

3538  
董教义  
王長山  
860904  
天津南开大学现代光学研究所  
长春光机所  
25  
860905  
860930

## 铜蒸气激光泵浦的单模脉冲染料激光器

赵梅村 朱力知\* 钱玉兰 汤星里

(中国科学院上海光机所)

**提要** 设计了一台铜蒸气激光泵浦的单模脉冲染料激光器,介绍了它的结构,给出采用 Rh6G、RhB 和 Kiton Red S 时的实验结果。单模平均激光功率 200 mW,效率 4.5%,线宽 100 MHz,覆盖范围 563~642 nm。

### A single-mode pulsed dye laser pumped by a copper vapour Laser

Zhao Meicun, Zhu Lishi, Qian Yulan, Tang Xingli

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

**Abstract:** The design of a pulsed single-mode dye laser pumped by a copper vapour laser is presented. The experimental results using Rh6G, RhB and Kiton Red S are given. The dye laser produces up to 200 mW single-mode average power at an efficiency of over 4.5%. The linewidth of the single-mode laser is 100MHz and its wavelength range is 563~642 nm.

铜蒸气激光泵浦的染料激光器,在激光光谱、非线性光学、激光化学和同位素分离中有着广泛的应用。

我们研制了一台纯铜激光器泵浦的单纵模可调谐染料激光振荡器,并研究了它的性能。

### 激光器装置

激光器装置如图 1 所示。选用棱镜扩束-自准光栅调谐腔<sup>[2]</sup>,采用消色散四棱镜扩束器<sup>[3]</sup>,扩束倍率为 42。输入光与输出光同轴,对不同波长输出光束的位置及方向保持恒定,以利于精密调谐。各棱镜入射面镀增透膜,对波长为 580 nm 的总透过率为 80%。采



图 1 激光器装置示意图

用中心波长为 580 nm、刻线为 600 条/mm、定向在五级的衍射光栅,对 p 偏振分量的衍射效率为 40%。为进一步压窄激光谱宽,可在谐振腔内加 1, 3, 5(mm)厚熔融石英实心标准具,它们的自由光谱范围分别为 102, 62 和 20 GHz, 细度为 14。为使染料溶液平稳地流经工作区,精心设计了一只染料池,染

收稿日期:1986年9月4日。

\* 研究生,参加了 Rh6G 部分激光实验研究。

料溶液通过工作区之前先进入一宽敞的贮液池,以缓冲快速抽运带来的波动,随后经过一平滑的楔形分流器,强制溶液有序地穿越工作区。两个对称的、曲率半径较大的柱透镜构成缓慢变窄的扁片状工作区,工作区间距 0.25 mm,增益长度 10 mm。使用 PC40/6 型磁泵抽运染料溶液,为滤除溶液中的气泡,进染料池前先用滤球过滤。

器件设有被动稳频的装置。谐振腔诸部件皆固定在热膨胀系数较小的钢杆上,并且将输出平面反射镜固定在一可用电压控制的压电陶瓷上,以补偿由温度变化所造成的腔长的变化和腔内介质的折射率变化;谐振腔内介质-空气、融石英和染料溶液由温度变化引起的折射率变化都将造成激光频率的漂移,但其中染料增益介质的影响最大。为了减轻染料增益介质的影响,染料先流经半导体致冷器再进入激光工作区;把激光器密闭在一可抽真空和充气的容器内,以减小周围环境对器件温度和气压的影响。

激光器允许作双侧或单侧泵浦。每侧均设一组正交会聚柱透镜,焦距分别为 600 mm 和 65 mm。它们分别从水平方向和垂直方向压缩泵浦光束,将泵浦光聚焦在染料池工作区呈 0.5 mm 宽的水平亮线,以期得到足够高的泵浦功率密度。

### 调谐线宽的基本考虑

染料激光器谐振腔之纵模间距为

$$\Delta\nu_c = \frac{c}{2 \sum_i n_i L_i}$$

式中  $c$  为光速,  $n_i$  为腔内  $i$  介质折射率,  $L_i$  为激光通过  $i$  介质的几何长度。当  $L_{\text{光}} = \sum_i n_i L_i = 250 \text{ mm}$  时,  $\Delta\nu_c = 600 \text{ MHz}$ 。

棱镜扩束-自准光栅调谐腔的被动通带为

$$\Delta\nu_G = \frac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda^2}$$

$$= \left( \frac{d\psi}{d\lambda} \right)^{-1} \frac{c}{\lambda} \frac{2\sqrt{2}}{\pi\omega \prod_j M_j}$$

式中  $\frac{d\psi}{d\lambda} = \frac{m}{2a \cos \psi}$ ;  $\lambda$  为激光波长;  $M_j$  为第  $j$  块棱镜的扩束倍率;  $\omega$  为染料工作物质的吸收深度,  $m$  为光栅衍射级次;  $\psi$  为光栅衍射角;  $a$  为光栅常数。对 600 条/mm 刻线、定向五级的衍射光栅,扩束倍率  $M = 42.3$ ,  $\omega = 0.25 \text{ mm}$  和  $\lambda = 590 \text{ nm}$  的情况,  $\Delta\nu_G = 13 \text{ GHz}$ 。

当腔内加入 F-P 标准具后,激光谱线宽度将进一步压缩:

$$\Delta\nu_{\text{F-P}} = \frac{c}{2nbF \sqrt{N}}$$

式中  $n$  为 F-P 材料折射率;  $F$  为 F-P 标准具细度;  $b$  为 F-P 标准具厚度;  $N$  为在一个铜蒸气泵浦脉冲期间染料激光波前穿越标准具的次数。在我们的情况下,  $b = 5 \text{ mm}$ ,  $\tau_{\text{CVL}} = 30 \text{ ns}$ ,  $F = 14$  时,得到  $\Delta\nu_{\text{F-P}} = 244 \text{ MHz}$ 。

精心地调整标准具倾角使它们的通带峰对准光栅通带中心,则激光腔的有效通带小于 244 MHz。此时若不考虑腔长和腔内介质折射率随温度的变化(因腔纵模间距为 600 MHz)则此时可获稳定的单纵模运转。然而事实并非如此,即使有恒温装置,腔长特别是染料工作物质的温度也总是在变化的。因此只有采用补偿办法才能获得稳定的单纵模运转。

### 激光器特性研究

使用重复频率为 6 kHz、输出激光总功率  $\leq 7 \text{ W}$ , 光束发散角  $\leq 8 \text{ mrad}$  纯铜激光器泵浦,采用 SD 2490 型快速响应数字功率计检测功率。

#### 1. 激光效率

图 2 表示 Rh6G、RhB 和 Kiton Red S 三种染料分别作激光工作物质时单模激光功率与泵浦功率的关系曲线。溶剂皆为无水乙

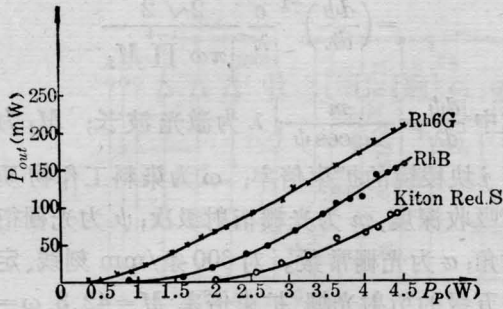


图2 铜泵染料激光器单纵模输出功率与泵浦功率的关系曲线

醇, 浓度依次为  $1.2$ 、 $1$  和  $0.87 \times 10^{-3} \text{ M/L}$ 。实现单模输出时腔内加入  $5 \text{ mm}$  厚 F-P 实心标准具。曲线表明对单模而言, 有效泵浦功率小于  $5 \text{ W}$  时, 这三种染料均未达到饱和, 并且激光效率也是随泵浦功率的增加而增加。当泵浦功率达到  $4.5 \text{ W}$  时, Rh6G、RhB 和 Kiton Red S 三种染料单纵模激光效率分别达到  $4.5\%$ 、 $3.4\%$  和  $2\%$ , 对应的单纵模激光输出分别是  $205 \text{ mW}$ 、 $153 \text{ mW}$  和  $87 \text{ mW}$ 。用铜激光的  $510.6 \text{ nm}$  线泵浦 Rh6G, 用  $510.6 \text{ nm}$  和  $578.2 \text{ nm}$  双线泵浦 RhB 和 Kiton Red S。因  $578.2 \text{ nm}$  处于 Rh6G 吸收光谱和荧光光谱的交迭区, 故  $578.2 \text{ nm}$  线对 Rh6G 有激光猝灭作用。用它泵浦将导致激光效率下降。但对后两种染料不存在这个问题, 无论用绿线还是用黄线或是黄绿线泵浦其效果都是相同的。实验充分证实了这一点。

激光效率主要由谐振腔内光学元件的损耗确定。衍射光栅在染料激光区域的衍射效率为  $40\%$ , 棱镜扩束器透过率为  $80\%$ , F-P 标准具在干涉极大处透过率为  $70\%$ 。由于染料池工作区只有  $0.25 \text{ mm}$ 。由此带来的衍射损失不容忽略。S. Lavi 等人在 [3] 中报道的同类激光器效率比本文高, 原因是用望远镜扩束器, 其透过率可达  $98\%$  左右。

图 3 给出单模与多模输出效率之比和泵浦功率的关系曲线, 从中可以了解加入  $5 \text{ mm}$  F-P 标准具时, 相对于只采用棱镜扩束-光

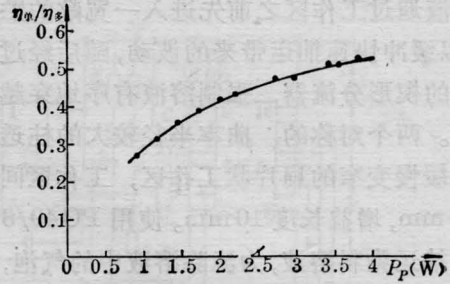


图 3

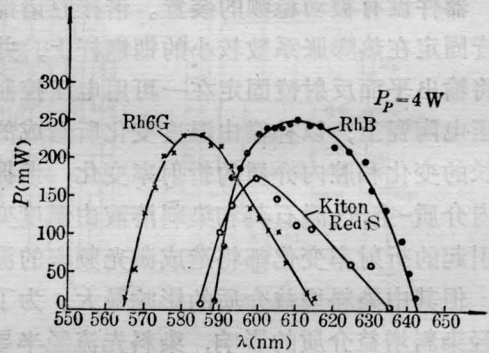


图 4 染料激光器的调谐范围

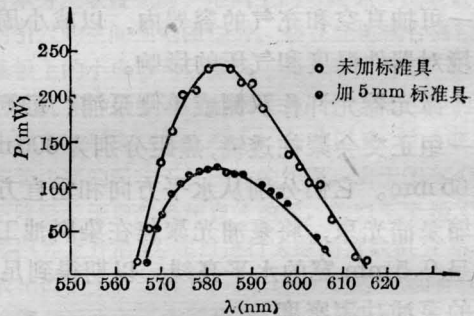


图 5

栅调谐时输出光功率的衰减情况。

## 2. 激光调谐范围和单纵模宽度

图 4 给出泵浦功率  $4 \text{ W}$  时染料激光器的调谐范围。三种染料, 确切地说是 Rh6G 和 RhB 两种染料覆盖了  $563 \sim 643 \text{ nm}$  的  $80 \text{ nm}$  宽的波段。当腔内加入  $5 \text{ mm}$  标准具获得单纵模运转时, 调谐范围将略有缩小。图 5 示出 Rh6G 染料腔内加  $5 \text{ mm}$  标准具前后的调谐范围。对我们使用的染料浓度, Rh6G 输出峰值波长是  $580 \text{ nm}$ ; RhB 输出峰值波长是  $610 \text{ nm}$ 。三种染料激光谐振腔调整状况不尽相同。

利用压电陶瓷微量调节腔长,以补偿由温度变化所引起的腔内介质主要是染料溶液折射率变化所造成的激光频率漂移。在 563~643 nm 整个激光波段上我们实现了单纵模运转,其纵模结构用 CFI-1 型共焦球面干涉仪探测,显示在示波器上。扫描干涉仪自由光谱范围是 1.816 GHz,细度为 155。在每种染料的激光区域边缘,也即在增益较小区域,单纵模半极大全宽度为 70 MHz,在增益峰值为 100 MHz 处。图 6 为泵浦功率为 4 W 时的单纵模结构照片。两峰频率间隔 1.816 GHz,拍摄期间累积了 150 个脉冲。

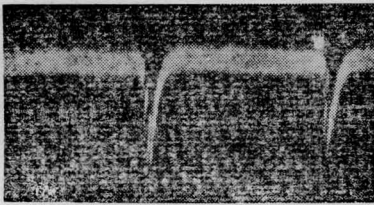


图 6

### 3. 模竞争与模鉴别

当不采用腔长补偿时,我们观察到模竞争现象。单纵模结构逐渐变成二个模或三个模,而后又变成单模。漂移速率为 4 MHz/s。图 7 给出双模照片。两个模间距 600 MHz,恰是腔纵模间距。当标准具通带未与腔纵模对准时出现双模,当腔纵模漂移至标准具通带中心时又出现单模。当采用腔长补偿被动稳频措施时,可获得长约 1 小时的稳定的单纵模输出。

把单纵模激光功率与两个腔纵模输出时的激光功率之比定义为模鉴别率。测量了模鉴别率与激光波长的关系,示于图 8。模鉴

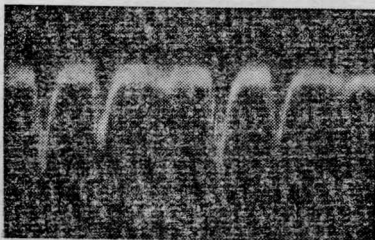


图 7

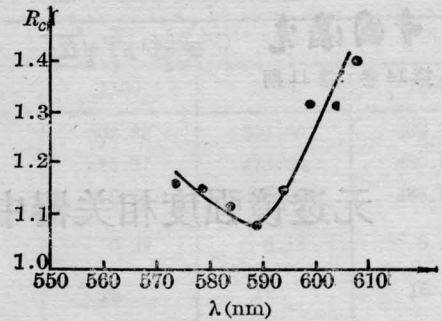


图 8

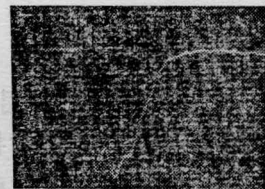
别率总大于 1。染料增益越大,模竞争也越激烈,模鉴别率也越小。

### 4. 激光束质量

因为染料池是由两曲率半径较大的柱透镜相间而成,水平泵浦方向只有 0.25 mm,垂直方向没有边界,于是造成输出激光光束在两个方向的发散度不同。垂直方向光束发散角为 3 mrad,水平方向由于直边衍射形成衍射图案,主光斑(0 级衍射)光束发散角为 7 mrad,是衍射极限的 1.5 倍。染料池布儒斯特窗方位和棱镜扩束器入射面的增透膜,决定了输出激光呈  $P$  方向线偏振。

### 5. 激光脉冲波形

图 9 是铜蒸气激光和染料激光脉冲照片。它们的半极大全宽度分别为 35 ns 和 20 ns。染料激光相对铜激光推迟 7 ns 左右,相当于光在染料谐振腔内四次循环后起振。



(a) 铜蒸气激光脉冲



(b) 染料激光脉冲, x 轴 20 ns/div

图 9

(下转第 653 页)

的。另外, He 有高的导热能力, He 的增加也增加了工作气体的导热能力, 而 Ar 的导热性能较差, 不能完全起到 He 的作用。因此, 不能仅仅从可提供的起始光电离来决定一种气体成份在激光中的作用。

2. 我们曾经指出在紫外光火花预电离的 CO<sub>2</sub> 激光介质中, Ar 和 He 的光离化度相当, 那么为什么用 Ar 部分取代 He 时出弧的几率会增加呢? 这不仅是 Ar 的热导率较低, 而且与 Ar 的纯度有关。我们用高纯 Ar 做同样的实验发现出弧几率显著减少。高纯 Ar 与工业纯 Ar 的主要区别在于杂质含量。Ar 中的主要杂质为 N<sub>2</sub> 与 O<sub>2</sub>, 在工业纯 Ar 中对 CO<sub>2</sub> 激光介质有害的 O<sub>2</sub> 含量为 10 PPM, 而高纯 Ar 中 O<sub>2</sub> 的含量则小于 0.0002% (体积比) 在二级纯 He 气中也含有 5 PPM 的 O<sub>2</sub>,

这样, 激光介质本身中含的 O<sub>2</sub> 再加上放电和紫外光使 CO<sub>2</sub> 分解产生的 O<sub>2</sub>, 使均匀放电所需的初始电子大为减少, 稳定的无弧放电就不能维持。如果在实验上采用简便的方法去除工业纯 Ar 中的 O<sub>2</sub>, 则用 Ar 部分取代 He 的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器更有实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Earl W. McDaniel; "Collision Phenomena in Ionized Gases Printed in the United States of America 1964" p. 344~357.
- [2] Herb J. Seguin *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-10**, No. 3, 315.
- [3] M. F. Borisov *et al.*; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1985, **15**, No. 8, 1158.
- [4] H. J. J. Seguin *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 1, 82.

(上接第 567 页)

表 1

	Rh 6G	Rh B	Kiton Red S
染料浓度** (M/L)	1.2×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	0.87×10 <sup>-3</sup>
调谐范围 (nm)	563~615	586~643	584~642
峰值波长 (nm)	580	610	600
单纵模激光功率* (mW)	205	153	87
单纵模宽度 (MHz)	100	100	100
单纵模激光效率* (%)	4.5	3.4	2

\* P<sub>p</sub>~4.5 w, \*\* 溶剂为无水乙醇。

脉冲宽度是随着泵浦功率的增加而增加的。

表 1 列出了使用 Rh6G、RhB 和 Kiton

Red S 三种染料作工作物质, 获单纵模运转时的诸项激光性能。它们覆盖了 563~643 nm 波段, 其中 RhB 和 Kiton Red S 两种染料未使用在最佳浓度。

感谢于开义同志在实验工作中特别是铜蒸气激光器工作中的大力帮助。

### 参 考 文 献

- [1] 汤星里, 赵梅村等; 《中国激光》, 1986, **13**, No.5, 298.
- [2] A. F. Bernhardt, P. Rasmussen; *Appl. Phys. B*, 1981, **26**, 141.
- [3] F. J. Duarte, J. A. Piper; *Opt. Commun.*, 1982, **43**, No. 5, 303.
- [4] S. Lavi *et al.*; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 13, 1905.