

ps 双波段超短腔染料激光器的研究

钱列加 刘一先 李富铭*
(复旦大学物理系)

摘要: 在超短腔染料激光器中, 使用 Rh6G 乙醇溶液, 获得了红黄双波段激光输出。实验研究了双波段激光的光谱和时间特性。首次发现用自相关器可以测量双波段激光脉冲的时间间隔。在理论上探讨了红黄双波段激光产生的机理。

关键词: 超短腔染料激光器, 自相关, 互相关

Investigation of picosecond double-wave band short cavity dye lasers

Qian Liejia, Liu Yixian, Li Fumin
(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

Abstract: Short cavity Rh6G dye laser with double-wave band output of yellow and red light pulses is reported. The temporal and spectral properties were studied experimentally. It was found for the first time that the temporal interval between yellow and red pulses can be measured by an autocorrelator. The double-wave band laser was studied theoretically.

Key words: short cavity dye laser, autocorrelativity, intercorrelativity

一、前言

超短腔染料激光器不但能够提供比泵浦脉冲更窄的激光脉冲, 而且可以获得可调谐激光输出^[1~4], 可用于超快现象的研究。使用 Rh 6G 染料, 由于其长波(红光波长)的增益较小, 输出激光中心波长一般在 580 nm 附近。本文报道, 当谐振腔损耗、泵浦强度及染料浓度一定时, 可以获得时间及频率域分离的红、黄双波段激光脉冲输出。

二、实验装置及结果

2.1. 光谱特性的研究

用碰撞锁模 Nd:YAG 激光器的倍频光(530 nm)泵浦超短腔染料激光器^[4], 腔长由螺旋测微器和压电陶瓷配合调节, 染料可流动并由循环泵驱动。泵浦脉冲系列含有 7 个脉冲, 脉冲宽度为 < 8 ps, 泵浦能量为 365 μ J, 聚焦处能量密度为 2×10^{-2} J/cm²。由摄频仪和单色仪记录染料激光的光谱特性。

收稿日期: 1988 年 5 月 2 日。

*王亚刚、朱伟参加了部分实验工作。

实验发现超短腔染料激光器输出的是红、黄双波段激光。当腔长为 $100\ \mu\text{m}$ ，染料浓度为 $8 \times 10^{-3}\text{M}$ 时，输出光谱如图 1 所示，图中上面表示的是校正光谱，下左为泵浦激光 ($530\ \text{nm}$)，下中和下右表示黄、红双波段激光的谱线，黄光为双模振荡，红光波段具有 6 个纵模。红光波段和黄光波段激光能量分别为 $114.5\ \mu\text{J}$ 和 $42.5\ \mu\text{J}$ ，激光转换效率分别为 31.3% 和 11.6% 。

表 1 表示腔长固定在 $150\ \mu\text{m}$ 时，红、黄双波段激光的中心波长随 Rh6G 染料浓度的影响。从表 1 可以看出，在一定的腔长及泵浦能量下，随着染料浓度的降低，红、黄双波段激光的中心波长均向短波方向移动，最终红光波段将不能建立振荡。

表 2 表示在染料浓度为 $8 \times 10^{-3}\text{M}$ 时，红、黄双波段激光的中心波长随腔长的影响。它表明随着腔长的缩短，黄光波段中心波长向短波方向移动，而红光波段中心波长则向长波方向移动，最终黄光波段将不能建立振荡。

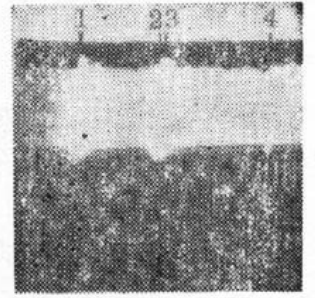


图 1 双波段激光谱线

- 1— $546.07\ \text{nm}$;
- 2— $576.96\ \text{nm}$;
- 3— $579.07\ \text{nm}$;
- 4— $623.45\ \text{nm}$;
- 左下一条为 $530.00\ \text{nm}$

表 1 红、黄双波段激光中心波长与 Rh6G 染料浓度的变化关系

Rh6G 染料浓度 ($\times 10^{-3}\text{M}$)	黄光波段激光中心波长 (nm)	红光波段激光中心波长 (nm)
8	576.2	618.9
4	574.9	615.9
2	569.3	—

表 2 红、黄双波段激光中心波长与腔长的变化关系

腔长 (μm)	黄光波段激光中心波长 (nm)	红光波段激光中心波长 (nm)
91	562.1	627.3
47	559.0	631.3
30	558.0	635.4
25	—	637.1

2.2 时间特性的研究

上面所用的泵浦激光是锁模脉冲系列，用自相关器测量其时间特性的话，所得结果是这些脉冲系列的平均结果。我们在时间特性的研究中改用单脉冲的主被动锁模 Nd:YAG 倍频激光 ($532\ \text{nm}$) 作为泵浦光。实验装置见图 2。泵浦脉宽为 $40\ \text{ps}$ ，聚焦处能量密度为 $8 \times 10^{-3}\text{J}/\text{cm}^2$ 。超短腔染料激光器的腔长固定在 $300\ \mu\text{m}$ ，输出的脉冲激光由无本底的自相关方法测量其时间特性。

图 3 表示染料浓度为 $8 \times 10^{-3}\text{M}$ 时，红、黄双波段激光脉冲的相关曲线。它具有三个包络，这是由于红、黄激光脉冲在 KDP 晶体内既有自相关又有互相关作用的结果。图 4 表示频率为 ω_1 和 ω_2 的两束光的和频过程，它必须满足能量和动量守恒：

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 \quad (2)$$

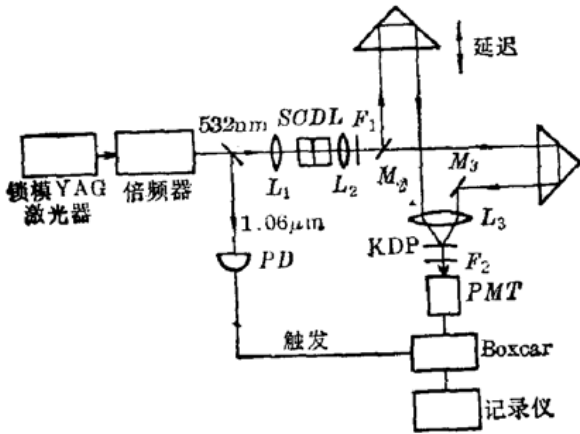


图2 实验装置示意图

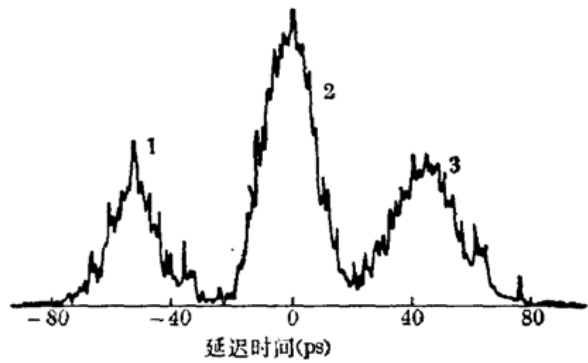


图3 双波段激光脉冲的相关曲线

把(2)式写成标量方程,则有

$$n_1^o \omega_1 \sin \alpha_1 = n_2^o \omega_2 \sin \alpha_2 \tag{3}$$

$$n_1^o \omega_1 \cos \alpha_1 + n_2^o \omega_2 \cos \alpha_2 = n_3^e \omega_3 \tag{4}$$

其中 α_1 和 α_2 表示两束光在晶体内与入射面的法线方向的夹角, n^o 和 n^e 分别表示 o 光和 e 光的折射率。

由(1)、(3)和(4)式计算可得,当黄光自相关时, $\alpha_1 = \alpha_2 = 6.1^\circ$; 红光自相关时, $\alpha_1 = \alpha_2 = 7.6^\circ$; 而当红、黄激光互相关,则 $\alpha_{\text{黄}} = 5.7^\circ$, $\alpha_{\text{红}} = 7.1^\circ$ 。

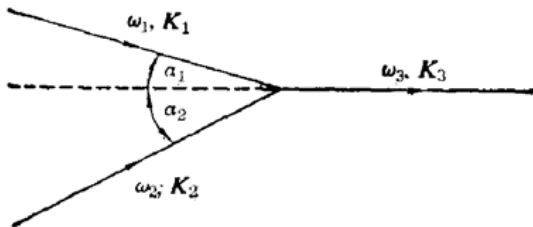


图4 两束光和频过程的示意图

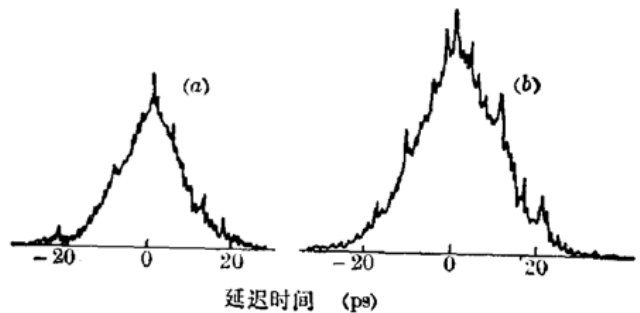


图5 染料浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ M}$ 时, (a) 红光波段脉冲激光及 (b) 黄光波段脉冲激光的自相关曲线

在我们的实验条件中, KDP 晶体前的聚焦透镜 L_3 的焦距为 6.0 cm, 两路光束的中心间隔为 2.0 cm, 光束口径约 4 mm。按照上面求得的自相关和互相关相位匹配的夹角推知, 在这样比较粗的光束口径情况下, 产生自相关和互相关的条件能同时满足。因此图 3 中包络 1 和 3 表示红、黄激光的互相关作用, 而包络 2 则表示它们各自的自相关作用。包络之间的间隔则为红、黄双波段激光脉冲的时间间隔。在其中一路光束中加红色滤波片, 所得相关曲线只有包络 1 和 2, 这表明黄光脉冲超前红光脉冲。按照以上分析, 我们可以得到以下结论: 利用黄、红激光脉冲在晶体内发生的互相关作用, 可以测量它们之间的时间间隔和先后次序。

使用合适的滤波片, 能够分别测量红、黄激光脉冲的时间宽度。在染料浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ M}$ 时, 典型的红、黄激光脉冲的自相关曲线见图 5 所示。表 3 表示在固定腔长和泵浦能量时, 染料浓度对双波段激光脉冲时间特性的影响, 脉冲形状假定为高斯型。

染料浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ M}$ 时, 红光波段激光仍能振荡是由于泵浦能量较高的缘故。

表 3 红、黄双波段激光脉冲的时间宽度和间隔与 Rh6G 染料浓度的变化关系

Rh6G 染料浓度 ($\times 10^{-3}M$)	黄光脉冲时间宽度 (ps)	红光脉冲时间宽度 (ps)	黄、红脉冲时间间隔 (ps)
8	14	13	48
4	13	11	50
2	17	15	45

三、讨 论

尽管 Rh6G 染料的发射峰在 580 nm 附近, 而红光波段的增益较小, 但由于我们所使用的腔镜在红光波段的反射率较高, 而使得红、黄波段激光能同时满足阈值条件。图 6 表示 Rh6G 的发射谱和腔的损耗曲线(只计及腔的透射损耗), 它能很好地说明双波段激光的产生。

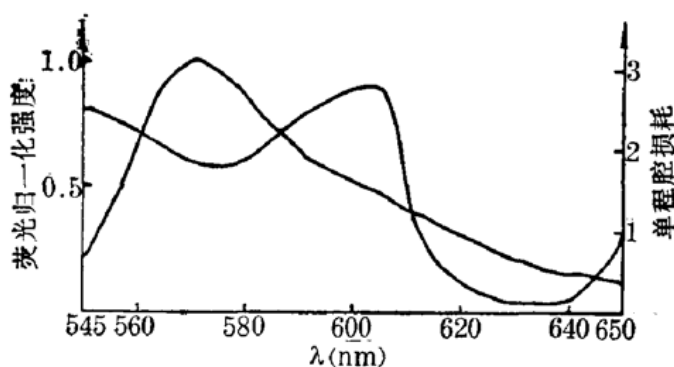


图 6 Rh6G 荧光发射谱及单程腔损耗

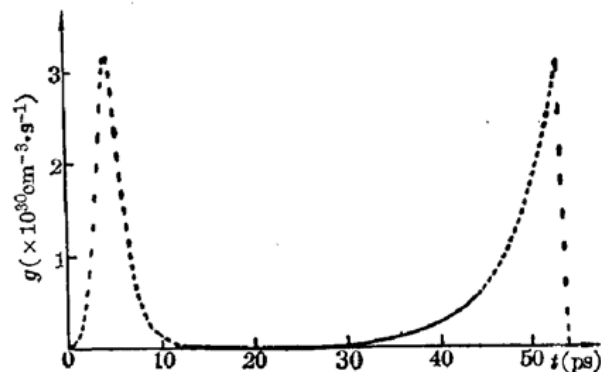


图 7 红、黄波段激光脉冲的计算结果

采用速率方程模型^[1,53], 方程中计入了染料对黄光波段辐射的自吸收, 假定自吸收所提供的粒子反转数只对红光波段的振荡贡献。

$$\frac{dN_1}{dt} = w_p(t)N_0 - \left(\frac{1}{\tau} + v\sigma_{ey}q_y + v\sigma_{eR}q_R \right) N_1 \quad (5)$$

$$\frac{dq_y}{dt} = q_y \left[v(\sigma_{ey}N_1 - \sigma_{ay}N_0) - \frac{1}{t_y} \right] \quad (6)$$

$$\frac{dq_R}{dt} = q_R \left[v\sigma_{eR} \left(N_1 + \int_{-\infty}^t v\sigma_{ay}N_0q_y dt \right) - \frac{1}{t_R} \right] \quad (7)$$

$$N_1 + N_0 = N_t \quad (8)$$

其中 N_1 是上能级粒子数; N_0 是基态粒子数; N_t 是总的粒子数; τ 是上能级寿命; q_y 和 q_R 分别是黄、红波段激光的腔内光子数; t_y 和 t_R 是黄、红波段激光的腔内光子寿命; σ_{ey} 和 σ_{eR} 是染料对黄、红激光的发射截面; σ_{ay} 是染料对黄光波段激光的吸收截面; v 是染料介质内的光速; $w_p(t)$ 是泵浦速率, 且

$$w_p(t) = w_p(0) e^{-\left(\frac{t}{t_p}\right)^2 \ln 2},$$

t_p 是泵浦脉宽。

选取尽可能与实验条件相近的各参数的数值^[6,7], 见表 4 所示。在染料浓度为 $8 \times 10^{-3}M$ 时, 计算结果如图 7 所示。它表明在腔长为 $300 \mu m$, 单脉冲泵浦能量为 $146 \mu J$, 黄光波段单程腔损耗为 1.8, 红光波段单程腔损耗 0.45 时, 红、黄波段激光脉冲都能振荡, 并且是黄光波段

脉冲超前红光波段脉冲, 时间间隔为 48 ps, 与实验结果相吻合, 只是脉冲宽度的理论值较实验值小得多, 这是因为速率方程中忽略了空间对激光脉冲形成的影响所引起的。

表 4 计算中所用的各参数的数值

参数	数值	参数	数值
N_i	$4.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	t_y	$1 \times 10^{-12} \text{ s}$
σ_{ey}	$1.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	t_R	$4 \times 10^{-12} \text{ s}$
σ_{eR}	$8 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	t_p	$4 \times 10^{-11} \text{ s}$
σ_{oy}	$2 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	$w_p(0)$	$5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$
τ	$5 \times 10^{-9} \text{ s}$	v	$2.3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

最后, 简单地考虑一下红光波段激光的产生, 从(7)式看到红光波段能振荡, 必须从某一时刻 t 开始满足:

$$v\sigma_{eR}\left(N_1 + \int_{-\infty}^t v\sigma_{oy}N_0 g_y dt\right) - \frac{1}{t_R} > 0 \quad (9)$$

因而 t_R 不能太小, 也就是红光波段腔的损耗要小。对不同的红光波段损耗, 计算(5)~(8)式表明, 当 $t_R < 3.2 \times 10^{-12} \text{ s}$ (单程腔损耗 0.56), 红光波段就不能建立振荡。同样从(9)式可看到, 上能级粒子数 N_1 要大, 而 N_1 与泵浦强度及染料浓度有关, 因此必须具有一定高的泵浦强度及染料浓度, 红光波段才能形成振荡, 这与前面表 1 的结论也相符合。

参 考 文 献

- 1 D. Roess, *J. Appl. Phys.*, **37**, 2004(1966)
- 2 A. J. Cox *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 664(1982)
- 3 G. W. Scott *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**, 544(1983)
- 4 陈凌冰 *et al.*, *中国激光*, **11**(7), 396(1984)
- 5 C. Lin, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**, 602(1975)
- 6 B. B. Snavely, *Dye Laser*, ed by F. P. Schäfer, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1975, p. 89
- 7 O. Svelto 著, 吕云仙等译, *激光原理*(科学出版社, 北京, 1983), p. 224