最长波长约为1.5微米<sup>[14]</sup>。

## (二) 调谐方法

染料激光波长所以能随着外界条件改变,其根本原因是染料分子中存在着自吸收的现象。自吸收现象能使荧光光谱的峰值发生移动,因而发生在荧光光谱峰值的激光,其波长也就有变化。这一性质是别的激活介质所没有的。

由图1(b)可知,当染料分子的吸收带和荧光带间的重叠变大时,由吸收带的长波尾引起的荧光再吸收所产生的损耗将随之增大,因此可以通过改变染料溶液的浓度、温度、光程长度(谐振腔的活性长度、Q值)等各种因素来改变吸收带和荧光带间的叠合程度,从而来调谐波长。染料激光波长随其浓度及谐振腔活性长度的增加而变长,而随温度降低而变短。此外,染料分子和溶剂分子之间的电偶极矩作用随溶剂之不同而有差别,因此在不同溶剂的溶液中的同一染料,其激射波长也随溶剂而变。又由于当溶剂的酸度不同时,分子是处于不同的电离态,而处于不同电离态的分子发射不同波长的荧光,因此染料激射波长随溶剂的pH值改变而改变。由此可知,要粗略地选择染料激光的波长可以通过不同的染料、溶剂、谐振腔的Q值、浓度、温度来实现。但当需要精细地调谐和获得窄的线宽时,就需要用有波长选择装置(即调频元件)的谐振腔。常用的调频元件有下列几种:光栅、棱镜、标准具、双折射滤光片、分布反馈装置、电控调谐元件等。

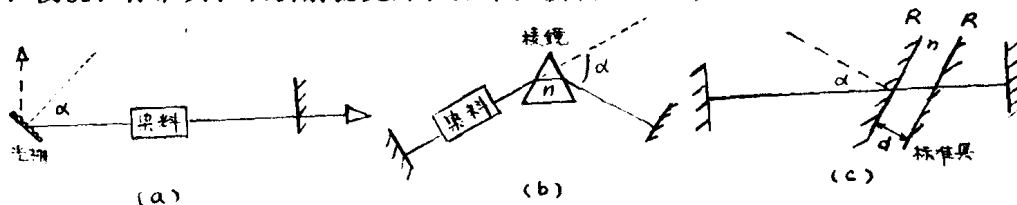


图2 染料激光器的调谐装置  
(a) 光栅; (b) 棱镜; (c) 标准具。

### 1. 光栅

图2(a)示出利用光栅调谐波长的装置,谐振腔一端的宽带介质膜反射镜用里特罗装置的平面光栅所代替。把光栅绕平行于光栅刻线(也是垂直于腔)的轴旋转就可从染料的增益分布中选择出单个波长,并把它沿腔之轴反射回去,其它波长则散射到轴外。在衍射极限情形时,被动线宽为

$$\Delta\lambda \sim \lambda d \cos\alpha / m w_0.$$

式中  $m$  是级数,  $d$  是槽的间隔,  $\alpha$  是入射角,  $w_0$  是光束的腰粗。用 2160 条/毫米, 500 毫微米黄铜的平面衍射光栅,通过旋转,可在 50 毫微米的范围内连续地改变激光波长,线宽为 0.06 毫微米,和不使用衍射光栅比,变窄了 1%<sup>[4]</sup>。输出激光取决于光栅的

效率，激光可从激光腔另一端的镜透射而出，或可由光栅的零级反射得到。后者的腔损耗较小，但有着输出光束方向随着光栅转角因而也随着输出波长而变。光栅的缺点是插入损耗大，能高到10~30%，这对低增益的连续波染料激光器是太高了，而且光栅的金属反射膜会被高功率和大能量的脉冲损坏。改进的方法是用全息透射光栅<sup>(15)</sup>，或在谐振腔内用光束扩展望远镜，减小光束的发散度，增大光束的直径，降低投射到光栅上的能量密度<sup>(16)</sup>，还可在光栅前加一个半透反射镜，这样不仅可以减少投射到光栅上的光强，而且由于反射镜和光栅组成共振反射腔可显著降低激光的阈值<sup>(17)</sup>。

2. 棱镜 把棱镜放在谐振腔内靠近染料池，就可将染料宽带发射的光谱含量水平地（或任意平面内）色散开。将高反射的平面镜—在腔的一端用作全反射镜—绕垂直于色散平面的轴旋转，就可获得光谱调谐。图2(b)示出利用腔内棱镜调谐波长的装置。已经做到，单个棱镜的线宽为0.05毫微米（~50千兆赫）<sup>(18)</sup>，但这个数据受到测量仪器分辨率的限制。一个棱镜的角色散较小，用于分离气体激光的锐谱线是可以的，但要分离闪光灯泵浦的染料激光器的光谱，就要采用多棱镜装置。 $N$ 个棱镜调谐所得的被动线宽是单个棱镜调谐的线宽的 $N$ 分之一。如果定位于布儒斯特角，则单个棱镜的被动线宽为 $\Delta\theta/4 (dn/d\lambda)$ 。在发散角为25毫弧度，谐振腔内径为2.5毫米条件下，在衍射极限情形时，单个SF10 Schott 玻璃60度棱镜的调谐线宽为0.54毫微米，6个棱镜的调谐线宽为0.09毫微米（在同样的条件下，1200条/毫米的光栅的调谐线宽为0.37毫微米）。多个棱镜组合较转动光栅有更多的优点—损耗小，被动线宽窄。最近研制成功的多个棱镜组合的染料环形激光器（加标准具），线宽可窄到0.03微微米<sup>(19)</sup>。棱镜调谐的优点是：如果它定位于布儒斯特角，则腔的损耗实际上不会因插入棱镜而增大。其缺点是输出光谱呈带状结构，除了主发射线外还有伴线<sup>(20)</sup>。

3. 法布里—珀罗标准具 在法布里—珀罗标准具中有两块平行平板，两板相对的内表面上都薄薄镀上一层银，利用光束在两块板间空隙中多次反射而产生的多光束干涉现象可使谱线变得非常窄而无插入损耗大的缺点<sup>(21)</sup>。图2(c)示出用法布里—珀罗标准具调谐波长的装置。由计算可知，被动带宽

$$\Delta\lambda = (2nd/m)(\sin\alpha)\Delta\theta$$

当 $\alpha \rightarrow 0$ 时， $(\Delta\theta)_{\alpha \rightarrow 0} = \Delta\lambda_{m \rightarrow m+1}/F$

式中 $\Delta\lambda_{m \rightarrow m+1} = \lambda/m$ 是自由光谱程， $F = \pi R^{1/2}(1-R)^{-1}$ 是反射率为 $R$ 的法布里—珀罗标准具的细度<sup>(22)</sup>。如果只使用标准具，则为了避免在染料激光荧光光谱内一些波长处发生振荡，需要大的自由光谱程~50毫微米。因而标准具通常要与低色散元件，棱镜或光栅联合起来使用。如果假定使用 $\Delta\lambda_p \sim 5$ 毫微米的光栅作为初始的选频元件，对在600毫微米附近的激光束， $m \simeq 120$ ，标准具的自由光谱程可选该值。这要求两平板之间的距离为36微米。假定有效反射率 $R$ 为0.99，则细度 $F \simeq 300$ ，被动带宽为0.016毫微米。上述的情况是在 $\alpha > 7$ 毫弧度时。在大多数情况下，为了避免任何额外的与谐振腔内其它元件相干涉的效应，标准具总是在倾斜的条件下使用。把标准具倾斜使之稍离其法线，还可以把窄谱线调谐几个毫微米。但把它倾斜远离法线时，则会产生渐晕等不需要的效应，而且会引起严重的逸散损耗。由上可知，用标准具使谱线变窄，取决于标准具的自由光谱程与其细度之比。反射系数愈大，产生的相干光束愈多，线宽就愈窄，但是光束的入射角必须较

小才行，否则它们经多次反射后将越出标准具，但入射角限制太小又限制了调谐范围。因此单独使用标准具不能同时达到谱线变窄和扩展调谐范围的目的，要获得窄的线宽，必须减小调谐范围和光束的发射角。使用单个标准具可得的线宽在 0.05~0.001 毫微米。将法布里-珀罗标准具插入在有转动光栅的谐振腔中，使线宽从原来的 0.003 毫微米减小到 0.0004 毫微米（其输出功率从原来的 20 千瓦减小到 3 千瓦）<sup>[16]</sup>。在谐振腔中插入多个法布里-珀罗标准具，可使谱线进一步变窄，但是它们必须有不同的自由光谱程，用三个标准具得到的线宽为 0.0001 毫微米<sup>[23]</sup>。在连续波染料激光器的谐振腔中同时放入棱镜和法布里-珀罗标准具，可以获得 20 兆周的线宽。将激光器输出锁在钠  $D_1$  线上时，激光谱线中心相对于钠谱线的长期漂移可小于  $\pm 1.5$  兆周<sup>[24]</sup>。用外压力改变标准具的间隙可得到较宽的调谐范围<sup>[25]</sup>。用压电方法调谐的标准具常常用来扫描带宽更宽的发射的光谱含量。

#### 4. 双折射滤光片

使用双折射滤光片调频时，可以将两片或多片双折射片用空气或玻璃隔开，沿光轴并与光束成布儒斯特角放置，滤光片的厚度可为  $T$ ， $2T$  和  $nT$ ，其中  $n$  为 9~16 之间的整数<sup>[26]</sup>。双折射滤光片的优点是机械稳定性和损伤阈值高。调谐的装置如图 3 所示，装置包括一组布儒斯特平板起偏振器和一组平行光轴切割的双折射滤光片

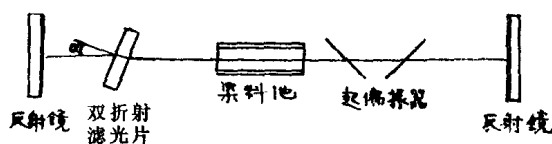


图 3 有双折射激光器的谐振腔

，调谐是将滤光片绕垂直于其表面的轴一致地旋转而实现的。当激光垂直入射至滤光片时，能使波前推后几个半波，当光程改变整数倍半波长时，透射光强为极大。滤光片的透射系数  $T = \cos^2(\pi d \Delta n / \lambda)$ ， $d$  为滤光片厚度， $\Delta n$  为寻常光线和非寻常光线的折射率之差。被动带宽为

$$\Delta\lambda \sim (\lambda^2 / \pi \Delta n d) (\Delta T)^{1/2}$$

这个带宽与光束发散角无关而取决于激光器的阈值与运转值之差，故可将  $\Delta T$  看作为最大的附加插入损耗。如  $\Delta T \sim 10\%$ ，则  $\Delta\lambda \sim \lambda^2 / 10 \Delta n d$ ，对 2 厘米长的 KDP（磷酸二氢钾）晶体，在 600 毫微米处， $\Delta\lambda$  约为 0.05 毫微米。在用闪光灯泵浦的若丹明染料激光器中用 0.36 毫微米厚的石英片，入射角在  $30^\circ \sim 50^\circ$  之间所得的线宽为 1 毫微米，调谐范围为 570~600 毫微米<sup>[27]</sup>。以上这种调谐方法常称为旋转色散法。与此类似，可利用  $z$  切割的石英晶体旋转色散，在有安置在三个起偏振器之间的两个长度为 45 毫米，分别为左旋、右旋的石英晶体的谐振腔中，如果中间的起偏振器旋转，获得调谐率为 0.24 毫微米/度<sup>[28]</sup>。还可利用发生在原子吸收谱线邻近的偏振面旋转进行频率锁定，以期得到与某一特定谱线相同步的振荡。对钠原子的  $D_1$ 、 $D_2$  线锁定，所得的线宽小于 0.1 厘米<sup>-1</sup><sup>[29]</sup>。

#### 5. 分布反馈

分布反馈系统是与上述几种调谐方法不同的调谐装置，具有分布反馈的染料激光在集成光学中将成为非常重要的主动元件。它是利用折射系数在空间的周期性变化产生分布反馈结构<sup>[30]</sup>，或由染料溶液中增益在空间的周期性变化产生分布反馈结构<sup>[31]</sup>。图 4(a) 示出这种调谐装置。在玻璃衬基上有一层薄的明胶层，使它对着 He—Cd 激光器的两条相干光束产生的干涉图样曝光，由此形成光栅，然后将明胶显影，浸在若丹明 6G 的溶液中。

起初认为这种装置提供的是谱线变窄而不是调谐方法，但后来弄清楚，相干的两束泵浦激光能产生分布光栅的作用，因而能产生增益调制。

由计算可知<sup>(32)</sup>，当增益 $G$ 比阈值大二倍多时，被动带宽可表为

$$\Delta\lambda = (\lambda_0^2 / 4\pi n L) \ln G$$

对典型值， $\Delta\lambda \approx 0.01$  毫微米，显著小于用光栅调谐得到的线宽。

用图 4 (b) 的装置可从若丹明 6G 激光器得到 70 毫微米的调谐范围<sup>(33)</sup>，输出波长是染料池中两条光束入射角的函数。图 4 (c) 示出波长随  $\theta$  角变化的情形。亦可由改变溶液

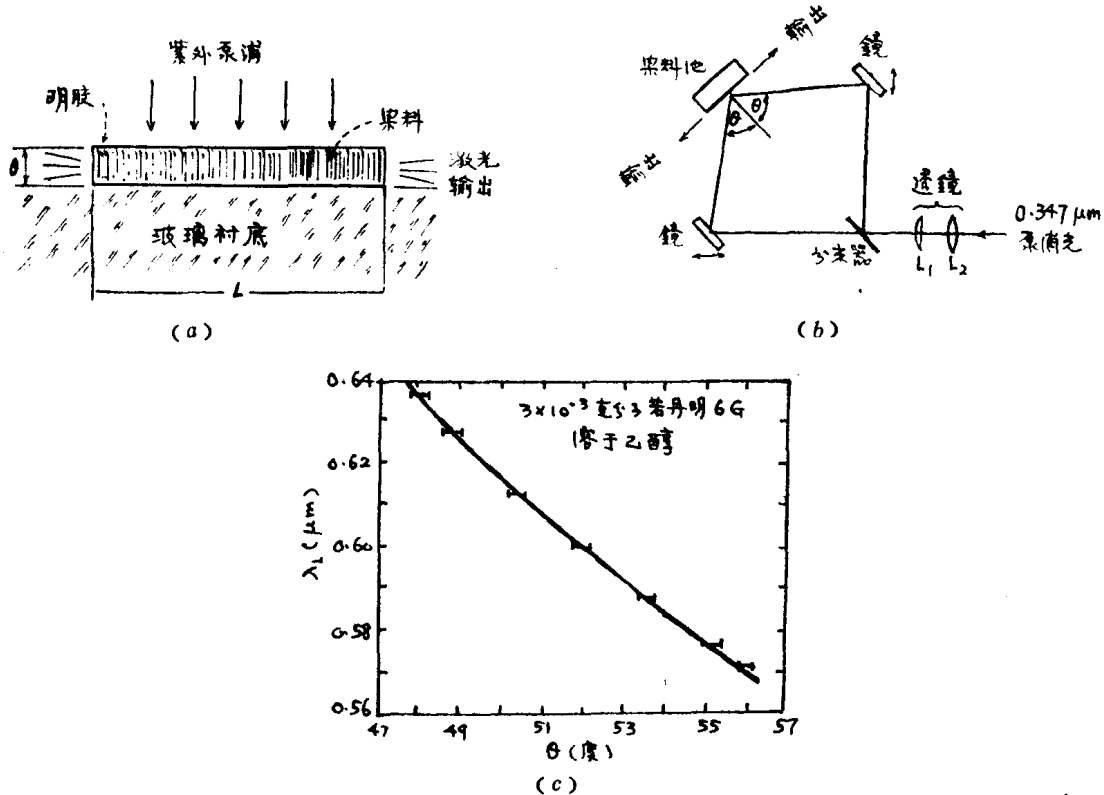


图 4  
(a) 分布反饰装置截面图 (b) 用相干泵浦光束进行调谐的实验装置  
(c) 波长随  $\theta$  角变化的调谐曲线

的折射率或在固体的情形中改变各向异性衬基上形成的明胶层的折射率来调谐激光<sup>(34)</sup>。

## 6. 电控调谐

电控调谐能迅速地调谐和调制激光器的输出波长。用电控调谐波长的方法分三个方面：通过改变外加电压使激光腔部件微动而完成调谐的电-机械技术；通过声波与腔内激光束相互作用来完成调谐的声光调谐法；以及利用自然界中最快的电-光效应的电光调谐技术。前者有 3 千赫共振频率电流计驱动的反射镜，3 千赫共振频率的压电扫描法布里-珀罗干涉仪，双压电晶片激光束扫描器<sup>(35)</sup>，它们中最大的调谐速率为  $10^5$  毫微米/秒。后者有声光滤波器和电光滤波器。

声光调谐不用机械微动部件，而是用晶体产生的声波来调谐。因为声光调谐速率的上限仅决定于声波穿过光波所需的时间，因此它比电-机械技术的调谐速率快 1000 倍。声光调谐的原理是：在激光腔内放置布喇格衍射盒，盒内的声波行波使光偏转，声频的变化引

起偏转角度的变化，因而也改变了入射到衍射光栅上的角度，反射波长取决于入射角。这样，染料激光器的输出波长就由于声频的变化而变化。这种调谐技术除比以往的电-机械调谐技术所提供的重复性和调谐速率都大外，还可望获得更高的可靠性和更长的寿命。

电-光调谐技术在激光器共振腔内安置电-光滤波器或偏转器。用图5所示的装置，KDP晶体的光轴与激光器轴垂直，对在它两边的偏振器成 $45^\circ$ 角，沿着晶体轴加上电压，改变 $\Delta n$ 来调谐激光波长。这种改变是通过线性电光效应，外电压为 $16$ 千伏厘米 $^{-1}$ 时，在若丹明6G激光器中可获得小于 $0.001$ 毫微米的

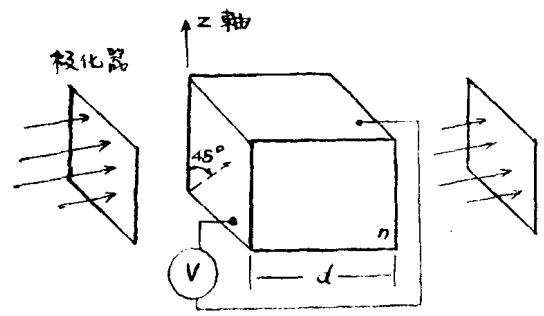


图5 电光调谐装置

线宽，调谐范围为 $0.004$ 毫微米<sup>(36)</sup>。电控双折射滤光片可在 $20$ 毫微米范围内进行 $35$ 毫微米/微秒的快速调节。电-光调谐速率受到在电-光元件上施加或除去电压所需的时间的限制，调谐速率在 $10^9$ 毫微米/秒数量级范围，这相当于用声-光技术所获得的速率的 $10\sim 100$ 倍。

### (三) 泵浦技术

染料激光器的泵浦方式按泵浦光源分类可分为激光泵浦和闪光灯泵浦；按运转方式分类，又可分为脉冲泵浦和连续泵浦；按工作状态分类，还可为振荡器和放大器。

目前常使用的泵浦源有：

闪光灯

固体激光及其谐波（红宝石 $694.3$ 毫微米及其谐波 $347.2$ 毫微米，钕玻璃 $1.06$ 微米及其谐波 $532.0, 354.0, 266.0$ 毫微米）  
氮激光（ $337.1$ 毫微米）

脉冲泵浦构成脉冲染料激光器

氙激光……………连续泵浦构成连续波染料激光器

不同种类的泵浦源可使激光器的特性：可调谐范围、峰值输出、平均输出、脉宽、脉冲重复率、线宽、有无产生超短脉冲的可能，以及染料劣化程度等方面有很大的区别（见表3）。

#### 1. 闪光灯泵浦

在用闪光灯（通常使用氙灯）作泵浦源时，分为普通直管式结构与同轴式结构。

直管式结构是将闪光灯和染料盒封装在一个椭圆柱面内，分别安装在两个焦线上。因为染料中很小的温度梯度也会引起严重损耗，所以需要采用聚四氟乙烯或不锈钢制成的染料循环系统。用低电感火花间隙与灯串联，可使它在比自击穿电压高得多的电压下工作，从而减小直管或螺旋管闪光灯的上升时间和增加峰值输出功率。为了获得快的上升时间（ $70$ 毫微秒），常用平板传输线形式的储能电容器供电的毛细管空气火花放电<sup>(37)</sup>。直管式结构的装置比较简单，容易解决染料和灯的冷却问题，但由于上升时间太长，泵浦的染料种类太少而受限制。

同轴式结构如图6所示。同轴灯的圆柱形等离子体将染料池包围，通过低电感火花间

表 4 染料激光的种类及其特性

激 励 源		可变波长范围(上: 输出, 下: 调谐范围)										微微秒产生		
输出, 脉冲宽度	重复频率	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12	
		$\times 10^3 \text{ \AA}$												
红宝石激光 6943Å 20Mw~20ns 及其谐波 3472Å 5Mw 钕玻璃激光 5320Å 2Mw~20ns 及其谐波 400mw~230ns	pps S* S 1500	~100W	~400kW	~4MW						~15kW	~160kW			10psec
N <sub>2</sub> 激光 3371Å 250Kw~10ns	~100	~0kW	~60kW						~0.1Å	~0.1Å				
闪光灯 同轴式 前沿80ns 同轴式 前沿150ns 输入100 J 直管式	S 1/6 10	* * *										3psec ~5psec		
连续波CW Ar激光5145Å } 各1W 4880Å }	CW	~1mw	~60mw							~0.01Å	~0.5Å			1.5psec

\* S是指单触发。 \*\* 目前可能振荡的区域。pps 每秒脉冲数, psec 微微秒, ns 毫微秒

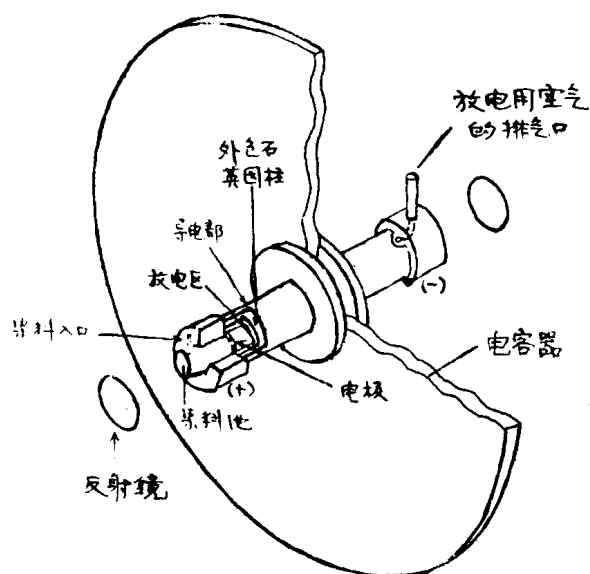


图 6 低电感闪光灯泵浦装置

隙把同轴灯与圆盘形同轴电容器相连,调准气压使等离子体在闪光灯中均匀分布。由于同轴结构降低了激励电路的电感,使灯的脉冲的前沿较为陡峭,因此产生激光振荡的染料种类多。在一个直径为 15 毫米的染料池,放电长度为 240 毫米的同轴灯泵浦装置中,电输入能量为 625 焦耳时,激光输出能量为 5 焦耳,转换效率为 0.8%<sup>[38]</sup>。用这种型式的灯对许多染料泵浦得到了以前只用激光泵浦才能得到的激光<sup>[39]</sup>,使调谐范围增大。但缺点是不能快速重复。

闪光灯泵浦的特征是脉冲能量高和相应的脉宽从 10~1000 毫微秒。最大的问题是灯的脉冲上升时间长,以致在这个时间内无法避免三重态的建立,因此用闪光灯泵浦的染料经常需要添加淬灭剂。在加有三重态淬灭剂的自由振荡激光器中,能获得 12 焦耳<sup>[40]</sup>、30 焦耳<sup>[41]</sup>、400 焦耳<sup>[42]</sup>的总输出能量。近年来,用短的自由约束的火花放电泵浦染料激光器,实现了 2 千周高重复率和 5 毫焦耳低阈值的工作<sup>[43]</sup>。最近用涡流放电性能好的闪光灯,以每秒 20 次重复率得到了平均 10 瓦的输出,闪光灯的寿命超过了 20 万次。闪光灯泵浦的染料激光器的光谱范围为 330~972 毫微米<sup>[44]</sup>。

## 2. 激光器泵浦

用红宝石激光及其谐波作泵浦源时,染料激光的调谐范围是 0.4~1.0 毫微米,而其二次谐波则可复盖紫外区域。这种泵浦源可获得相当大的输出,可能产生超短脉冲,但重复率较小。Q 开关红宝石激光器作为泵浦源的优点是它的脉宽与染料荧光寿命同数量级,因而可忽略三重态效应而得到高转换效率。如果所选用染料的量子效率高,转换效率可高至 50%。用 Q 开关 YAG 激光器的二次谐波作泵浦源时可获得很高的增益,这种泵浦源常常使用于超小型的薄膜染料激光器中。

用钕玻璃激光器的二次谐波作泵浦源,比用闪光灯泵浦能使更多的染料产生激光。由于泵浦脉宽很小,为了得到窄的线宽,必须选用合适的短谐振腔。但这种泵浦源不能产生 0.53 毫微米以下的振荡。虽然可用更高的谐波泵浦,但太弱的泵浦光源没有实用价值。用作产生谐波的非线性晶体的表面及内部容易受损伤,这会影响到泵浦光减弱和不稳定。

氮激光能泵浦的染料种类最多。用输出功率为 100 千瓦~数兆瓦的氮激光激励时,其波长可从紫外的 360 毫微米到近红外的 950 毫微米<sup>[44]</sup>,而且,用它的二次谐波,还可使波长可变范围扩大到 230~770 毫微米,此外脉冲重复率高(~1000 脉冲数/秒),脉宽小(5~10 毫微秒)是其优点。但发生微微秒脉冲比较困难,部分锁模的脉宽为  $10^{-10}$  秒<sup>[45]</sup>。图 7 示出氮激光泵浦装置。

近期用 GaAlAs 脉冲激光器泵浦的染料激光器得到了近红外部分的振荡<sup>[46]</sup>。目前,激光器泵浦的染料最短波长是 341~360 毫微米,最长波长是 1.175 微米<sup>[47]</sup>。

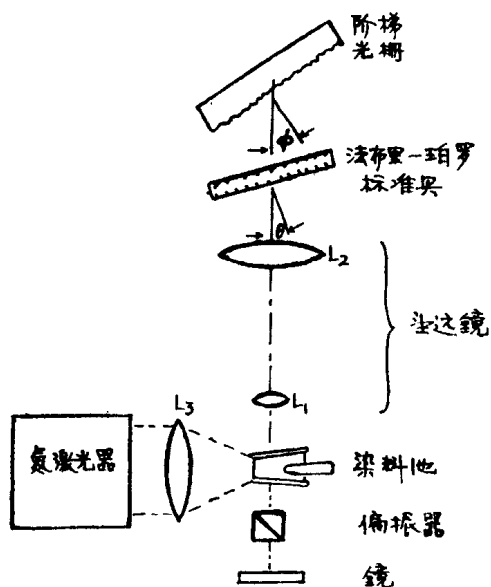


图 7 氮激光泵浦的窄带染料激光器



激光器泵浦方式可以分同轴、近轴、横向等。

同轴泵浦可使泵浦激光的模参量与染料激光谐振腔的模参量能很好地匹配，因而获得了最佳转换和良好的模控。

近轴泵浦可以避免介质涂膜和由反馈至泵浦激光器所遇到的困难。

横向泵浦时，模控比较困难，增益区的空间不均匀可以很高。

### 3. 连续波泵浦

输出波长的单色性不仅决定于调谐元件的波长选择性，还取决于激光束的发散角及振荡的持续时间。就这一点来说，连续波染料激光器是最有利的。由于离子激光器能获得 TEM<sub>00</sub> 单模几瓦功率输出，因此是最理想的连续泵浦源。最初是在若丹明 6G 中获得连续波激光。泵浦光聚焦于染料池内，池的两窗构成半球谐振腔。在这种谐振腔中，光束腰部直径随腔的增长而增大，腔长变化 1 微米，光斑直径就加倍。为了使腰部直径足够小，谐振腔长度只有几个毫米，位置容限仅数微米，在腔内就不能放入调谐元件，因而也就得不到可调谐输出。为了使连续波输出可调，引入三元件谐振腔使位置容限增大<sup>[48]</sup>，如图 8 (a) 所示，在此系统中，三个元件的位置容限都随谐振腔增大而增大。可是这种谐振腔对介质镀膜的要求很高（对泵浦波长有高透射率，对激光波长有 ~99% 的高反射率），而且泵浦激光强度在镀膜上最大。

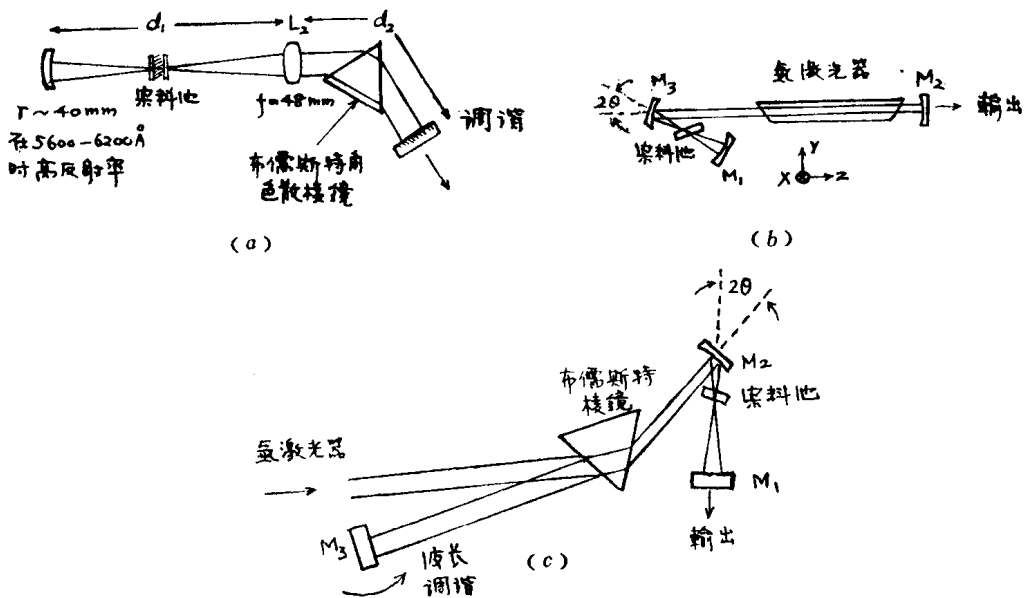


图 8 连续波染料激光器谐振腔的结构  
 (a) 内透镜、棱镜调谐结构；(b) 最初用于内泵浦腔起补偿作用的三元件谐振腔；  
 (c) 外泵浦补偿腔。

解决这些问题的方法是在腔内泵浦染料激光器中使用有镜系统的三元件谐振腔<sup>[49]</sup>，如图 8 (b) 所示。倾斜的反射镜引入象散，因为它的有效焦距在两个平面中将不同。这又意味着腔参量和稳定区在这两平面中有差别。这种效应可用来补偿由布儒斯特角定位的染料池引入腔内的象散，后者是当光束进入池时在 Y 方向而不在 X 方向改变光斑的直径，这是由池中不同有效光程引起的。可以证明，调准染料池的厚度和谐振腔的折合角，可使反射镜引入的象散与染料池引入的象散抵消，并可导出三镜补偿腔全稳定性的标准，对给定的