

# 染料激光技术现状

北京光电技术研究所

## 前 言

可调谐激光器问世十多年来发展相当迅速,种类也不断增多,而其中最引人注目的是染料激光器。染料激光器具有许多其它激光器不可比拟的优点。这就使染料激光器不仅倍受激光技术研究人员的重视,而且也受到其它科学技术领域研究人员的注意。近五年来,在国际激光市场上几乎每年都有新的商品化染料激光器出现。因而使染料激光的应用也不断扩大。

四年前(1976年)我们编写了‘可调谐激光器’资料集,其中‘染料激光器’作为较理想的波长可调谐激光源占了相当大的篇幅。染料激光技术近几年的发展很快,迫使我们不得不重视其与日俱增的作用。因此我们广泛搜集了国外三年来(1976年—1978年)有关染料激光技术和应用的文献资料,编写了本资料作为‘可调谐激光器’的续篇。

本资料的目的是为从事染料激光器研究和使用的技术人员提供各种染料激光技术的最新发展情况和国外染料激光器生产情况。

本资料分为八章,第一章回顾十多年来国外染料激光技术的发展,综述了染料激光技术发展的特点,介绍了目前各类染料激光器的水平。第二章评论了三年来染料激光技术的发展现状,其中包括泵浦技术、波长调谐技术、压缩线宽、混频和倍频、锁模与放大技术等。第三章反映激光染料的现状。第四章是染料激光参量测试技术。第五章论述染料激光的应用情况及应用展望。第六章至第八章介绍国外染料激光器生产与科研情况。最后附国外几种先进水平的染料激光器图片。

本资料经王应哲工程师、颜炳玉工程师和姜小泉工程师审校后提出许多宝贵意见,特此感谢。

北京光电技术研究所

白国强

1980年6月

# 目 录

第一章 综述	1
第二章 染料激光技术	7
一、各类染料激光器技术现状	7
(一)闪光灯泵浦的染料激光器	7
1. 激光器结构	7
2. 双波长技术	12
3. 短脉冲技术	13
4. 理论研究	15
5. 闪光灯与电源	18
(二)氮分子激光泵浦的染料激光器	22
1. 扩束系统	23
2. 双波长输出	29
(三)准分子激光泵浦染料激光器	30
(四)固体激光泵浦染料激光器	33
(五)氩离子激光泵浦染料激光器	36
1. 结构	36
2. 锁模技术	40
3. 提高功率	40
4. 扩展波长	40
5. 稳频技术	41
(六)其它染料激光器	42
1. 汽相染料激光器	42
2. 分布反馈染料激光器	43
3. 薄膜染料激光器	45
4. 氩离子激光泵浦染料激光器	46
5. 氮离子激光泵浦染料激光器	46
6. 火花泵浦染料激光器	46
7. 染料激光泵浦染料激光器	47
8. 半导体激光泵浦染料激光器	47
9. 铜蒸汽激光泵浦染料激光器	47
10. 乳胶染料激光器	47
二、波长调谐技术	47
(一)双折射棱镜调谐	48

(二)压力调谐	48
(三)磁力调谐	49
(四)浓度调谐	50
三、锁模技术	50
(一)主动锁模	50
(二)被动锁模	54
(三)腔倒空技术	57
四、频率转换技术	57
(一)倍频技术	58
(二)和频技术	60
(三)差频技术	63
五、放大技术	64
<b>第三章 激光染料</b>	66
一、红外染料	66
(一)连续波红外激光染料	66
(二)脉冲红外激光染料	71
二、短波长染料	71
三、激光染料一览表	76
四、激光染料产品情况	103
<b>第四章 染料激光参量测量技术</b>	121
一、带宽和波长稳定性	121
二、脉冲宽度测量	121
(一)条纹照相机	121
(二)二次谐波自相关技术	122
(三)双光子荧光技术	123
<b>第五章 染料激光应用现状</b>	125
一、激光光谱学	125
(一)吸收与荧光光谱学	125
(二)非线性光谱学	131
(三)相干反斯托克斯喇曼光谱学	135
(四)微微秒脉冲光谱学	140
(五)光声探测光谱学	141
(六)仪器与新技术引用	141
二、同位素分离	144
三、污染监测	147
四、生物学	148
(一)人体皮肤的研究	150
(二)遗传工程	150

(三) 癌症防治.....	150
五、其它应用.....	151
<b>第六章 国外染料激光器生产情况.....</b>	<b>153</b>
一、脉冲染料激光器.....	153
(一) 闪光灯泵浦染料激光器.....	153
(二) 氮分子激光泵浦染料激光器.....	157
(三) 红宝石激光泵浦染料激光器.....	157
(四) Nd:YAG 激光泵浦染料激光器.....	157
(五) 准分子激光泵浦染料激光器.....	157
(六) 铜蒸汽激光泵浦染料激光器.....	161
二、连续波染料激光器.....	161
三、产品发展方向.....	161
<b>第七章 国外染料激光器生产厂商介绍.....</b>	<b>166</b>
一、美国.....	166
二、西德.....	178
三、英国.....	180
四、法国.....	181
<b>第八章 国外染料激光技术研究机构概况.....</b>	<b>185</b>
<b>附录：染料激光器产品介绍</b>	
<b>参考文献</b>	

## 第一章 综 述

自从 1966 年染料激光器问世十多年来, 已发展到趋于成熟阶段。

染料激光技术的发展可划分为四个阶段:

(1) 理论探讨—(1961年—1966年)—1961年 S.G.Rautian 等人<sup>[1]</sup> 研究了有机化合物的能级跃迁, 为染料激光器的问世奠定了理论基础。1963年—1964年 D.L.Stockman 等人<sup>[2]</sup> 的实验首次证明能从有机化合物中产生激光发射。当时使用大功率闪光灯激励溶于苯中的苝(二萘嵌苯), 发现有光增益现象, 很遗憾他们只做了苝的实验, 而苝的三重态之间的吸收作用使激光发射非常微弱。如果他们换用若丹明 6G, 那么结果就会截然不同, 染料激光器也就可能早诞生两年。

(2) 染料激光器问世与早期发展—(1966年—1969年)—这个时期是染料激光诞生和发展阶段。1966年美国国际商业机器公司托马斯·J·威特森研究中心的 P.P.Sorokin 和 J.R.Lankard<sup>[3]</sup> 在对染料溶液进行大脉冲激光照射研究其喇曼散射时, 偶然发现有强光增益, 并确定从激励单重态发出的荧光可实现激光振荡。他们使用的染料是氯化铝-酞花青染料 (chloro-aluminum-phthalocyanine)。此后不久又有人用巨脉冲红宝石激光激励染料产生激光。于是广开思路, 摸索用闪光灯和用激光泵浦染料。另一方面从理论上也相应研究各种能够产生激光发射的染料。这时在实验室能够获得的染料激光波长从可见光发展到近紫外和红外。同时也相应地研究成功用棱镜和光栅调谐染料激光。

(3) 技术突破与重大成果—(1970年—1974年)

染料激光技术的一大突破是实现波长连续输出的可调谐激光运转。1970年美国伊斯曼·柯达研究实验室的 O.G.Peterson 等人<sup>[4]</sup> 用氩离子激光器泵浦若丹明 6G 水溶液获得了连续染料激光。另一突破是实现超短脉冲染料激光, 脉宽达 10~30 微微秒。1970~1972 年又先后实现了 2 微微秒和 1.5 微微秒脉宽染料激光。在这个时期相继出现了用氩离子激光、氮分子激光、Nd:YAG 激光泵浦的染料激光器; 染料循环流动技术、倍频技术和锁模技术等也开始应用于染料激光领域。

(4) 趋向成熟和走向应用——1974年——自从 1974 年以后, 染料激光器产品日益增多, 并逐渐发展成系列化。目前染料激光器和染料激光应用仪器的性能和技术指标都在不断提高。在泵浦技术、波长调谐技术、波长复盖范围、稳频技术以及染料技术等达到较高水平。

染料激光器是由激光工作物质、谐振腔、泵浦源、聚焦系统以及波长选择元件等组成的。激光工作物质是染料, 通常是将染料制成  $10^{-2} \sim 10^{-5}$  克分子浓度的液体, 装入高速循环容器中, 也有将染料加热成汽相或掺杂在透明介质中做成固态的。按染料激光工作方式可分为脉冲式和连续式的。表 1 是各种染料激光器性能及特点的介绍。用闪光灯泵浦染料时应尽量缩短泵浦光上升时间, 因而要尽量减小放电电路和聚光腔体的电感。所以闪光灯泵浦的染料激光器的改进重点放在闪光灯、电路和结构上。而用激光泵浦的染料激光器的研究重点是提高平均功率、压窄谱线宽度、实现超短脉冲和扩展波长范围。

表 1 各种染料激光器性能及特点

种 类 (泵浦源)	性 能		特 点	应 用
	工 作 波 长 (毫微米)	输 出 功 率		
闪光灯(脉冲) 1) 直管 2) 同轴	445~700(基波) 215~350(倍频) 321~1216	~114瓦 ~10焦耳	输出峰值功率大, 波长复盖范围广, 工作寿命短, 脉冲重复率低。	光化学、同位素分离、测污、高分辨率光谱学
氮分子激光 (脉冲)	217~750 (倍频)	~100千瓦 (峰值)	峰值功率高, 短脉冲, 制造简单, 重复频率高, 输出功率稳定性差。	紫外/可见光谱学, 非线性光学、多光子吸收, 相干反斯托克斯拉曼散射。
氩离子激光 (连续)	211~1020(倍频)	~34瓦	线宽窄, 平均功率高, 能量转换效率较高	原子和分子光谱学, 拉曼散射
Nd:YAG激光 (脉冲)	185~1285(倍频)	~1.05瓦	可锁模, 易倍频	可见/紫外光谱学, 荧光寿命测定
准分子激光 (脉冲)	334~700	~1兆瓦 (峰值)	峰值功率高 平均功率高	高分辨率光谱学, 光化学 同位素分离
汽相染料	380~405	~1千瓦 (峰值)	结构紧凑, 能量转换效率高	非线性光学、光谱学, 光化学, 同位素分离

表 2 染料激光器工作特性<sup>[5]</sup>

项 目	特 性	工 作 条 件
振 荡	脉冲	闪光灯或激光激励
波长范围	连续	连续波气体激光激励
输出 功率	脉冲	能量: $\leq 400$ 焦耳 峰值功率: $\leq 40$ 兆瓦 峰值功率: $\leq 70$ 兆瓦 模同步: $\leq 20$ 兆瓦 } 闪光灯激励, 重复频率 $\leq 500$ 赫 (最高) } 激光激励, 重复频率 $\leq 2$ 千赫 (最高)
	连续	$\leq 2\sim 3$ 瓦 连续波气体激光器激励
能 量 转换效率	脉冲	一般: 1~30% (最大: ~50%) 一般: 0~0.1% (最大: 1.2%) 激光激励(染料激光功率/泵浦激光功率) 闪光灯激励(染料激光功率/闪光灯输入功率)
	连续	约10~30% 激光激励

(续)

项 目	特 性	工 作 条 件
脉冲宽度	一般: $\sim 0.5-600$ 微秒 一般: $\leq 20$ 毫微秒 模同步: $\geq 1$ 微微秒 ( $\leq 0.3$ 微微秒)	闪光灯激励 激光激励 闪光灯, 激光激励
谱线宽度	$\sim 1-20$ 毫微米 $\sim 1-5$ 毫微米 ( $\geq 0.1$ 毫微米) $\sim 0.1-0.05$ 毫微米 ( $\geq 0.01$ 毫微米) $\sim 0.03-0.3$ 毫微米 ( $\geq 3 \times 10^{-3}$ 毫微米) $\sim 0.13$ 毫微米 $\sim 5 \times 10^{-4}$ 毫微米 $\sim 1-5 \times 10^{-3}$ 毫微米 $\sim 0.1-1 \times 10^{-3}$ 毫微米 $\sim 0.2-1 \times 10^{-5}$ 毫微米 (2-8MHz)	反射镜谐振腔 一个棱镜 (+ 望远镜) 五个棱镜 (+ 望远镜) 衍射光栅 (+ 望远镜) 声光滤光片一个 双折射滤光片六个 法布里-珀罗标准具一个 光栅 + 标准具 单纵模振荡, 三个标准具

染料激光器的最大优点是能够利用染料的大约一百毫微米宽的荧光, 经光泵浦后可以获得波长可调谐激光。这种激光频带的中心波长是根据染料的浓度、溶剂种类、染料池长度、谐振腔的Q值、温度等特性而变动的。因而调谐以上参量即可变化染料激光波长。为了压窄谱线宽度可以用色散元件和标准具等。此外, 染料种类繁多, 便于选择。可以实现连续波输出、脉冲输出、Q开关和超短脉冲等。

染料激光器现存的缺点是: 染料易分解、再向紫外和远红外波段扩展比较困难。由于没有实现直接电激励, 因而总能量转换效率低。

从染料激光技术近年来的发展来看, 染料激光技术在以下几方面取得了较大进展。

1. 短脉冲技术——要满足激光光谱研究的要求, 毫微秒脉冲染料激光已经落伍了。代之是微微秒脉冲激光。产生短脉冲染料激光的最常用方法是把泵浦激光器(氩离子激光器、氦离子激光器或Nd:YAG激光器)锁模, 然后使染料激光谐振腔长度与泵浦激光器匹配。如果两腔长度匹配小于一毫米, 则染料激光与泵浦脉冲同步并消除抖动。虽然同步锁模染料激光技术研究已经在几年之前就开始了, 但只是在1976年末才有突破。1978年美国贝尔电话实验室的Jain和Heritage<sup>[6]</sup>用一台锁模氩离子激光器泵浦两台染料激光

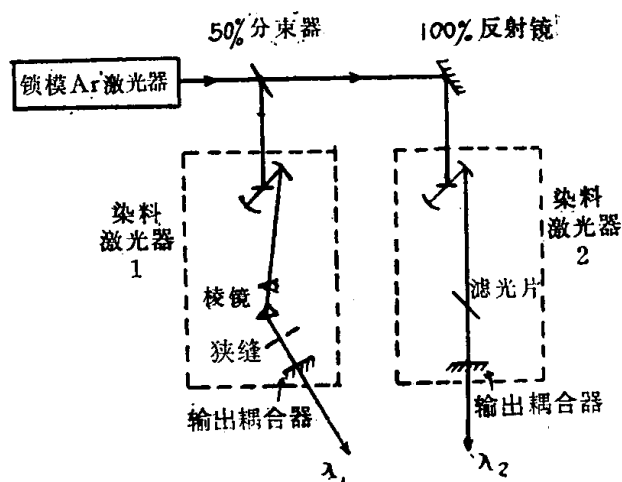


图1 用一台锁模氩离子激光器同时泵浦两台染料激光器



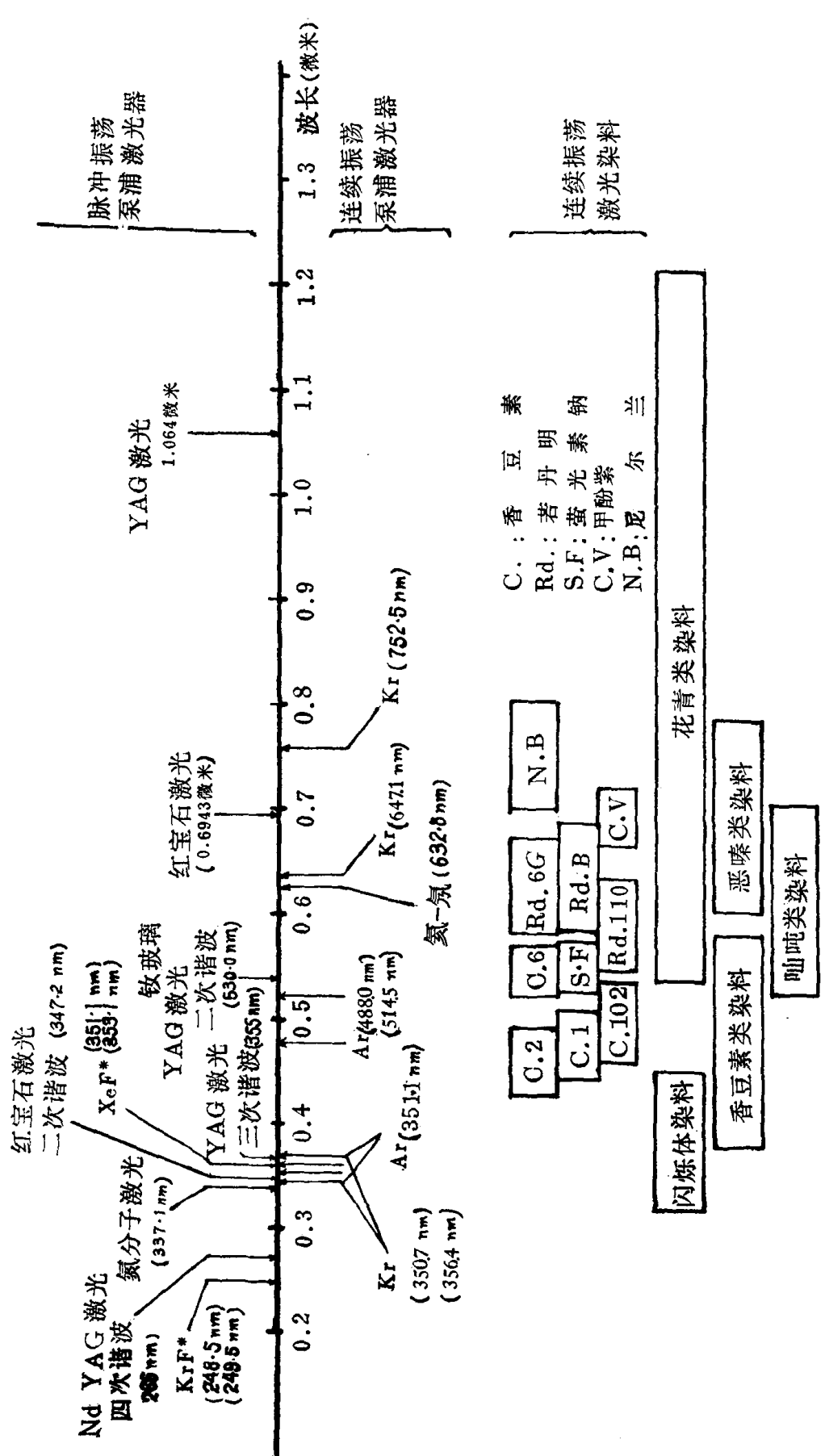


图 2 激光染料波长范围及各类泵浦激光波长。

器，获得了可调谐锁模激光脉冲列。图 1 是锁模染料激光结构图。采用相关测量法测得的脉冲宽度为 5 微微秒，脉冲列之间跳动小于 10 微微秒。

目前这方面的研究工作仍在不断取得进展。

2. 向长波长扩展——将染料激光波长向红外波段扩展一直是人们探索的课题之一。西德马克斯·普朗克研究所的 J.Kuhl 等人把染料激光延伸到了远红外区<sup>[7]</sup>。这是在他们获悉某些聚甲炔染料在 685~965 毫微米波长上能有效地连续发射激光之后，决定把这些染料进行同步锁模，用 647 毫微米波长锁模氦离子激光器泵浦。图 3 是三种染料的波长调谐曲线，虚线是三种新染料的波长调谐曲线。目前不只限于锁模连续波染料激光器，要从短脉冲染料激光器中获得高峰值功率和高平均功率，必须使用重复 Q-开关 Nd:YAG 激光器作为泵浦源。这是因为红宝石和钕玻璃激光器不能产生足够快脉冲激光以保持高平均功率，而氮分子激光器作泵浦源时，延伸到红外区的激光峰值功率下降。

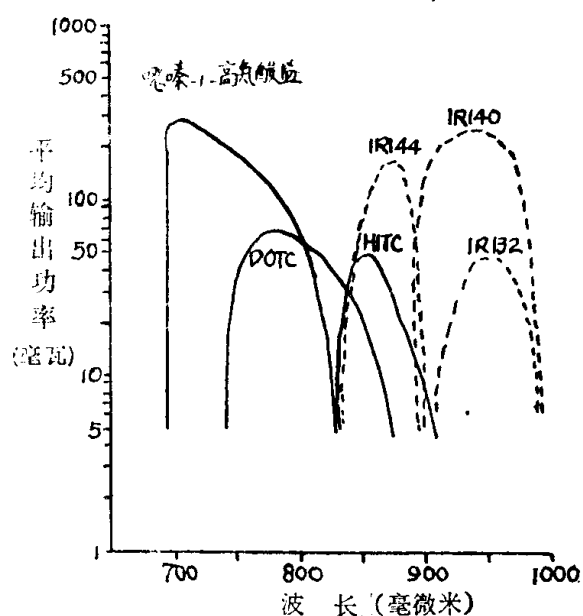


图 3 波长调谐曲线，虚线是三种新染料。

日本防卫厅第一研究中心的加藤<sup>[8][9]</sup>致力于用 Q-开关 Nd:YAG 激光器振荡-放大系统作为泵浦源，扩展染料激光波长。先后实现了 1081~1216 毫微米和 1192~1285 毫微米波长范围染料激光。

3. 向短波长扩展——在许多光谱学应用方面需要短波长紫外可调谐激光。采用倍频和三倍频技术可以获得短波长染料激光。倍频泵浦激光或倍频染料激光都能达到目的。美国加利福尼亚大学的 A.J.Cox 等人<sup>[10]</sup>用被动锁模钕玻璃振荡放大器输出三倍频激光泵浦某些短波长激光染料，采用短谐振腔结构，获得了 420~465 毫微米波长、峰值功率 3 兆瓦、脉宽 10 微微秒可调谐激光。目前一般脉冲染料激光器的倍频波长下限达 215 毫微米。西德黑森大学的 V.Wilke 和 W.Schmidt<sup>[11]</sup>用 Nd:YAG 振荡-放大器泵浦染料激光振荡-放大器获得 185~880 毫微米可调谐激光。将连续波染料激光倍频到紫外波段受到调谐技术和其它操作的限制。美国赖斯大学的 S.Blit 等人<sup>[12,13]</sup>利用二次谐波和和频技术获得 257~400 毫微米波长连续波染料激光。

要使染料激光器达到实用化，还应注意以下几项技术的发展：

(1) 提高脉冲重复率，达到1000赫兹以上的准连续水平；(2) 压窄谱线宽度，达到 $10^{-3}$ 埃以上；(3) 稳频技术；(4) 放大技术；(5) 泵浦技术；(6) 波长自动显示技术；(7) 波长扫描微信息处理控制；(8) 研制新型激光染料。

染料激光的优点使其应用范围不断扩大。近年来在以下几个应用领域取得了进展：

1. 稀土元素的光谱分析——用单纵模连续波染料激光器(包括使用锁定放大器和数据处理装置)，分析原子的超精细结构。例如分析 $^{139}\text{La}$ 的593.06毫微米超精细结构<sup>[14]</sup>研究了 $\text{Pr}^{3+}:\text{LaCl}_3$ 的吸收谱线变窄现象<sup>[15]</sup>。

2. 衍生光谱学——这种技术的优点是能够探测样品与波长有关的透射率的变化。曾用这种技术研究了606.3毫微米波长附近的苯的五次谐波<sup>[16]</sup>。

3. 用激光共振荧光监测单个原子的热速度，理论分析表明有些原子在与染料激光相同光谱范围内存在共振<sup>[17]</sup>。此外还能测量风洞中气体流速。

4. 喇曼光谱学——这个激光独占的光谱学领域中，相干反斯托克斯喇曼光谱学和受激喇曼光谱学两个应用领域又被染料激光占据。

除此之外，染料激光在光化学、同位素分离、全息术、通讯和集成光学、医学和生物学等领域的应用仍将不断扩大。

自从一九六九年美国Xenon公司将第一台商品化红宝石激光泵浦染料激光器投入国际激光市场以来，染料激光器的硬件技术和应用发展很快，几乎每年都有新产品问世，主要技术指标和性能都有程度不同的提高。目前国际市场上作为商品出售的染料激光器已经有七种，近百个型号产品。世界上生产染料激光器的国家有美国、苏联、西德、英国、法国、日本等。从产品的种类、数量和质量上来看，都是美国占首位，其次是西德和英国。

世界上制造闪光灯泵浦染料激光器的厂家有十个，其中以美国相位-R公司、坎德拉公司和克罗玛提克斯公司的产品水平提高。制造氮分子激光泵浦染料激光器的厂家有九个，其中以西德兰姆达物理公司和美国分子电子公司水平最高。制造连续波染料激光器的厂家有四个，以美国光谱物理公司水平最高。制造准分子激光泵浦染料激光器的厂家以西德兰姆达物理公司水平最高。

预计未来五年，随着染料激光技术的发展，染料激光器的性能不断提高，将会出现以染料激光器为主体的实用化染料激光仪器和设备。

虽然染料激光器的发展比较迅速，但仍局限在实验室应用范围。要使染料激光器发展到实际应用水平，还要克服目前染料激光器存在的缺点和不足。其中染料寿命短、波长范围不够广、输出功率在激光波长范围不均匀、谱线不够窄和能量转换效率低等都希望有较大的进展。

国外有人估计今后十年染料激光技术虽然会有较大发展，但不会出现什么重大技术突破。

## 第二章 染料激光技术

### 一、各类染料激光器技术现状

根据染料激光器的工作方式可分为连续波式染料激光器、脉冲式染料激光器两类。

目前染料激光器的泵浦源已经发展到以下十多种：闪光灯、氮分子激光器、红宝石激光器、 $\text{Nd}:\text{YAG}$  激光器、准分子激光器、氙离子激光器、氪离子激光器、半导体激光器、放电泵浦、电子束以及染料激光器等。其中前七种光源泵浦的染料激光器已有商品供用户选购。

#### (一) 闪光灯泵浦的染料激光器

闪光灯泵浦的染料激光器是以脉冲方式工作的染料激光器，是几年来技术发展较快的染料激光器。其性能和主要技术指标都有明显提高。

闪光灯泵浦的染料激光器的优点是：脉冲输出峰值功率高、波长复盖范围宽，缺点是不能实现高重复率脉冲工作、能量转换效率较低。

目前闪光灯泵浦的染料激光技术的研究重点是：

#### 1. 激光器结构

早期闪光灯泵浦染料激光器的结构有直管闪光灯和同轴式闪光灯两种，基本上是单灯泵浦。直管式泵浦的激光输出能量较低，但脉冲重复率较高；同轴式泵浦的激光输出能量较高，从 1~10 焦耳，但脉冲重复率低  $< 50$  赫兹。这两种结构的激光平均输出功率几乎相同。

为提高染料激光输出功率和能量转换效率，近年来发展了双灯和多灯泵浦技术。

法国弗兰克-阿里曼研究所的 A·Hirth 和 H·Fagot 用两个闪光灯泵浦染料激光器，获得了较高平均功率可调谐激光，用以实时测量飞机周围速度分布轮廓<sup>[18]</sup>。为了适于实际应用，他们采用 50~100 微秒的长脉冲持续时间和提高脉冲重复率（ $\sim 100\text{Hz}$ ）方法。为了使染料激光输出功率稳定并且工作寿命长（ $> 10^6$ 次），采用了预燃方式的闪光灯。为了使电路阻抗与闪光灯阻抗匹配，以及在 60~70 微秒时间内达到恒定的闪光强度，用脉冲形成网路（8 个固有电容）代替一个储能电容。激光头的结构（见图 4）是在双椭圆反射腔内安装两个电弧部分长 50 毫米，芯粗 2 毫米的直管闪光灯（国际激光公司 2F2 型），用一克分子浓度的硫酸铜溶液作为冷却剂和有害辐射吸收剂。

布鲁斯特角石英染料池长 60 毫米，内径 2.5 毫米。染料池的粗糙内表面是为了防止产生低噪声模。激光介质是溶于水的  $5 \times 10^{-5}$  克分子/升的若丹明 6 G，加进 2% 的 ammonyx LO 去聚剂，并用 0.8 微米微孔过滤染料溶液。激光腔输出端是反射率为 0.87 的平面镜，另一端是球面全

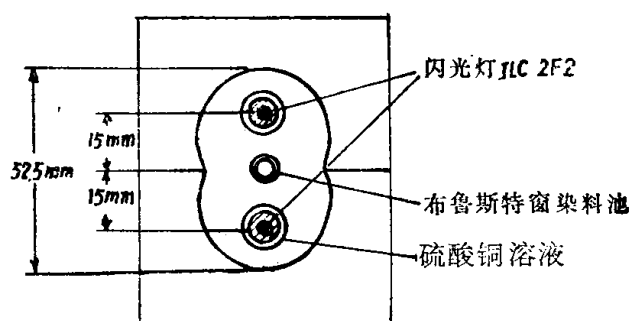


图 4 染料激光头剖面图

反射镜（曲率 50 厘米）。使用球面镜能够部分地补偿热透镜效应。激光泵浦阈值是 7 焦耳。在泵浦能量较高的时候，需调节球面镜，使其产生 60 微秒脉冲宽度的矩形脉冲。染料激光光束发散度为 3 毫弧度。当激光脉冲重复率为 10 赫兹时，其再现性最好。在毫微秒时间范围内详细分析时发现其输出能量变化小于 5%。不使用模选择元件时，598.5 毫微米的线宽为 1.8 毫微米。使用腔内干涉滤光片时线宽为 0.2-0.3 毫微米。插入色散棱镜可在 587-617 毫微米范围内调谐激光波长。图 5 表示激光输出能量与闪光灯总泵浦能量的关系，曲线 II 是在二升若丹明溶液中加入 400 微升 CDT（1, 3, 5, 7, 环辛四烯）时的

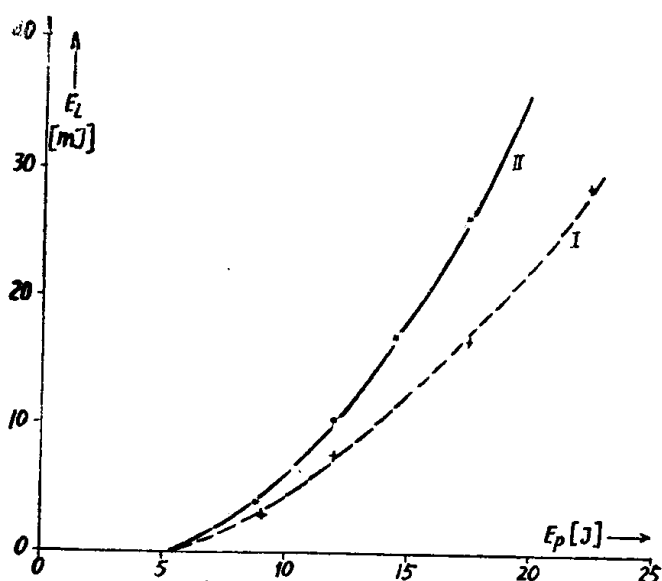


图 5 每个脉冲激光能量与泵浦能量的关系。曲线 I:  $5 \times 10^{-5}$  克分子/升若丹明 6G + 2% AmmonyxLO; 曲线 II:  $2 \times 10^{-3}$  克分子/升 COT。

输出能量，脉冲重复率为 100 赫兹，平均功率 4 瓦时的每个脉冲能量为 40 毫焦耳，总效率达 0.18%。实验证明闪光灯在  $10^5$  次闪光后没有使性能降低。二升若丹明水溶液的工作寿命是  $4 \times 10^4$  次脉冲。在  $6 \times 10^3$  次脉冲后能量降低 50%。这种染料激光器的最大能量为 90 毫焦耳，脉宽 60 微秒。泵浦能量为 30 焦耳时的能量转换效率为 0.24%。

其后，A·Hirth, H·Fagot 和 F·Wieder 又对双灯泵浦染料激光器稍加改进，并研究了染料的热透镜效应。从中找出达到最佳能量转换效率的染料激光结构，可使能量转换效率达 0.3%<sup>[19]</sup>。

美国联合技术研究中心 (United Technology Research Center) 的 W·W·Morey 和 W·H·Glenn 用提高染料激光脉冲重复率方法来提高激光输出平均功率<sup>[20]</sup>。他们采用涡流稳定闪光灯泵浦若丹明 6G 获得 225 赫兹脉冲重复率，平均功率 114 瓦的可调谐染料激光。泵浦染料激光器的闪光灯峰值辐射强度必须高于 50 千瓦/厘米<sup>2</sup>，最好是几兆瓦/厘米<sup>2</sup>。闪光灯的脉冲宽度应在微秒数量级以下。每次闪光应输出几百焦耳能量并保持高重复率。一般市场出售的闪光灯只能用于单脉冲和低重复率染料激光泵浦源。这种闪光灯有几个缺点，如果放电能量太高或脉冲宽度太小，则放电产生的声冲击波会使闪光灯爆炸损坏；由于闪光灯管壁和电极受到不透明物质的污染而减短了工作寿命。由于不透明的管壁大量吸收光能而使石英管受热损坏。

采用涡旋流动气体流经电极就可以克服以上困难。气体可以是氩气或氮气。涡流气体可以使放电与管壁保持一定距离，以消除石英管壁接触有害粒子，还可以有效地散热。

图 6 是这种染料激光器闪光灯驱动电路。在灯内要保持几毫安连续放电电流，主放电是由 2 或 4 微法电容器通过外部开关产生的。染料循环流动。长 11 厘米，厚 3 毫米的染料池是用 0.16 厘米厚不锈钢制成的，照射区长 1.9 厘米，支架用铝合金制成的。

在许多应用中，例如激光同位素分离和光化学等，要求染料激光的平均输出功率高，

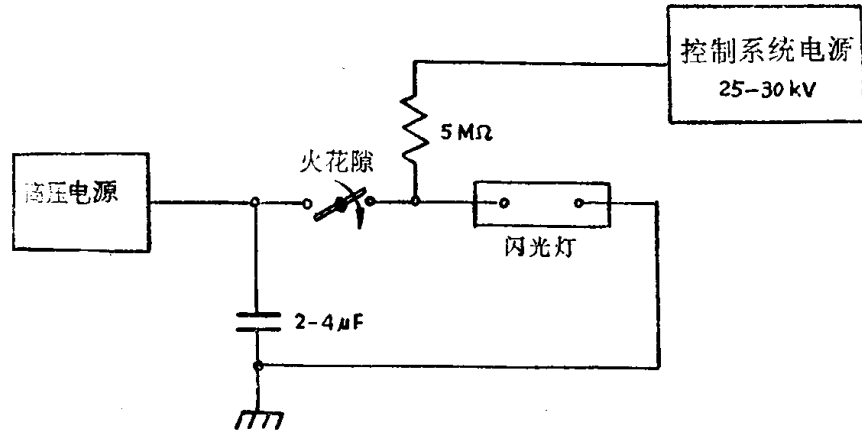


图6 闪光灯电路图

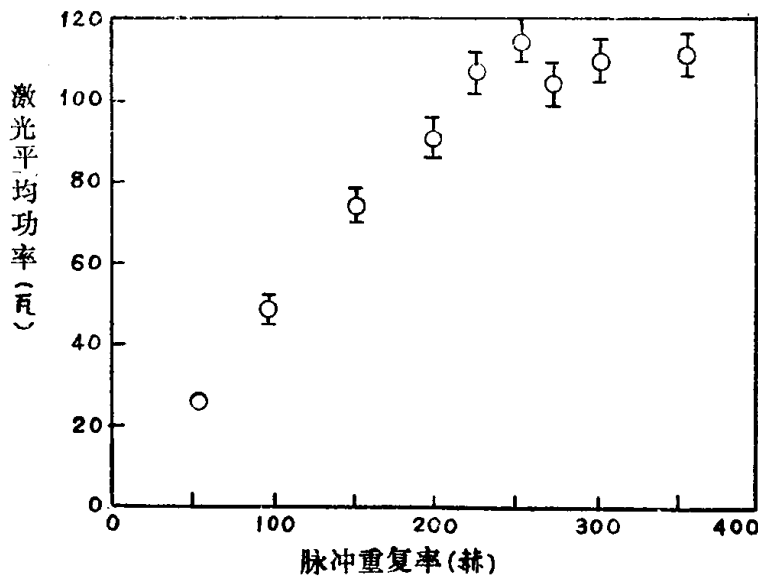


图7 染料激光平均输出功率与脉冲重复率的关系

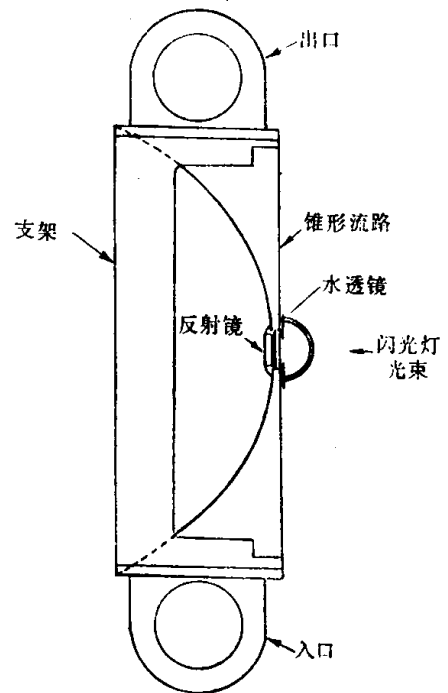


图8 染料流动结构侧视图

可靠性好。因此特别注意闪光灯放电参量的研究和染料激光谐振腔结构的研究。西德马克斯·普朗克研究所的 F. P. Schafer 和 J. Jethwa 研制成四灯泵浦的染料激光器<sup>(21)</sup>，结构如图9所示。使用反射镜、消球差透镜、会聚透镜和圆筒状反射镜，使闪光灯发出的光完全会聚成大约 85°角的光束投射到染料池上。用圆筒状反射镜代替了难于制造的椭圆形反射镜，并且尽可能消除象差。后反射镜和圆筒状反射镜镀有高反射率铝膜。整个系统的象差极小，这样四个相对称结构的闪光灯产生的光均匀照射到染料池上。闪光灯与染料池中心距离为 120 毫米。闪光灯外壁有冷却水夹套，可以避免闪光灯产生的冲击波影响染

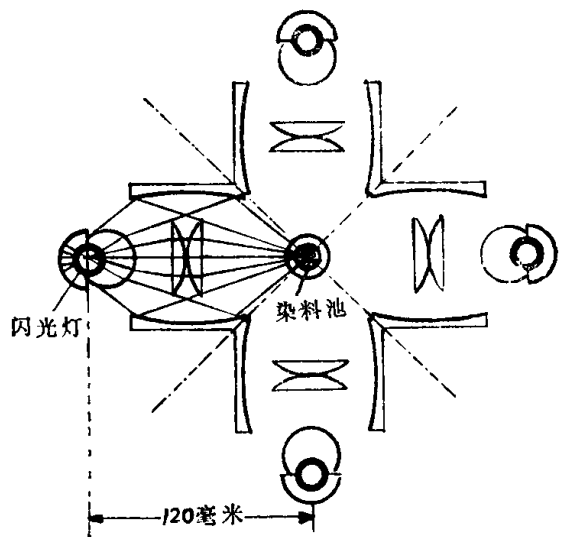


图9 四灯泵浦染料激光器结构

料池。闪光灯的水冷夹套是用派热克斯玻璃制成的，阻挡住能使染料光离解的紫外辐射。闪光灯是美国国际激光公司7F6型直管闪光灯，染料池是孔径1.05毫米的厚壁毛细管，管的内壁粗糙，可以防止产生低噪声模。

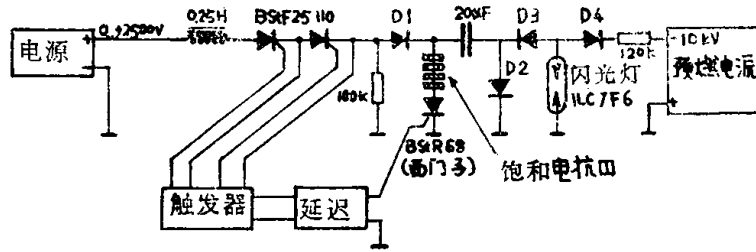


图10 闪光灯电路图

图10是闪光灯电路图。当BstF25110型（西门子公司）闸流管被触发时，20 $\mu$ F电容器通过0.25亨铁芯扼流圈和二极管D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>（每个都由六个ValvoBYX25/100型二极管串接）以大约是电源电压的两倍电压谐振变化。延迟9毫秒后，放电闸流管BstR68被触发，电容器通过饱和电抗器、放电闸流管、ILC7F6闪光灯和二极管D<sub>3</sub>放电。

为了要使染料能够在每次激光脉冲之后迅速更换，也对染料池和染料循环流动系统作为特殊设计。如图11和12所示。为了要使染料流速稳定，先把离心泵抽运的染料送至缓冲器，使流速稳定。而后流经一微米微孔聚四氟乙烯过滤器清除气泡。染料以25升/分钟流速流经染料池，这样可以保证每次激光脉冲都是更新后的染料。当平均输入功率为34千

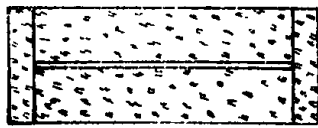


图11 染料池结构

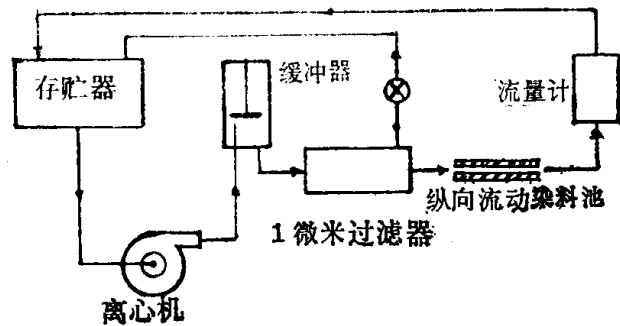


图12 染料循环系统图

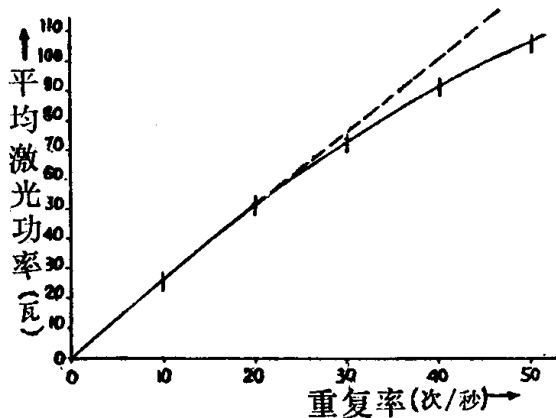


图13 染料激光脉冲重复率与平均输出功率之关系

瓦、重复率为50赫兹时，染料激光平均输出功率109瓦，效率达0.32%。从图13中可以看出染料流速在25升/分钟时并不能在每次激光脉冲后完全更新染料。如果充分更新染料，则有希望使染料平均输出功率提高到130瓦，效率达0.38%。这种染料激光器结构有较大发展前途，如果加大闪光灯和染料池尺寸，有可能用300千瓦输出功率的闪光灯获得1千瓦平均功率的染料激光。

日本九州大学工程系冈田等人研制一台用四个空腔式闪光灯泵浦的染料激光器<sup>[22]</sup>。在用

若丹明6G做激光介质时获得了 23.3 焦耳 (11.6兆瓦) 能量。同时对空腔型闪光灯的发光特性、染料激光器结构设计和能量转换效率做了较详细的研究。

① 闪光灯的发光特性：用短时间 ( $<10$ 微秒) 大电流 ( $>10$ 千安) 脉冲驱动的闪光灯发光特性与泵浦固体激光器的氙灯的发光特性截然不同<sup>(23)</sup>。闪光灯管是用长 15 厘米厚壁熔融石英管做成的，为了进行最佳选择，制备了内径从 2.2 毫米到 5.5 毫米不等的四根闪光灯管。管子两端用环氧树脂封接到铜电极上。分别用凹形电极，(图14 a) 和凸形电极 (图14 b) 进行实验。凹形电极的空腔室可以排除消蚀物，延长灯的工作寿命。充进空气或

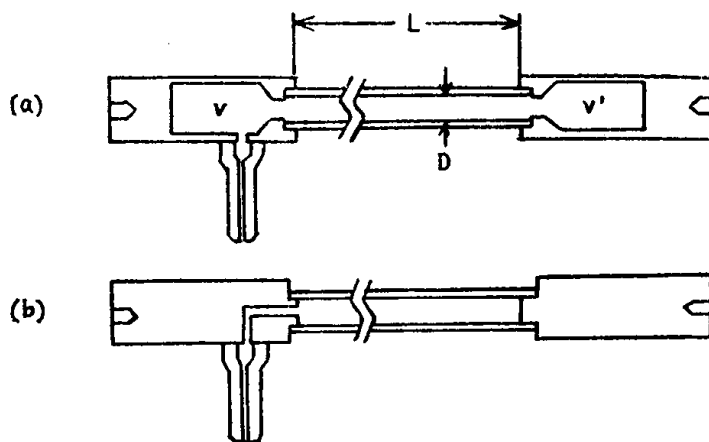


图14 闪光灯电极结构

氙气后，闪光灯由一至三个低剩余电感 ( $<20$ 毫亨) 并联电容 (1 微法, 30千伏) 和触发火花隙供电。为了能够快速放电，连接线要短，以尽量减小放电电路的电感。闪光灯上升时间 0.5~10 微秒，宽度为 1.5~2.0 微秒。

凹形电极的空腔室体积  $V$  和  $V'$  在 1.6~6.3 厘米<sup>3</sup> 时，闪光灯发光特性变化不明显。而凸形腔也有类似的趋向，但其发光效率要比凹形电极高 1.3 倍。另外，其曝光阈值能量要低 50%，所以凹形电极的寿命特别长。图 15 和图 16 分别是不同内径闪光灯的输出能量和发光效率曲线。

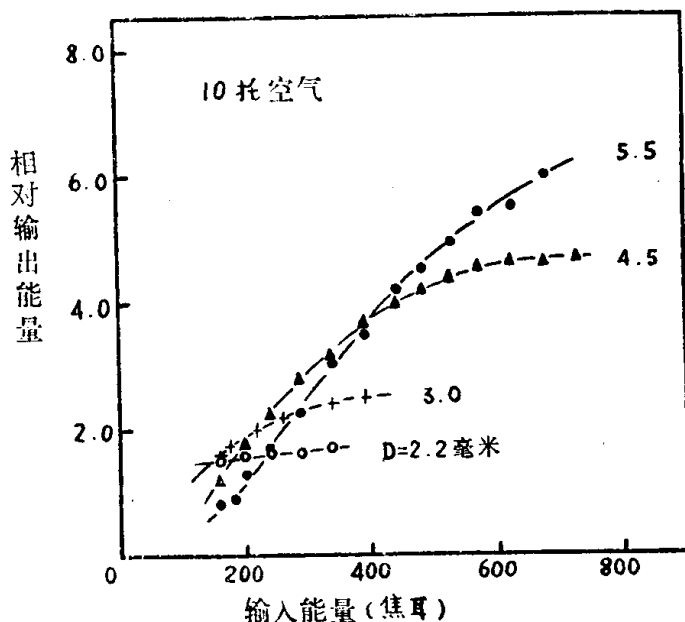


图15 闪光灯发光特性，发光区长度15厘米，两空腔体积分别是3.14厘米<sup>3</sup>



② 染料激光器结构设计：这种高能染料激光器是用四个闪光灯泵浦的，每个灯都联接两个并联低电感电容器。最大输入功率达 1.7 千焦耳。灯电极是凹形的，石英内管直径 8.5 毫米，长 40 厘米。这个尺寸最适于 1.7 千焦耳的输入能量。当灯内充以低于 1 托空气时，则闪光脉冲上升时间是 1 微秒，脉冲持续时间是 3 微秒。染料谐振腔是由四个椭圆筒状反射镜组成的，偏心率为 0.4。聚光腔内表面镀铝。如果染料池内径是 20 毫米，则理论泵浦效率可达 44%。染料池是石英材料，长度为 51 厘米，作用区长度 40 厘米。激光谐振腔长 60 厘米，是由一块筒形反射镜和一块平面介质膜耦合镜组成。

使用若丹明 6G 染料，将染料溶于空气饱和乙醇中，经孔径 0.2 微米过滤器过滤循环。染料最佳浓度是  $1.0 \times 10^{-4}$  克分子/升，最佳耦合反射率是 30%。染料激光发散度很大，达 20 毫弧度。这可能是因为热效应的缘故。在 1:1 的水和乙醇溶剂中加入 5% 的 TritonX-100 去聚剂可以使激光输出能量提高 32%。另外在染料溶液里加入 0.03% COT 三重态猝灭剂后，输入 7.6 千焦耳能量可以获得 23.3 焦耳激光输出，相当于半宽度为 2 微秒时 11.6 兆瓦输出功率。能量转换效率达 0.31%。

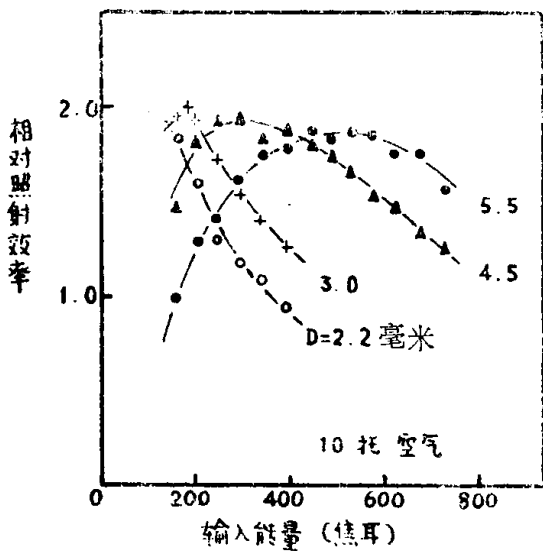


图16 闪光灯发光特性

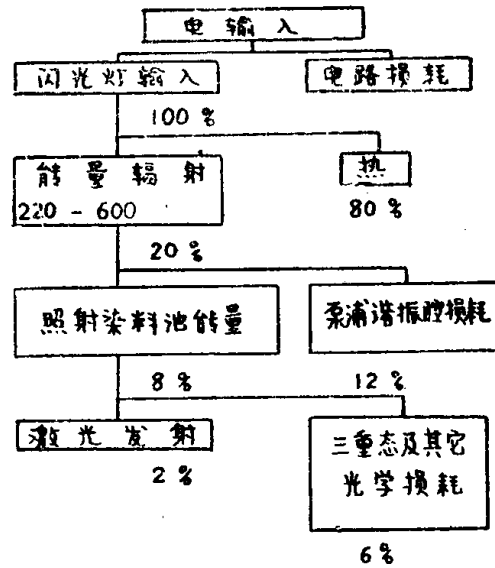


图17 闪光灯泵浦染料激光能量分配

今后闪光灯泵浦的染料激光器结构上的变化主要是为了要获得高平均功率可调谐激光。虽然这类染料激光器的效率较低，但输出的可调谐激光波长范围广，输出功率较高，比其它类型染料激光器的实用价值大。

## 2. 双波长技术

输出两个波长的染料激光器具有抗干扰能力，在光谱学、全息术和干涉计量等方面有广泛用途，实际应用效果比单波长染料激光器优越。但是，双波长染料激光器存在着调谐范围窄，两个激光输出偏振性不同，以及要求使用特殊的全息光栅等问题。美国宾夕法尼亚大学化学系的 C. Kittell 和 R. A. Bernheim 研制成功闪光灯泵浦双波长染料激光器<sup>[24]</sup>。他们采用了图 18 的结构。使用的光栅 G 面积为  $100 \times 100$  毫米<sup>2</sup>，1200 线/毫米，一级闪烁波长 4500 Å，在 632.8 毫微米波长上的效率为 60%。输出镜 M<sub>0</sub> 的透射率为 60%，反射镜 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 是  $70 \times 70$  毫米<sup>2</sup> 镀铝反射镜。扩束器 BE 为 10 倍望远镜。在这种结构中，激光