

## 用叶绿素 d 染料的锁模红宝石激光器

刘一先 李富铭

(复旦大学物理系)

**摘要:** 介绍了用叶绿素 d 作为红宝石激光器的可饱和吸收体的锁模试验装置和实验结果。用 TPF 法测得的最短脉宽  $\sim 1.5$  ps。

## A mode-locked ruby laser with chlorophyll d as saturable absorber

Liu Yixian, Li Fuming

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

**Abstract:** A set-up for passively mode-locked ruby laser with chlorophyll d as saturable absorber and the experimental results are reported. The shortest pulsewidth of about 1.5 ps was measured by TPF method.

1969年, K. Yoshino 报道了用叶绿素 d 作红宝石激光器的 Q 开关得到了脉宽小于 30 ns 的巨脉冲输出。我们采用国产的叶绿素 d 作红宝石激光器的 Q 开关, 在适当的谐振腔条件下获得了亚纳秒的单一轴向模的单脉冲输出。将叶绿素 d 用于红宝石激光器的锁模, 得到了理想的锁模脉冲输出。分别用 TPF 照相法和 TPF 光电法对其脉冲宽度进行了测量, 测得的最短光脉冲宽度  $\sim 1.5$  ps, 接近于红宝石荧光线条宽极限的脉宽。

## 实验装置和实验结果

我们应用的是一种常规的被动锁模实验装置, 典型的装置示意图表示在图 1 中。红宝石棒为  $\phi 6 \times 80$  mm, 置于圆柱形聚光腔

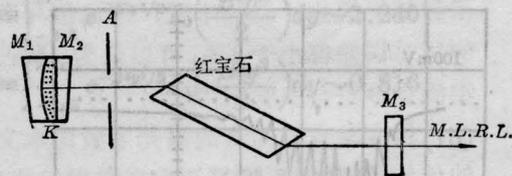


图1 被动锁模红宝石激光器实验装置

内, 用脉冲氙灯泵浦; 染料池 K 由全反射镜  $M_1$  和光学玻璃  $M_2$  构成,  $M_1$  的曲率半径为 2.5 m, 有效吸收长度  $\sim 80 \mu\text{m}$ ; 采用循环流动染料, 我们在实验中将叶绿素 d 溶于无水乙醇中, 其吸收光谱如图 2 所示(图中纵坐标  $\sigma$  代表光密度); A 为小孔光阑  $\phi = 2$  mm;  $M_3$  为透过率 50% 的平面输出镜。激光器输出的锁模脉冲系列由快速光电探测器 PIN 接

收稿日期: 1985年10月31日。

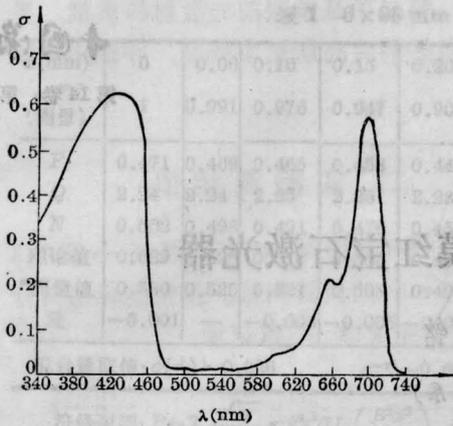


图2 叶绿素 *d* 在无水乙醇溶液中的吸收光谱

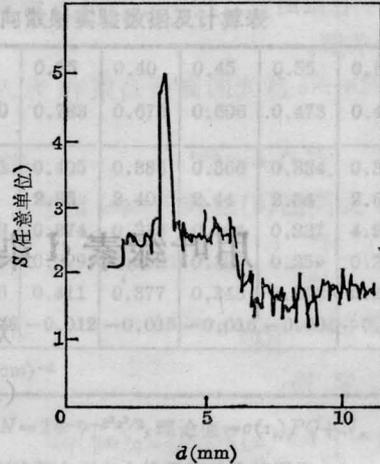
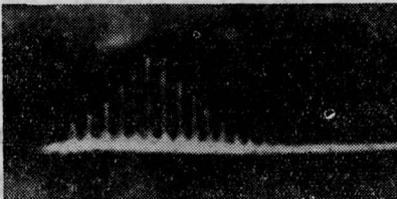
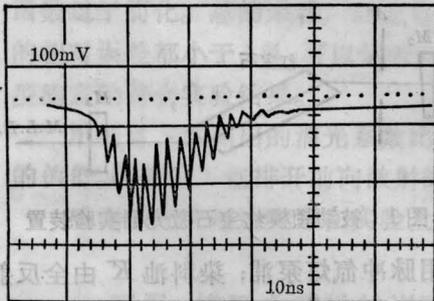


图4 TPF 轨迹: 吸收体为叶绿素 *d*

收并用宽带示波器显示和记录波形, 当用叶绿素 *d* 作吸收体和腔长为 90 cm 时输出的脉冲系列如图 3(a) 所示, 腔长缩短到  $\sim 30$  cm 时输出的脉冲系列如图 3(b) 所示。



(a) 时标 20 ns/div



(b) 时标 10 ns/div

图3 用叶绿素 *d* 作吸收体激光器输出的脉冲系列波形

(a) 腔长  $L=90$  cm; (b) 腔长  $L\sim 30$  cm

光脉冲的宽度分别用 TPF 照相法和 TPF 光电法已测定, 脉冲形状则用 ИСП-51 型摄谱仪进行测量。

在 TPF 照相法中我们应用了一台标准

的三角形装置, 染料池尺寸为  $4\times 4\times 40$  mm, 盛有若丹明 6G 乙醇溶液, 浓度  $\sim 5\times 10^{-8}$  M。在染料池中产生的双光子荧光轨迹用照相机记录在感光底片上, 拍摄的轨迹表示在图 4 中 (它是对应的黑密度轨迹)。由黑密度轨迹转换成光强度轨迹 (作感光底片的乳胶校正曲线), 并由底片的光斑尺寸换算回荧光光强轨迹在染料池中的空间实际大小, 由此得到其二级相关函数  $G^{(2)}$  的强度空间分布, 实验求得半强度处的空间距离为  $\Delta d\sim 0.23$  mm, 对应于  $G^{(2)}$  的半极大值处的时间宽度  $\Delta\tau = 2\Delta d n/c\sim 2.1$  ps, 式中  $n=1.36$  为若丹明 6G 的折射率,  $c$  为光速。进而由下式推算光脉冲的宽度

$$\Delta t_{1/2} = \frac{\Delta\tau}{\beta}, \quad (1)$$

式中  $\beta$  为与光脉冲线型有关的常数, 用 ИСП-51 型摄谱仪测得红宝石锁模激光谱线的形状接近于高斯型。根据 Smith 等人的分析, 对于高斯型有  $\beta = \sqrt{2}$ , 由 (1) 式推算得到  $\Delta t_{1/2}\sim 1.5$  ps, 本底对照比  $R\sim 2.9$ 。多次测量的脉宽在 1.5~2 ps 之间。

在照相法中的时间分辨率受感光底片分辨率的限制, 另外由于实验中照相机的调焦和感光底片的乳胶校正曲线的制作都相当困难, 因而采用 TPF 光电法来测量锁模脉冲宽

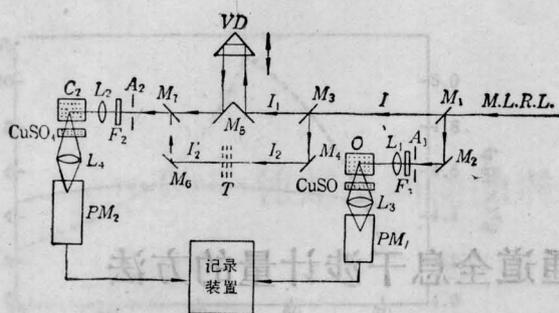


图5 TPF光电法测量装置

度则更方便。样品池尺寸为 $4 \times 4 \times 20$  mm, 盛若丹明6G乙醇溶液, 浓度 $\sim 5 \times 10^{-3}$  M, 其荧光信号经 $\text{CuSO}_4$ 溶液滤去基波光后由光电倍增管 $\text{PM}_1$ 接收作为参考信号。透过 $M_1$ 的光束再用 $M_3$ 分成 $I_1$ 和 $I_2$ 二束强度大致相等的光, $I_1$ 光束经过光学延迟线 $\text{VD}$ , 其延迟量用步进电机控制, 然后用透镜 $L_3$ 聚焦到盛有若丹明6G乙醇溶液, 浓度 $\sim 5 \times 10^{-3}$  M的样品池 $c_2$ 中, 样品池 $c_2$ 的尺寸同 $c_1$ 。 $I_2$ 光束的光强用衰减器 $T$ 调节, 改变光学延迟线 $\text{VD}$ 的位置可使 $I_1$ 与 $I_2$ 在样品池 $c_2$ 中的透镜焦点处完全重叠, 部分重叠和完全不重叠。荧光信号经 $\text{CuSO}_4$ 溶液滤光后, 由光电倍增管 $\text{PM}_2$ 接收。 $\text{PM}_1$ 和 $\text{PM}_2$ 的电信号经放大后送到模拟数字转换系统, 最后用定标器记录。结果如图6所示, 即为二级相关函数 $G^{(2)}$ 。同样可由二级相关函数 $G^{(2)}$ 曲线中求得 $\Delta\tau = \frac{2\Delta d}{c}$ , 式中 $\Delta d$ 为二级相关函数曲线半极大值处的全宽, 由曲线求得 $\Delta d \sim$

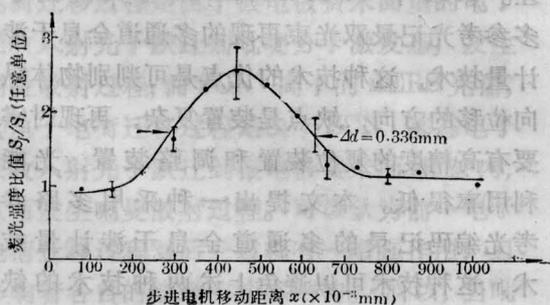


图6 用TPF光电法测得的相关函数曲线  
饱和吸收体为叶绿素d

0.336 mm, 对应的 $\Delta\tau = 2.2 \pm 0.3$  ps, 由(1)式求得 $\Delta t_{1/2} = 1.6 \pm 0.2$  ps。本底对照比 $R \approx 2.7$ 。实验表明锁模激光脉冲系列的平均脉宽与叶绿素d溶液的透射率有关, 上述结果对应的叶绿素d溶液的透射率为 $\sim 70\%$ 。当叶绿素d溶液的透射率增加到 $\sim 80\%$ 时, 用本装置测量的脉宽 $\sim 1.9$  ps。相反, 当其透射率减少到 $\sim 50\%$ 时, 则锁模不稳定。在相同的实验装置条件下我们用隐花菁作为饱和吸收体, 测得的脉宽为 $\sim 25$  ps。

## 讨 论

对于红宝石介质的理论荧光线宽( $R_1$ 线)可以用下式来描述<sup>[6]</sup>

$$r_1(T) = r_1(0) + \bar{a} \left( \frac{T}{T_0} \right)^7 \int_0^{T_D/T} \frac{x^6 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (2)$$

式中 $T_D = h\omega_D/k = 760$  K,  $r_1(0) = 0.095$   $\text{cm}^{-1}$ ,  $\bar{a}_1 = 544$   $\text{cm}^{-1}$ 。根据上述数据对室温附近进行计算机计算的 $R_1$ 线的线宽 $r$ 列于表1中。由荧光线宽对应的最小脉宽可根据光脉冲的线性相关理论由下式计算得到,

$$\Delta t_{\min} = K \Delta\nu^{-1}, \quad (3)$$

式中 $K$ 是与线型有关的常数, 对于高斯型 $K = 0.44$ , 由(3)式计算的 $\Delta t_{\min}$ 一并列入于表1中。由表1可以看出, 在室温条件下红宝石激光器能获得的理论极限脉宽 $\sim 1$  ps。

表1 红宝石的 $R_1$ 线的理论线宽 $r_1$ 与温度 $T$ 的关系以及对应的极限脉宽 $\Delta t_{\min}$

|                            |       |       |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T$ (K)                    | 285   | 290   | 295   | 300   | 305   |
| $r_1$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | 11.20 | 12.05 | 12.94 | 13.85 | 14.78 |
| $\Delta t_{\min}$ (ps)     | 1.31  | 1.21  | 1.13  | 1.05  | 0.99  |
| $T$ (K)                    | 310   | 315   | 320   | 325   |       |
| $r_1$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | 15.75 | 16.74 | 17.76 | 18.80 |       |
| $\Delta t_{\min}$ (ps)     | 0.93  | 0.88  | 0.83  | 0.78  |       |

(下转第95页)

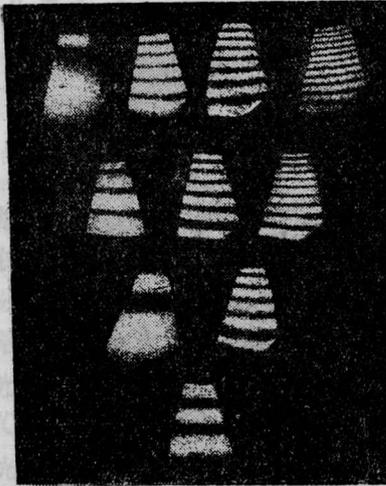


图 4

出的方法与其它多光束的多通道全息干涉计

量技术一样, 实际能够实现的通道数最多为 15 个。

### 参 考 文 献

- [1] E. N. Leith, Vpatnieks *et al.*; *Laser Focus*, 1965, No. 1, 15.
- [2] H. J. Caulfield; "Handbook of Optical Holography", Academic Press, New York, 1979, p434.
- [3] J. T. LaMacchia, D. L. White; *Appl. Opt.*, 1968, 7, 91.
- [4] P. Hariharan, Z. S. Hegedus; *Opt. Commun.*, 1973, 9, 152.
- [4] V. G. Kulkarni, P. N. Puntambekar; *Optica Acta*, 1981, 28, 1611.
- [6] 母国光, 吴法祥等; «应用激光», 1983, 3, No. 6, 5.
- [7] N. Francon; *Optica Acta*, 1973, 20, 1.

some chemicals in SERS spectra 1.0, 0.1, 0.05 M NaCl, Lang Yongsheng, Gu Ramoo, Bin Liang, Tang Dehong

(上接第 91 页)

被动锁模激光器能否达到激光介质的荧光线条的极限脉宽与使用的可饱和吸收体的性质, 如吸收体的吸收峰值波长位置, 吸收峰的带宽, 可饱和光强以及吸收恢复时间等因素有关。可饱和吸收恢复时间越短, 即开关速度越快, 则可以获得越窄的脉宽<sup>[3]</sup>。

由于叶绿素 *d* 具有非常短的可饱和吸收恢复时间, 中心吸收峰的位置更加接近开关波长和吸收峰的带宽也更窄(见图 2)等, 因此用叶绿素 *d* 作饱和吸收体可以获得接近于理论荧光线条的极限脉宽。叶绿素 *d* 具有稳定的化学性能, 将配制的溶液存放在阴暗处一年多还未退色, 此外它是一种对人体无

害的色素, 所以叶绿素 *d* 是红宝石激光器的一种理想的 Q 开关-锁模染料。

中国科学院上海植物生理研究所杨善元同志为本工作提供了叶绿素 *d*, 本校芷德鸿同志帮助了数据的计算机运算, 我们在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Smith A. W. *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, 17, No. 8, 340.
- [2] D. E. McCumber *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1963, 34, No. 6, 1682.
- [3] A. Laubereau, W. Kaiser; *Opto-electr.*, 1974, 6, 1.