

## 新一代激光器——混合型激光系统

庄斗南 田永赫 牟宛峰 于桂秋

(中国科学院上海光机所, 201800)

**提要:** 不同介质的激光器组合以后具有更多优点, 称为混合型激光系统。文章介绍作者研制的三种混合型激光系统: 气-固、固体-准分子和低-高气压混合型激光系统。

**关键词:** 混合型激光器, 准分子, 蒸气, 染料

### A new generation of lasers—hybrid lasers

Zhuang Dounan, Tian Yonghe, Mou Wanfeng, Yu Guiqiu

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

**Abstract:** A hybrid laser consists of two or more different laser devices or laser medias emitting at the same wavelength of stimulated radiation. These lasers have the main advantages owned by the respective lasers. Three types of hybrid laser developed by the authors are described, i. e., gas-solid laser, solid-excimer laser and lower-higher gas pressures lasers.

**Key words:** hybrid laser, excimer, vapor, dye

### 一、引言

迄今, 各类激发介质的激光器都已经得到完善发展。显然, 每种激光器均有各自的优缺点。能否把不同激光器的优点结合在一起造成更理想的激光器呢? 从70年代起作者试验了三种类型的混合型激光系统。第一种是气体-固体混合型激光系统。该装置首先将运转于  $1.051 \mu\text{m}$  的单模  $\text{N}_2$  脉冲振荡器和增益带中心位于  $1.054 \mu\text{m}$  的掺钕磷酸玻璃放大器相结合<sup>[1]</sup>, 该激光器既具有易于单模运转又有高增益、高储能的优点。第二种是固体三倍频激光和准分子放大器的结合<sup>[2]</sup>。振荡器选用掺钕磷酸盐玻璃作激活介质, 输出激光经  $\text{LiNbO}_3$  和  $\text{KDP}$  晶体转换成三倍频(351 nm)后注入  $\text{XeF}^*$  放大器放大。该器件具备了脉宽易于压缩的固体激光优点和在紫外波段有高增益, 易获大体积激发、高效率 and 介质受损可恢复等的准分子激光器优点。第三种是将低、高气压  $\text{CO}_2$  激光管结合产生  $\sim 10^{10} \text{ W}$   $\text{CO}_2$  激光系统, 该器件结合了易于单模运转和高增益的二个特色。

### 二、气-固激光器的一种典型混合<sup>[1]</sup>

1. 实验装置。实验装置如图1所示。选用的第一台振荡器是脉冲  $\text{N}_2$  激光<sup>[3, 4]</sup>, 激光源于

第一正带跃迁,  $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_n^+$ 。典型参数和结果: 分四段放电组合, 每段 18 cm 长, 内径 4 mm,

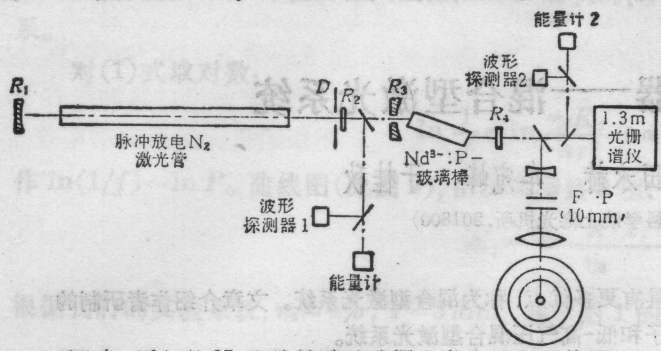


图 1 近红外 N<sub>2</sub> 和掺钕磷玻璃混合激光器实验装置

放大器中, 初步获近 40 μJ 输出, 波形与注入信号吻合。背景干净, 图 1 注入腔结构可靠性高、易于同步, 但损耗大。采用简单物理模型便可导出计算耦合输出能量的近似公式:

$$E_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n = E_1 [1 - G^n (1 - \nu_c)^n] / [1 - G(1 - \nu_c)] \quad (1)$$

其中,  $G$  为扣除损耗(耦合系数除外)的双程增益

$$G = \exp[(\bar{g}_0 - \bar{\nu}_c) 2L] \quad (2)$$

按腔长平均的小信号增益系数和损耗系数分别为  $\bar{g}_0 = 0.8\% \text{ cm}^{-1}$  和  $\bar{\nu}_c = 0.06\% \text{ cm}^{-1}$ , 腔长  $L = 50 \text{ cm}$ , 耦合系数为  $\nu_c = 75\%$ , 而

$$E_1 = E_0 G(3L) \nu_c \quad (3)$$

$E_0$  为注入脉冲能量。计算表明, 减少耦合可增加输出, 实验表明,  $\nu_c = 50\%$ ,  $E_{out} \approx 1 \text{ mJ}$ 。但难于同步, 脉冲增大, 伴有自激振荡。此外, 还需考虑到二腔模的匹配; 同理, 提高  $G$  也可增加输出, 但也会遇到上述问题。因此, 筹备了二项改进试验:

1. 选择更理想振荡器。单模运转更为稳定和波长匹配更佳的气体激光有运转于  $1.056 \mu\text{m}$  的  $\text{N}_2$  激光和  $1.053 \mu\text{m}$  的  $\text{I}_2$  激光。相应的 N 原子跃迁是  $3d^4 D_{3/2} \rightarrow 3p^4 P_{5/2}^0$ , 横向放电, 氮气中含有大比分(99.8%)的  $\text{He}^{[5]}$ 。  $\text{I}_2$  激光<sup>[6]</sup> 由 YAG 倍频激光泵浦。

2. 注入腔的改进。一种用电光开关控制的可控放大次数的激光腔如图 2 所示, 振荡器输出的平面线偏振光  $E_0$  通过  $60^\circ$  偏振片由  $\lambda/2$  片变为垂直偏振后经放大器  $A_m$  放大, 再经  $60^\circ$  偏振片  $M_2$ 、反射镜  $M_3$  和  $M_4$ 、偏振片  $M_1$  返回  $\lambda/2$  片变为平面偏振光, 如此刻开关  $S$  仍关闭, 则经  $A_m$  放大后便通过  $M_2$  输出。如果  $S$  上加上半波电压则光线继续在四镜腔内往返放大, 一直继续到探测器  $D$  监测到光强下降或到达预定信号时便由比较器提供一个信号去触动半波电压发生器使  $S$  开启, 此刻激光腔成了倒空结构, 腔内激光通过  $M_2$  全部输出。

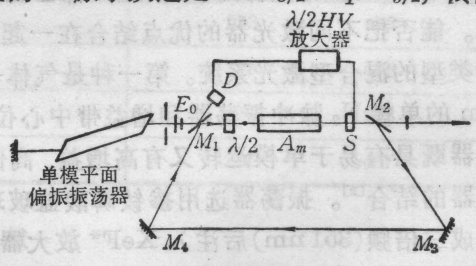


图 2 一种典型的同步注入混合激光器

该结构有许多明显优点: i) 自激振荡完全受到扼制, 因为任何增益带宽内的噪声光子最多仅能通过  $A_m$  二次; ii) 信号放大次数可随意控制; iii) 模体积和耦合光斑大; iv) 这类行波式放大腔不需考虑模式匹配。因此, 既可得理想光束又能充分利用放大介质的储能。对该结构的

理论分析须考虑到饱和效应,腔内循环  $m$  次的激光输出为

$$E_{out}^m = E_s \ln \{ 1 + [\exp(E_{om}/E_s) - 1] \exp[(\bar{g}_0 - \bar{\nu}_0)L_0] \} \quad (4)$$

其中,  $E_{om}$  是第  $m$  次放大时进入  $A_m$  的光脉冲能量,  $E_s$  为放大介质的饱和能量(饱和能量密度  $E_{s0}$  和光束截面乘积), 它与工作物质特性、脉宽和泵浦条件有关, 对  $\text{Nd}^{3+}$  玻璃  $E_{s0} \approx 2.3 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{ns}^{[7]}$ 。由式(4)可算出一系列  $E_{out}^m$  与  $E_{om}$ 、 $\bar{g}_0$  和  $\bar{\nu}_0$  关系曲线。初步的实验结果和计算结果基本相一致。

### 三、第二种典型的气-固混合激光器<sup>[2]</sup>

1. 实验。振荡器选用掺钕磷玻璃, 波长  $1.054 \mu\text{m}$ , 经  $\text{Mn}:\text{LiNbO}_3$  晶体倍频和 KDP 混频后所得三倍频  $351 \text{ nm}$  注入  $\text{XeF}^*$  放大器放大, 实验装置如图 3 所示。玻璃棒尺寸  $\phi 6 \times 200 \text{ mm}$  (有效增益长度  $120 \text{ mm}$ ), 低浓度染料片或色心晶体<sup>[8]</sup> 裁剪脉冲。  $\text{LiNbO}_3$  (1 cm 长) 的调整十分简便(I 类匹配角  $\sim 90^\circ$ , 允许偏差几  $\text{mrad}$ , 而 KDP 为  $\sim 0.1 \text{ mrad}$ ), 对低功率激光仍有高的倍频效率; II 类匹配角为  $58.4^\circ$  的 KDP 需十分精细调整, 长度  $30 \text{ cm}$ 。实验时先用  $30 \text{ ns}$  光脉冲调整晶体使  $3 \text{ W}$  效率达  $7.5\%$ 。

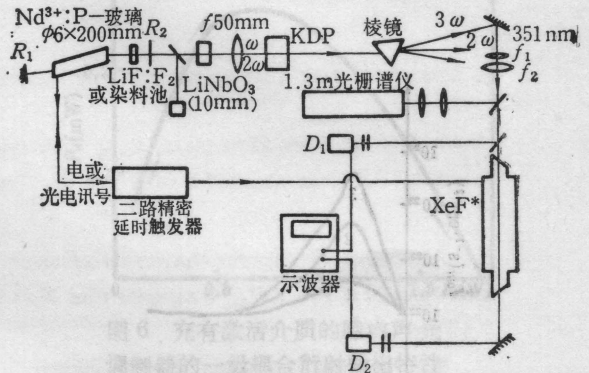


图 3 固-准分子混合激光器实验装置

$\text{XeF}^*$  器件采用我们改进的 E. Armandille 结构<sup>[9]</sup>, 聚氯乙烯外壳。增益长度为  $50 \text{ cm}$ , 气体比分为  $\text{Xe}:\text{F}:\text{He} = 11:5:600 \text{ Torr}$ , 充电电压为  $25 \text{ kV}$ , 主电容为  $22.8 \text{ nf}$ 。

实验中获得  $120\%$  的光脉冲能量的放大, 参见图 4。能量由自制的蓝光管自积分微能量计<sup>[10]</sup> 测量。

考虑到有效增益时间  $\bar{\tau}_2 \sim 14 \text{ ns}$ , 则由能量放大  $E_2/E_1$  和功率增益  $G = P_2/P_1$  的关系

$$G = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{\bar{\tau}_1}{\tau_2} = \exp(\bar{g}_0 L) \quad (5)$$

和平均小信号增益系数

$$\bar{g}_0 = \frac{1}{L} \ln \left( \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{\bar{\tau}_1}{\tau_2} \right) \quad (6)$$

可求得  $G \approx 257$ ,  $\bar{g}_0 \approx 11.1\% \text{ cm}^{-1}$ 。其中, 注入脉宽  $\bar{\tau}_1 \approx 3 \mu\text{s}$ ,  $0.5 \text{ mJ/Pulse}$ 。实际上  $\text{XeF}^*$  激光增益系数可超过  $13\% \text{ cm}^{-1}$ , 说明仍有潜力。

2. 模拟计算。  $\text{XeF}^*$  放大的二维动力学方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -\sigma I \Delta n - \frac{\Delta n}{\tau_c} + W(t) \\ \frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x} = \sigma I \Delta n + \frac{\Delta n}{\tau_s} \cdot \frac{a^2}{4\pi L^2} - \delta I \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $W(t)$  为  $\text{XeF}^*$  的形成速率<sup>[11]</sup>,  $\tau_s$  为激光上能级寿命,  $a^2$  为放电区横截面积,  $L$  为放电区长度,  $\sigma$  为受激发射截面,  $\delta$  为非饱和损耗系数, 光强单位为光子流密度。采用网格法将(7)式

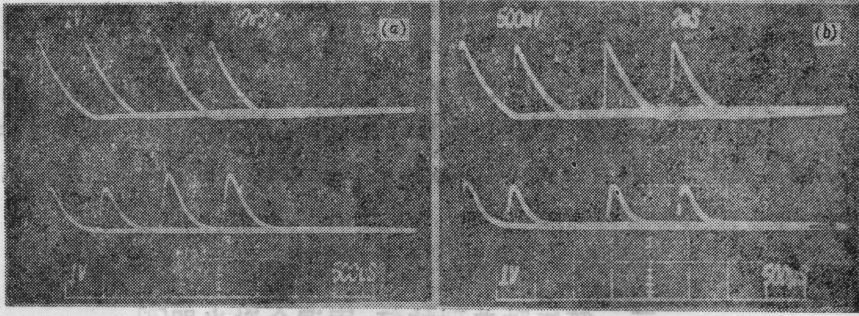


图4 光脉冲能量波形

能量正比于峰高, 上行为注入信号, 下行为放大输出信号, 左下2脉冲为Xe/He, 第3~4脉冲为Xe/He/F放电时输出信号。(b)中, 下行为He/N<sub>2</sub>放电时放大器转出信号

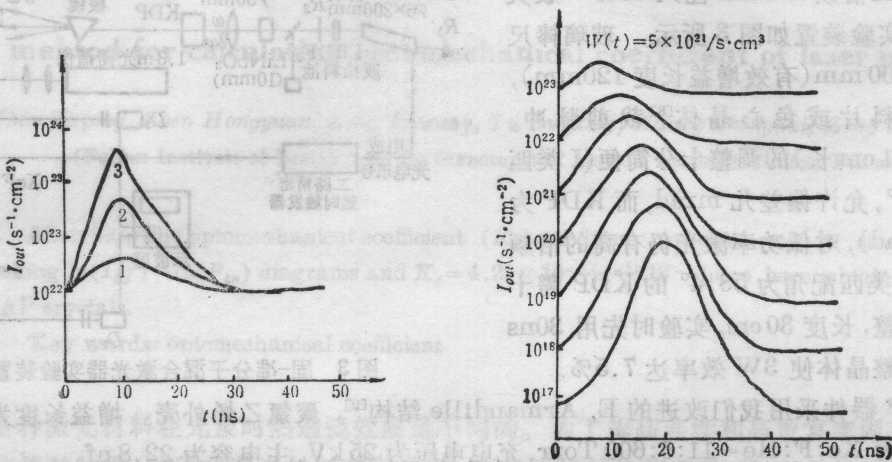


图5 左: 改变泵速下的XeF\*放大输出; 右: 改变注入信号的XeF\*放大输出

编成计算机程序算出的典型结果示于图5。

### 四、低-高气压气体混合激光振荡器

我们曾研制过一台包含混合CO<sub>2</sub>激光振荡器的10<sup>10</sup>W CO<sub>2</sub>单模激光系统<sup>[12, 13]</sup>。实验装置如图6所示。混合振荡器包含一支连续放电低气压CO<sub>2</sub>管和一支小型TEACO<sub>2</sub>放电管, 前者在腔内维持一个稳定的低功率振荡信号。选用1.5m腔长时, 驻波模间隔大于增益线宽, 从

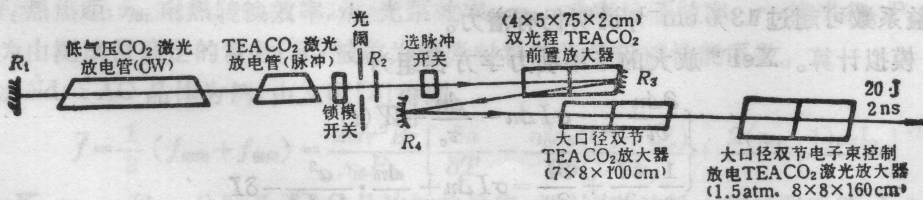


图6 以混合CO<sub>2</sub>激光器为振荡器的10<sup>10</sup>W CO<sub>2</sub>激光系统

(下转第133页)

表 4 腔外斯塔克盒非饱和吸收稳定  $\text{CO}_2$  激光频率国内外指标比较

参数	国				家	
	美国	美国	加拿大	加拿大	中国 (电子科大)	中国 (电子科大)
长期频率稳定	$\pm 3.5 \times 10^{-9}$	$\pm 3.5 \times 10^{-9}$	$\pm 1.06 \times 10^{-8}$	$\pm 5.3 \times 10^{-8}$	$\pm 1.2 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-10}$ (取样时间 1s)
短期频率稳定性	—	—	—	—	—	$1.5 \times 10^{-9}$ (取样时间 1ms)
测试方法	拍频信号的 轨迹估计	—	—	拍频信号 轨迹估计	误差信号 轨迹估计	光外差拍频, 阿仑方差评定
发表时间	1974	1977	1980	1981	1983	1988

冯志超教授以及在整个工作中作了大量理论和实际工作的彭昇阳、范勤儒同学等致谢。

## 参 考 文 献

- 1 T. A. Nussmeier, R. L. Abrams, *Appl. Phys. Lett.*, **25**(10), 615(1974)
- 2 A. R. Johnston *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **19**(12), 505(1971)
- 3 P. W. Pace *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-16**(9), 937(1980)
- 4 J. H. Mcelroy *et al.*, *Proc. IEEE*, **65**(2), 238(1977)
- 5 P. Lavigne *et al.*, AD-A104 734/9(1982)
- 6 朱大勇, 苏心智, 中国激光, **10**(12), 829(1983)
- 7 D. W. Allan *et al.*, *Proc. IEEE*, **54**, 221~230(1966)
- 8 J. A. Barnes *et al.*, *IEEE Instrum. Meas.*, **IM-2D**, 105~120(1971)
- 9 彭昇阳 *et al.*, 激光技术, **11**(5), 53(1987)

(上接第 128 页)

而使腔内  $\text{TEACO}_2$  管放电时只能运转于单纵模。此外, 腔内配有 GaAs 锁模元件、限横模光阑和腔外选脉冲开关使该振荡器输出单个 2 ns 的单模光脉冲。

## 参 考 文 献

- 1 庄斗南 *et al.* 中国激光, **13**(6), 381(1986)
- 2 Dounan Zhang *et al.*, CLEO'88, April 25~29, 1988, Anaheim, California, USA
- 3 Franzen D. L., Dang G. W., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-14**(6), 402(1978)
- 4 Brazovski, V. E. *et al.*, *Sov. Quamt. Electr.*, (2), 251(1977)
- 5 Sutlon D. G., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-12**, 315(1976)
- 6 Byer R. L. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 463(1972)
- 7 Final Research Report of Los Alamos Lab., USA 1983
- 8 Zhuang Dounan *et al.* *Chinese Phys. -- Lasers*, **13**(4), 284(1986)
- 9 Armandillo E. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **42**, (10), 860(1983)
- 10 庄斗南 *et al.*, 光学仪器, **8**(3), 35(1986)
- 11 Tomov I. V. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 747(1977)
- 12 丁爱臻, 庄斗南 *et al.*, 中国激光, **7**(12), 9(1980)
- 13 庄斗南 *et al.*, 中国激光, **7**(2), 33(1980)