

# 产生单模可调谐 ps 单脉冲的串联超短腔染料激光器\*

杨胜利

(厦门大学物理系)

G. W. Scott

(美国加州大学河滨分校)

A. J. Cox

(美国加州 Redland 大学)

## A cascade ultrashort cavity dye laser generating tunable single mode ps single pulses

Yang Shengli

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen)

G. W. Scott

(University of California, Riverside, California, USA)

A. J. Cox

(University of Redlands, California, USA)

**提要:** 报道了亚 ns  $N_2$  激光脉冲泵浦的两级超短腔串联和一级放大组成的染料激光器, 产生单模、波长可连续调谐、脉宽可达 17 ps 的单脉冲。讨论了放大级获得最佳增益及抑制 ASE 等有关问题。

**关键词:** 超短腔, 单模, 共振腔瞬态

### 一、引言

ps 激光脉冲在物理、化学、生物等各个领域已经得到了越来越广泛的应用。产生 ps 激光脉冲的传统方法是锁模。锁模产生的是 ps 脉冲系列, 其相邻脉冲之间的间隔仅几个 ns。在各种超快速过程的研究应用中, 则要求 ps 单脉冲激光。用锁模的方法, 要得到 ps 单脉冲, 必须加上选单脉冲的超快速光开关。这样, 就使整个系统变得结构复杂, 且价格昂贵。因此, 人们一直在寻找直接产生 ps 单脉冲的方法。基于控制共振腔瞬态<sup>[1~2]</sup> 的超

短腔染料激光器(SCDL), 是直接产生 ps 单脉冲的一种较简便的方法。已经有许多研究者报道了这方面的工作<sup>[3~5]</sup>。

本文报道一个由两个超短腔串联, 后面跟随一级染料放大组成的激光系统, 及用该系统直接产生单模、单脉冲激光, 其脉宽为 22 ps, 波长在 560~610 nm 之间可连续调谐。所用的泵浦源为亚 ns  $N_2$  激光( $\lambda=337.1$  nm)脉冲, 脉冲能量为 1.1 mJ。<sup>3</sup> 第二级超短腔的输出经放大之后, 脉冲能量为 14  $\mu$ J。如

收稿日期: 1987年12月29日。

\* 本文的内容曾在 1988 年 1 月第一届全国超快现象学术讨论会上宣读。

果更换不同的染料溶液, 可进一步扩展调谐范围。

## 二、实验装置及工作原理

实试装置如图 1 所示。激光系统由两个超短腔  $C_1$  和 SCDL 串联以及后面的一级染料激光放大  $C_2$  组成。

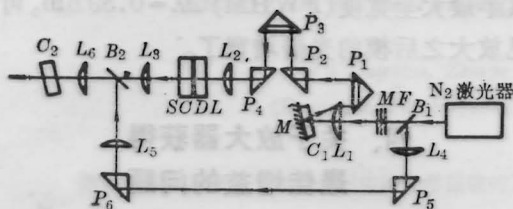


图 1 实验装置

第一级超短染料腔是一个 1 mm 厚(即染料溶液厚度)的石英玻璃池  $C_1$ 。激光介质为香豆素 540A (Coumarin 540A) 的乙醇溶液, 浓度为  $4 \times 10^{-3}$  mol/L。

第二级是一个腔长为  $10 \mu\text{m}$  量级的超短腔染料激光器(SCDL)<sup>[6]</sup>, 主要结构是由两个分别固定在各自铝环上的输入、输出平面反射镜, 中间夹一个 O 形橡皮圈构成。其中一个铝环通过一个压电陶瓷环固定在一支架上, 另一铝环被另一支架上的三个微调螺旋顶住。微调螺旋用作腔长的粗调。通过调节加在压电陶瓷环上的外加电压, 可连续改变 SCDL 的腔长, 从而连续调谐输出激光的波长。输入镜的两个面对绿色泵浦光全透, 第二个面对红黄激光全反; 输出镜的第一个面在可见区透射率为 30%, 即反射率为 70%, 第二个面对可见光全透。SCDL 所用的激光介质为若丹明 6G 的乙醇溶液, 浓度为  $2 \times 10^{-2}$  mol/L。单模运转时, 其腔长在  $10 \mu\text{m}$  之内。

放大器是一个 1 cm 厚的染料池, 输入、输出窗片为石英玻璃。放大介质为若丹明 6G 的乙醇溶液。在所用的泵浦能量下, 其最佳浓度为  $4 \times 10^{-4}$  mol/L。

N<sub>2</sub> 激光由分束器  $B_1$  分为两束, 15% 透

射, 85% 反射。透射束经中性滤波片  $MF$  后, 被透镜  $L_1$  聚焦泵浦  $C_1$ 。  $C_1$  产生的绿色 ( $\lambda_m \sim 536 \text{ nm}$ ) 激光经反射镜  $M$  反射又进入  $C_1$  进一步放大, 然后从  $C_1$  的输入窗输出。  $C_1$  的泵浦强度由  $MF$  控制。当泵浦强度控制在  $C_1$  的阈值上附近时, 可得到比泵浦脉冲短的单脉冲。  $C_1$  的输出经  $L_1$  及  $P_1$  折回通过,  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  组成的延迟线延迟, 再由  $L_2$  聚焦到 SCDL, 泵浦第二级。当 SCDL 中染料光程约为  $10 \mu\text{m}$  时, 腔的光子寿命  $\sim 0.1 \text{ ps}$ , 远比泵浦的绿光脉冲宽度小。因此, SCDL 产生的激光脉冲也比泵浦脉冲短得多。当泵浦水平控制在其阈值上附近时, 也可得到单脉冲输出。 SCDL 的输出激光经  $L_3$ 、 $B_2$  和  $L_6$  后进入放大池  $C_2$  放大。

$B_1$  的反射束经  $L_4$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $L_5$ 、 $B_2$  和  $L_6$  泵浦放大器  $C_2$ 。  $C_2$  与光轴  $\sim 80^\circ$  放置, 以避免  $C_2$  与其他元件形成子腔。

## 三、测 量

### 1. 脉冲宽度与能量的测量

用条纹相机及光学多道分析仪(OMA)测量脉宽。条纹相机的时间分辨为 10 ps。

N<sub>2</sub> 激光脉冲宽度 (FWHM) 为 722 ps。图 2 是  $C_1$  输出的绿色单脉冲激光波形, 其 FWHM 为 71 ps。这是当  $C_1$  工作在阈值附近时获得的。同样, 当  $C_1$  的输出控制在 SCDL 的阈值附近时, SCDL 的输出也是单脉冲。在这情况下, 所测的脉宽为  $22 \pm 3 \text{ ps}$ , 重复频率为 5 次/s。脉宽的变化估计主要由  $C_1$  输出的脉宽及峰值的涨落引起, 后者主要来源于 N<sub>2</sub> 激光脉冲强度的起伏, 其强度起伏约达 25%。如果泵浦源的强度及脉宽稳定性高, 可望获得稳定的输出。图 3 是 SCDL 在单模运转时测得的单脉冲输出, 其宽度为 17 ps (FWHM)。这是我们测量到的 SCDL 输出的最短脉冲。测量的是经  $C_2$  极大之后的脉冲。

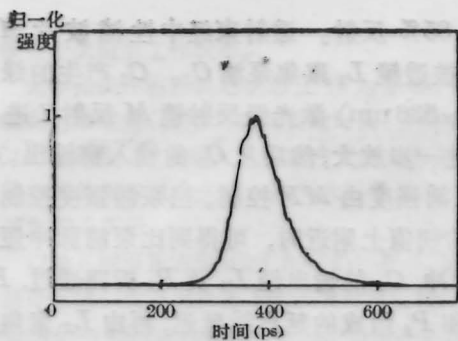


图2  $C_1$  输出的单脉冲

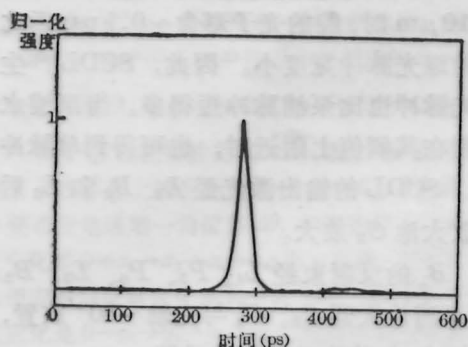


图3 SCDL 输出的单脉冲

用小型能量计测得  $C_2$  输出脉冲的最大能量为  $14 \mu\text{J}$ 。SCDL 的输出太弱不能直接测到, 只能用间接的方法。我们用两个光电二极管及双线示波器, 同时测量了 SCDL 及  $C_2$  输出光脉冲幅度, 从而求出  $C_2$  的放大倍数为 20, 再算出 SCDL 输出脉冲的能量。N<sub>2</sub> 激光器工作电压为 18 kV 时, 其输出能量为 1.1 mJ。由于用于泵浦  $C_2$  的 N<sub>2</sub> 激光经过较长光程及较多元件的衰减, 且 N<sub>2</sub> 激光光束质量较差, 到达  $C_2$  后约有 20~30% 离散光不能充分地

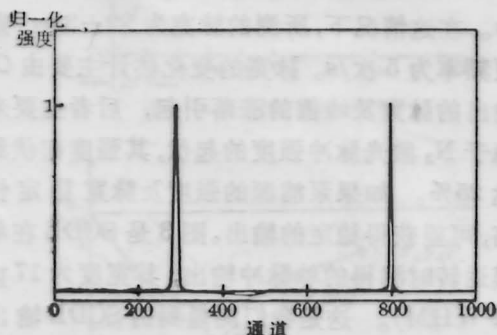


图4 SCDL 输出的单(纵)模激光(右)及经  $C_2$  放大后(左)的激光光谱

利用, 故进入  $C_2$  有效的 N<sub>2</sub> 激光脉冲能量仅 0.2 mJ。由此估计  $C_2$  的效率较低, 小于 7%。

## 2. 光谱测量

用于光谱测量的仪器为光栅单色仪(其波长分辨为 0.03 nm) 及 OMA。图 4 为 SCDL 输出的单(纵)模激光(右)及经  $C_2$  放大之后的(左)光谱。图中的横坐标为 OMA 的通道数。模光谱的中心波长为  $\lambda_m = 589.25 \text{ nm}$ , 其半最大全宽度(FWHM)  $\Delta\lambda = 0.39 \text{ nm}$ 。可见放大之后模的光谱增宽了。

## 四、关于放大器获得最佳增益的问题

### 1. SCDL 输出脉冲与放大器泵浦脉冲之间的相对延迟

染料溶液吸收泵浦脉冲激光后, 须经一定的时间, 其上能级布居密度才达到最大。因此, SCDL 输出的脉冲相对于  $C_2$  的泵浦脉冲之间, 必须有一适当的延迟, 才能在  $C_2$  中获得最大的增益。

实验中测量了 SCDL 的输出脉冲相对于  $C_2$  泵浦脉冲延迟时间  $\tau$  的放大倍数  $A$ 。图 5 为  $A \sim \tau$  的归一化曲线。它是 SCDL 和  $C_2$  中的若丹明 6G 的乙醇溶液浓度分别为  $2 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$  和  $4 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$  时测得的。在此条件下的最佳延迟时间为 480 ps。

### 2. 放大器光路的调节

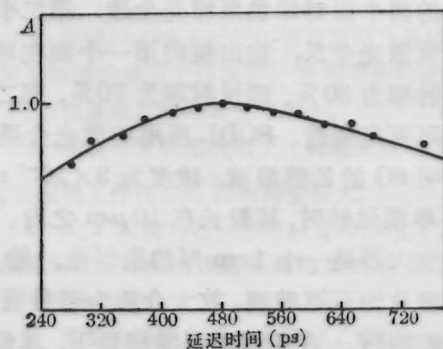


图5  $C_2$  放大倍数相对于 SCDL 与  $C_2$  泵浦脉冲之间延迟时间的曲线

为了获得最大的增益, SCDL 输出的激光束在  $C_2$  中必须与泵浦光束在空间中最大程度地重迭。图 1 中透镜  $L_3$  用来减少 SCDL 输出光束发散角, 并调节好  $L_4$ 、 $L_5$ , 使两束光发散角一致, 且在  $B_2$  处有相同的光斑尺寸。再调节好棱镜  $P_5$ 、 $P_6$  和分束器  $B_2$ , 这样就可使两束光在  $C_2$  中较好地重迭。

### 3. $C_2$ 腔长、 $C_2$ 中染料溶液浓度与其泵浦脉冲能量的匹配

要获得最大增益, 还需使被放大的激光脉冲在放大池染料溶液传播的整个过程中都有放大。为此, 要使染料溶液的整个泵浦区都有足够的粒子数反转密度。利用  $L_6$  把两个光束聚焦在  $C_2$  输入面附近, 同时调节染料溶液浓度, 使泵浦束到达输出端时强度适当。我们测量了不同浓度下  $C_2$  的放大倍数, 得到了  $C_2$  腔长为 1 cm 时, 其染料溶液最佳浓度为  $4 \times 10^{-4}$  mol/L。

## 五、放大自发发射 (ASE) 的观测

ASE 是放大器损耗的重要因素之一。实验中, 我们观察到两类 ASE。一种是非类激

(上接第 459 页)

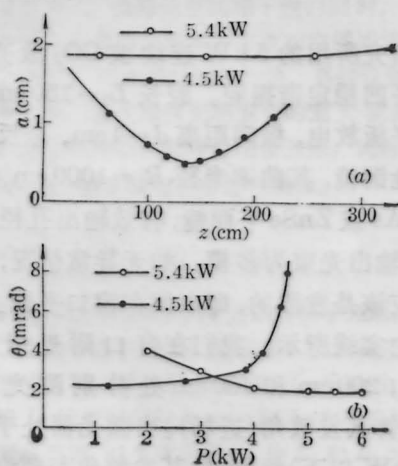


图 4 凹凹腔(“○”)补偿后与未经补偿的平凹腔(“●”)的光束质量比较

(a) 输出光束截面尺寸的比较;

(b) 距离窗口 270 cm 处发散角随功率变化的比较

$$\theta' = \theta \sqrt{1 + f^2/F^2}, \quad (16)$$

光型的 ASE(I)。它没有阈值, 和泵浦光同时存在; 其发散角很大, 约几度到十几度; 与泵浦光共轴。另一种是类激光型的 ASE(II)。它有一定的阈值, 当泵浦光大于一阈值时才出现; 其发散角很小, 约几个 mrad; 光强很强, 其光轴与  $C_2$  的输入面垂直。当  $C_2$  输入面法线与泵浦光束夹角大于一定值之后, 且输入被放大的激光之时, ASE(II) 便消失; 而 ASE(I) 仍存在。ASE(I) 可以由增加染料溶液的浓度来抑制。浓度增加时 ASE(I) 减弱, 当浓度为  $8 \times 10^{-4}$  mol/L 时 (这时池长用 0.5 cm), ASE(I) 变得很弱。

本文实验中关于脉冲的测量得到 Dannel O'Connor 的协助, 特此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 D. Roess, *J. Appl. Phys.*, **37**(5), 2004 (1966)
- 2 Chinlon Lin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **26**(7), 389 (1975)
- 3 A. J. Cox *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 389 (1977)
- 4 Gerard W. Liesegang, *Appl. Opt.*, **22**, 2045 (1983)
- 5 P. H. Chiu *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**(6), 652 (1984)
- 6 A. J. Cox *et al.*, *Appl. Opt.*, **18**(4), 532 (1979)

可见, 在平凹腔窗口处的任何透镜变换, 都只能使光束发散角变大。于是本文采用了凹凹腔补偿, 即把窗口磨成平凹面, 凹面镀增反膜, 平面镀全透膜。高功率输出时, 这种腔型的光束发散角在工作距离处远比平凹腔小, 光束的传输特性和聚焦特性都大为改善, 如图 4 所示, 这时光束发散角接近理论值。当然如前所述, 热透镜效应与功率有关, 这种固定曲率半径的凹凹腔补偿不能实现所有功率水平的完全补偿。需考虑组合镜形式的补偿。

## 参 考 文 献

- 1 J. S. Loomis *et al.*, *Symposium on Laser Damage in Optical Materials*, 1975, 126
- 2 H. Weber 著, 丘军林等译, *激光谐振腔* (华中工学院出版社, 1983), 106
- 3 周炳琨 *et al.*, *激光原理* (国防工业出版社, 1980), 359