

采用纵模匹配技术的短脉冲注入锁定染料激光器

张铁军 许风明

(中国科学院长春光机所)

Injection-locked short pulse dye laser with longitudinal mode matching

Zhang Tiejun, Xu Fengming

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

摘要: 本文报道了采用纵模匹配技术的短脉冲注入锁定染料激光器系统及实验结果。

关键词: 纵模匹配, 短脉冲染料激光器, 注入锁定

一、引言

对不采用纵模匹配技术的短脉冲注入锁定染料激光器而言, 尽管注入锁定能次次发生, 但其输出的光谱特性和强度特性具有一定的随机性, 这是由受迫激光器的纵模频率的随机性所造成的。为了改善注入锁定输出的光谱特性和强度特性, 采用纵模匹配技术是必要的^[1-3]。

本文提出一种新的纵模匹配方法, 它的实质是采用偏振法稳频技术的原理, 为电子学控制系统提供了色散型误差控制信号, 使受迫激光器的纵模频率始终锁定在主激光器的注入光频率上。利用该方法我们做成了采用纵模匹配技术的短脉冲注入锁定染料激光器系统, 对它的特性进行了研究。

二、实验装置

如图 1 所示, 实验装置可以分为六个部分: 主激光器、受迫激光器谐振腔、泵浦激光器、纵模匹配系统、测量系统和电子学控制系统。主激光器采用 801A 型连续波环形染料激光器, 波长可以从 570nm 调谐到 620nm, 在此范围内受迫激光器基本上不存在对注入光场的吸收, 主激光器的输出功率可达 100mW, 线宽在 20MHz 左右; 受迫激光器的谐振腔采用“8”字形环形腔结构, 如图 1 中的 M_1 、 M_2 、 M_3 、

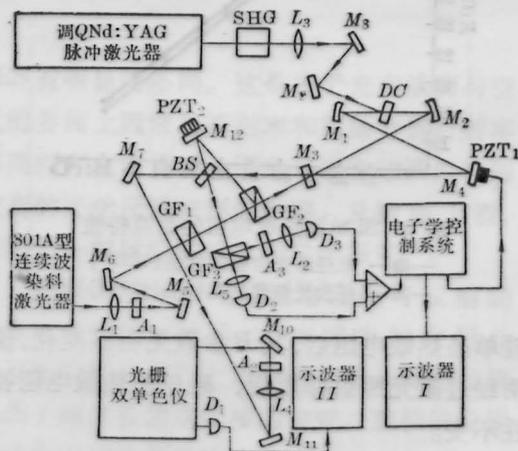


图 1 实验装置图

- M_1 、 M_2 —球面全反射镜; M_3 —注入与输出耦合镜;
- $M_4 \sim M_{12}$ —平面全反射镜; $A_1 \sim A_3$ —衰减片;
- $L_1 \sim L_5$ —会聚透镜; DC—染料盒;
- BS—分束板; $GF_1 \sim GF_3$ —格兰-付科棱镜;
- $D_1 \sim D_3$ —光电接收器; SHG—倍频晶体;
- $PZT_1 \sim PZT_2$ —压电陶瓷;

M_4 、 M_1 和 M_2 为曲率半径为 5cm 的凹面全反射镜, M_3 的反射率为 0.7, 染料盒 DC 厚为 4mm, 其中装有 3.3×10^{-4} M/L 浓度的若丹明 6G 乙二醇溶液, 染料盒与受迫激光器振荡光的光轴成布儒斯特角放置, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 与 DC 要求满足像散补偿条件放

置,谐振腔的腔长为 30 cm;采用调 Q 的 Nd:YAG 激光器 1064 nm 的倍频输出作为受迫激光器的泵浦源。泵浦功率为 50 kW,脉宽为 10 ns。没有注入信号时,受迫激光器的泵浦转换效率达 30%,每一路光的输出功率约为 7 kW,脉宽约为 8 ns;纵模匹配系统由两个部分组成:一部分是由 GF_1 、 GF_2 、 BS 和 M_{12} 组成的偏振分光系统,另一部分是由 GF_3 、 L_2 、 L_5 、 A_3 、 D_2 和 D_3 组成的偏振光分析系统。由主激光器输出的注入光场经 GF_1 后偏振方向与水平方向成 $\frac{\pi}{4}$ 角,经过水平放置的 GF_2 后,一部分作为注入光进入到受迫激光器的谐振腔后输出信号光场,另一部分被反射后成为参考光场。信号光场与参考光场经 BS 后一同进入到偏振光分析系统,并由减法器作差后提供色散型误差控制信号给电子学控制系统,使受迫激光器的纵模频率锁定在注入光频率上。

测量系统由两部分组成,一部分如图 1 所示,注入锁定输出经光栅双单色仪后色散,由光电倍增管 D_1 接收,并在示波器上显示,从而可以测量注入锁定输出与注入波长、注入功率、频率失谐等因素的关系。另一部分如图 2 所示,用来测量注入锁定输出的光谱特性,注入锁定输出由焦距为 5 cm 的透镜 L_6 发散到 3 cm 厚的实心石英制 F-P 标准具上,再由一个焦距为 50 cm 的会聚透镜 L_7 会聚在照相机 Ph 的焦面上成像。

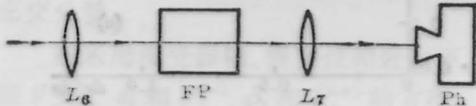


图 2 注入锁定输出的模式测量装置
 L_6 、 L_7 —会聚透镜; F-P—标准具; Ph—照相机

三、色散型误差控制信号

假设主激光器的输出光场表述为

$$E(t) = E_0 e^{-j\omega_{in} t}$$

那么经 GF_2 后,注入光场为 $E_{in}(t) = E_p e^{-j\omega_{in} t}$, 参考光场为 $E_{re}(t) = E_s e^{-j\omega_{in} t}$, $E_{in}(t)$ 与 $E_{re}(t)$ 的偏振方向相互垂直,且 $E_p = K_1 E_0$, $E_s = K_2 E_0$ (K_1 和 K_2 为常量)。注入光场经过在受迫激光器的谐振腔中的多次往返发生多光束的干涉后的输出信号光场为:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \left[\frac{-R + R_0 e^{i\delta}}{1 - R_0 e^{i\delta}} \right] \frac{1}{\sqrt{R}} \quad (1)$$

其中 $\delta = 4\pi L / \lambda_{in}$ 为位相因子, L 为谐振腔的腔长, λ_{in} 为注入波长, R 为 M_3 的反射率, $R_0 = \sqrt{RT}$, T 为腔内光场的透过率。由(1)式给出的信号光场与

参考光场进入到偏振分光系统后给出的误差信号 ΔI 为:

$$\Delta I = I_1 - I_2 = I_t + I_k [F_1(\delta) \cos \phi + F_2(\delta) \sin \phi] \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} I_1 &= |E_p|^2 \cos^2 \alpha + |E_s|^2 \sin^2 \alpha + \frac{E_p E_p}{\sqrt{R}} \\ &\times \sin 2\alpha \left[\frac{(R + R_0^2) - R_0(1 + R) \cos \delta}{1 + R_0^2 - 2R_0 \cos \delta} \right. \\ &\times \cos \phi + \left. \frac{R_0(1 - R) \sin \delta}{1 + R_0^2 - 2R_0 \cos \delta} \sin \phi \right] \\ I_2 &= |E_p|^2 \sin^2 \alpha + |E_s|^2 \cos^2 \alpha - \frac{E_p E_p}{\sqrt{R}} \\ &\times \sin 2\alpha \left[\frac{(R + R_0^2) - R_0(1 + R) \cos \delta}{1 + R_0^2 - 2R_0 \cos \delta} \right. \\ &\times \cos \phi + \left. \frac{R_0(1 - R) \sin \delta}{1 + R_0^2 - 2R_0 \cos \delta} \sin \phi \right] \\ I_t &= (|E_p|^2 - |E_s|^2) \cos 2\alpha, \\ I_k &= \frac{2E_p E_p \sin 2\alpha}{\sqrt{R}} \\ F_1(\delta) &= \frac{R_1 + R_0^2 - R_0(1 + R) \cos \delta}{1 + R_0^2 - 2R_0 \cos \delta}, \\ F_2(\delta) &= \frac{R_0(1 - R) \sin \delta}{1 + R_0^2 - 2R_0 \cos \delta} \end{aligned}$$

这里 α 为 GF_3 光轴与水平方向的夹角, ϕ 为从 GF_2 经 M_3 到 BS 与从 GF_2 经 M_{12} 到 BS 之间的光路位相差。当取 $\alpha = k\pi + \frac{\pi}{4}$ 和 $\phi = k\pi + \frac{\pi}{2}$ (k 为整数) 时,由(2)式给出的差信号 ΔI 为:

$$\Delta I = \pm I_{kmax} \cdot F_2(\delta) \quad (3)$$

其中 $I_{kmax} = 2E_p E_p / \sqrt{R}$ 。(3)式就是我们所要求的色散型误差控制信号,该信号具有受迫激光器纵模频率与主激光器注入光频率共振点同控制信号曲线零点重合以及灵敏度高,控制范围较大的特点。我们在实验中就是利用(3)式给出的色散型误差控制信号来实现主激光器与受迫激光器之间的纵模匹配的。

四、实验结果

在实验中,我们详细地研究了注入波长、注入功率、主激光器注入光频率与受迫激光器纵模频率之间的失谐等因素对注入锁定输出的影响,并且分析了输出的模式。

图 3 中给出了在不同的注入波长下注入锁定输出与注入功率(指主激光器的输出功率)的实验关系曲线。注入波长我们选了不同的三种;分别为 $\lambda_{in_1} = 584.6$ nm(曲线 1), $\lambda_{in_2} = 588.3$ nm(曲线 2), $\lambda_{in_3} = 594.3$ nm(曲线 3),其中 λ_{in_1} 位于受迫激光器的自由运转的中心波长附近。泵浦激光器的电源输入电压

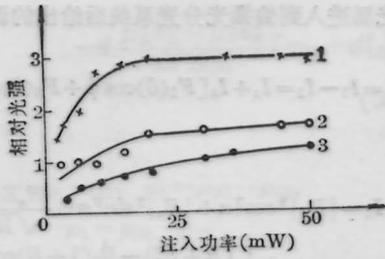


图3 注入锁定输出与注入功率的关系

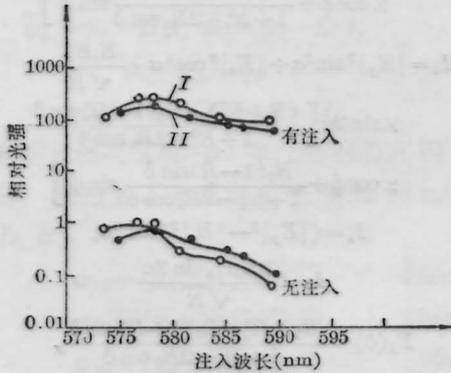


图4 注入锁定输出与注入波长的关系
I: $P_{in}=40\text{ mW}$; II: $P_{in}=5.5\text{ mW}$; Nd:YAG
输入电压 900 V , $BW=0.3\text{ nm}$

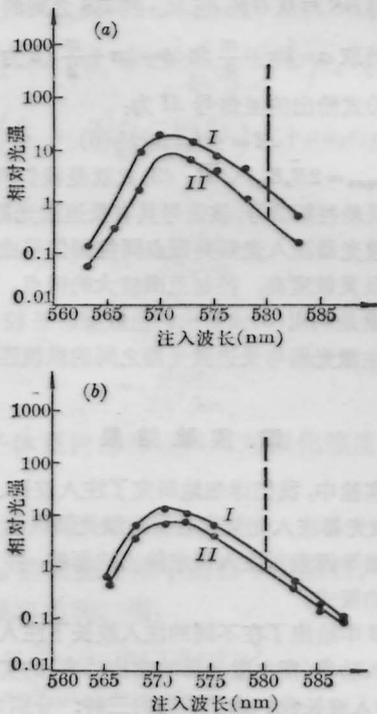


图5 受迫激光器的发射谱

$\lambda_{in}=580.2\text{ nm}$, Nd:YAG 输入电压 900 V ,
 $BW=0.3\text{ nm}$, $P_{in}=60\text{ mW}$ (a) 和 5.5 mW (b)

为 900 V , 光栅双单色仪的仪器线宽 $BW=0.3\text{ nm}$, 由图可见, 每条曲线从阈值点分为两个不同的部分, 阈值点下的部分近似为线性变化, 而高于阈值点便出现了饱和状态。不同的曲线, 幅值与阈值点均不相同, 以 $\lambda_{in}=584.6\text{ nm}$ 注入波长上的曲线为最高。

图4中给出了在给定的注入功率下注入锁定输出与注入波长的关系曲线。由曲线可知, 在受迫激光器的自由运转中心波长上的注入锁定输出同无注入情形相比放大了 10^3 倍以上, 而在边缘处放大了近 10^3 倍左右。在图5中给出了受迫激光器的发射谱, 图中 I 对应于没有注入的情形, II 对应于有注入的情形, 虚竖线对应于注入波长上的有注入输出。显然, 除了在注入波长处的放大以外, 其他发射波长的输出明显地被压缩了。但压缩的量较小, 因而有宽带背景发射伴随着注入锁定输出。

图6中给出了频率失谐对注入锁定输出影响的实验关系曲线。测量时利用了在全反射镜 M_4 上的

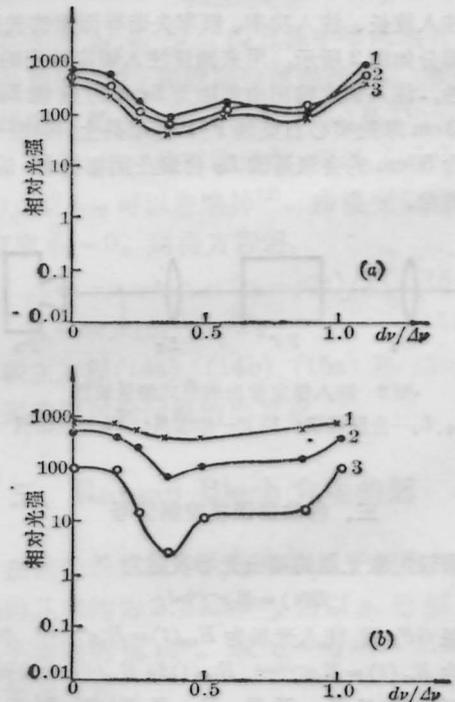


图6 频率失谐对注入锁定输出的影响
 $BW=0.3\text{ nm}$; Nd:YAG 输入电压 900 V

(a) 曲线 1— $P_{in}=60\text{ mW}$; 曲线 2— $P_{in}=60\text{ mW}$;
曲线 3— $P_{in}=8\text{ mW}$; $\lambda_{in}=581.6\text{ nm}$
(b) 曲线 1— $\lambda_{in}=579.2\text{ nm}$;
曲线 2— $\lambda_{in}=581.6\text{ nm}$;
曲线 3— $\lambda_{in}=589.9\text{ nm}$

(下转第 52 页)

红外探测器放在焦点放大2.5倍的地方,探测器前(紧靠)放置 $\phi=0.1\text{mm}$ 的光阑,取样用转镜反射光束,使光束扫过光阑。光束通过光阑射到探测器上的功率与远场强度分布成正比。探测器输出信号由瞬态波形存储器存贮和显示,存贮信号由 $x-y$ 函数记录仪画出分布曲线。实验装置如图9所示。

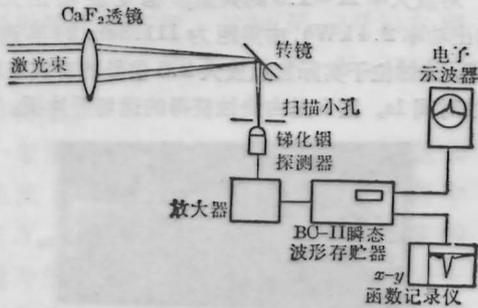


图9 一维红外扫描测量装置

图10是用此法对 $M=2.6$ 、 $P=250\text{W}$ 的共焦非稳定腔聚焦光束扫描获得的远场强度分布曲线。在类似条件下的有机玻璃烧蚀图表明,远场分布有较好的轴对称性,因此我们可以认为扫描图样同样有较好的轴对称性。由图10可见,扫描曲线的波谷位置与理论曲线的暗环位置十分接近。

同样用求体积比的方法得 $M=2.6$ 的相对能量分布(图5)。按83.8%能量计算,实测发散角为

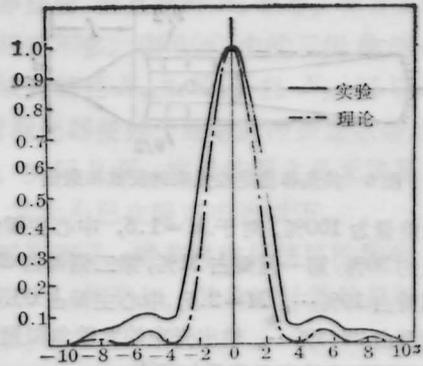


图10 远场强度分布曲线

0.59mrad, 焦斑直径0.65mm,为理论值的1.25倍。计算表明,实测主瓣内含理论主瓣能量的80.3%。

参 考 文 献

- 1 Chester A. N., *Appl. Opt.*, **11**(11), 2584(1972)
- 2 Gross R. W., Bott J. P., "Handbook of Chemical Lasers"(John Wiley & Sons, New York, 1976), p. 132
- 3 Born M. and Wolf E., "Principles of Optics"(Sixth Edition, Pergamon Press, 1980), p. 416
- 4 永久治彦(長久保), *光学*, **14**(3), 185~190 (1985)
- 5 久保田广, 刘瑞洋译"波动光学"(科学出版社, 1983), pp. 393~394

(收稿日期: 1987年6月1日)

(上接第48页)

PZT₁上加的电压变化对应于频率失谐程度的变化这一关系,直接测量了注入锁定输出与频率失谐的关系,测量过程中保持注入光频不变。图(a)为在给定的注入波长下,不同的注入功率时注入锁定输出与失谐因子 $d\nu/\Delta\nu$ 的关系, $d\nu$ 为主激光器注入光频率与受迫激光器中与其最邻近的纵模频率的差, $\Delta\nu$ 为受迫激光器纵模频率间隔。图(b)为在给定的注入功率下,对于不同的注入波长注入锁定输出与失谐因子 $d\nu/\Delta\nu$ 的关系。显然 $d\nu/\Delta\nu$ 对注入锁定输出有很大的影响。当注入波长远离自由运转的中心波长,失谐的影响愈明显,输出功率将下降。

在图7中给出了与注入光方向相同一路光输出的放大倍数(I)以及相反一路输出缩小倍数(II)同注入功率的关系曲线。测量时不采用光栅单色仪,而在 M_3 与 BS 之间和 M_3 与 GF_2 之间分别放置一个极薄的分光镜,直接用光电接收器接收并在示波器上显示记录。

注入锁定输出不仅可是单纵模,也可是多纵模,

且输出线宽加宽。

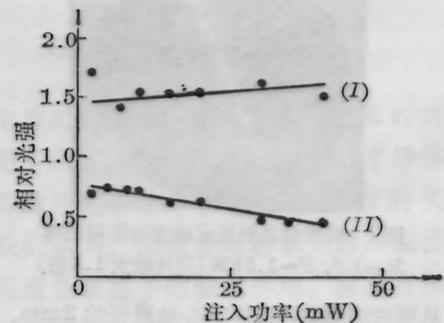


图7 放大输出与注入功率的关系

$\lambda_{\text{in}}=582.2\text{nm}$, Nd:YAG 输入电压为900V

参 考 文 献

- 1 S. Blit et al., *Appl Phys.*, **12**, 69 (1977)
- 2 F. Tr hin et al., *Opt. Commun.*, **31**, 76(1979)
- 3 P. Verkerk et al., *Opt. Commun.*, **58**, 413 (1986)

(收稿日期: 1987年8月31日)