

飞秒染料激光放大器

张晓天 朱鹤元 胡谊梅 孙迭麓 李富铭

(复旦大学物理系, 上海 200433)

提要 本文用重复率为 10 Hz、调 Q、Nd : YAG 激光器的二倍频输出泵浦四级染料放大器, 把从对撞脉冲锁模(CPM)环形染料激光器中产生的 43 fs 的光脉冲能量放大到 100 μ J, 脉冲宽度为 125 fs, 峰值功率为 800 MW, 在用一组四棱镜系统对放大的光脉冲进行群速度色散补偿以后, 得到了宽度为 70 fs 的放大光脉冲输出, 峰值功率达 GW。

关键词 飞秒, 染料激光放大器, 四棱镜系统

Femtosecond optical pulse dye amplifier

Zhang Xiaotian, Zhu Heyuan, Hu Yimei, Sun Diechi, Li Fuming

(Physics Department, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract We constructed experimentally the four-stage dye amplifier pumped by a Q-switched frequency-doubled Nd : YAG laser with repetition rate of 10 Hz. It amplified 43 fs optical pulses to energy of 100 μ J and pulsewidth of 125 fs. Optical pulses with pulsewidth of 70 fs and peak power of 1 GW has been generated using a four-prism sequence compressor.

Key words femtosecond, dye laser amplifier, four-prism sequence

1 引言

对撞脉冲锁模(CPM)环形染料激光器能产生光脉冲宽度小于 100fs 的激光脉冲系列^[1], 用重复率为 10 Hz、调 Q、Nd : YAG 激光器的二倍频输出泵浦四级染料放大器, 激光单脉冲能量可被放大到 1 mJ, 通常前三级放大器是横向泵浦, 最后一级放大器是纵向泵浦^[2]。我们自行研制了一台六镜腔的对撞脉冲锁模环形染料激光器^[3], 在腔内加入一组四棱镜系统后, 得到了光脉冲宽度为 43 fs 的激光脉冲系列, 并对四级染料激光放大器进行了一些调整, 其中前二级放大器采用横向泵浦, 后二级放大器采用纵向泵浦, 在利用一组可调群速度色散的四棱镜系统对放大的光脉冲进行压缩以后^[4], 得到了光脉冲宽度小于 100 fs 的放大光脉冲输出。

2 实验装置与实验条件

本文采用的 CPM 环形染料激光器, 输出激光波长为 620 nm, 激光脉冲宽度为 43 fs, 重复

频率为 100 MHz, 平均功率为 20 mW, 激光脉冲能量为 200 pJ, 峰值功率约为 4.6 kW, 由于激光脉冲的峰值功率较低, 使它的应用受到限制, 因此必须对 CPM 光脉冲进行放大。图 1 给出了飞秒光脉冲的四级染料激光放大器的结构, 我们从泵浦激光器的选择、放大介质的选择、放大自发辐射的抑制以及群速度色散的补偿来综合考虑飞秒染料激光放大器。

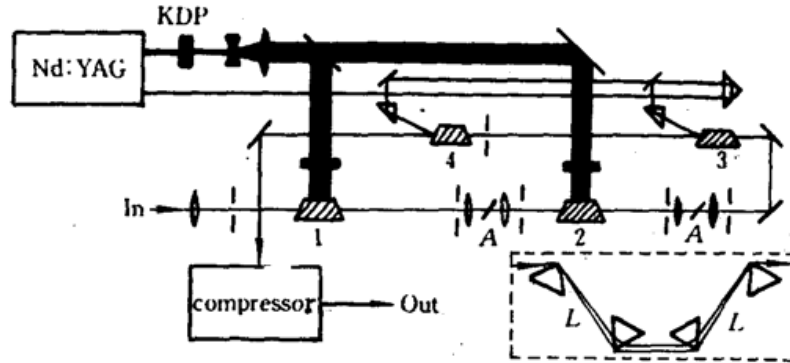


Fig. 1 Schematic diagram of a four-stage dye amplifier for femtosecond optical pulses using a four-prism sequence compressor shown in the inset

从 CPM 激光器中输出的光脉冲, 脉冲与脉冲之间的间隔只有 10 ns, 因此要使 CPM 光脉冲得到有效的放大, 一方面要求泵浦光的光脉冲宽度小于 10 ns, 另一方面要求泵浦光脉冲和 CPM 光脉冲在时间上同步, 且要求泵浦光能够被在波长 620 nm 附近有高增益的染料有较强的吸收, 故选择了有一级放大的重复率为 10 Hz、调 Q、Nd:YAG 激光器的二倍频激光作为四级染料激光放大器的泵浦源, 波长为 532 nm 的泵浦光的总能量为 230 mJ, 各级的泵浦光能量依次为 10 mJ, 20 mJ, 60 mJ, 140 mJ。

每级放大器中, 染料的选择基于下面的原则: (1) 在波长 532 nm 处, 有高的吸收截面积; (2) 在波长 620 nm 处, 有较低的吸收截面积, 但必须有较高的辐射截面积。

在第一级放大器中, 由于输入的光脉冲能量很小, 在染料中光斑直径为 0.5 mm, 理论计算给出, 要得到比较大的转换效率, 就要求有比较大的存贮能量, 因此要求第一级的染料浓度比较大, 这样 CPM 光脉冲的放大倍数也比较大, 但浓度一大, 就要求选择的染料对 CPM 光脉冲的吸收要小, 即使这种染料对 CPM 光脉冲的辐射截面积不是最大, 在本实验中, 选择了 Kiton Red 620 的乙醇溶液作为第一级放大器的增益介质, 它的荧光峰在波长 575 nm 处, 染料浓度为 4.5×10^{-4} mol, CPM 光脉冲通过增益介质的长度为 2 cm, 泵浦光的截面积为 $2 \text{ cm} \times 1 \text{ mm}$ 。

在第二级放大器中, 放大的光脉冲被扩束到直径为 2 mm, 理论计算给出, 在具有比第一级放大器低的存贮能量条件下, 可以得到与第一级放大器一样的转换效率, 但放大倍数要比第一级放大器的放大倍数小, 因此在第二级放大器中的染料浓度可以降低, 浓度一小, 对 CPM 光脉冲的吸收变得不重要了, 因此选择了具有较大辐射截面积的染料 Sulforhodamine 640 的乙醇溶液作为第二级放大器的增益介质, 它相应于 Kiton Red 620 的乙醇溶液来说, 辐射曲线红移了 15 nm, 它的浓度为 1.4×10^{-4} mol, CPM 通过增益介质的长度为 3 cm, 泵浦光的截面积为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ mm}$ 。

在第三级放大器中, 放大的 CPM 光脉冲被扩束到直径为 7 mm, 染料浓度进一步减小, 仍用 Sulforhodamine 640 的乙醇溶液作为增益介质, 浓度为 8×10^{-5} mol, CPM 光脉冲通过增益介质的长度为 3 cm, 泵浦的方向与 CPM 光脉冲传播方向相反, 这样可以得到更有效的放大,

也有助于减小对 CPM 光脉冲畸变的影响,泵浦光的光束直径为 12 mm。

我们还在第二级和第三级染料放大器中,用高氯酸(HClO_4)对染料溶液进行酸化,以使得染料溶液的辐射曲线进一步红移 15 nm,从而提高了放大器的放大倍数。

在第四级放大器中,放大的 CPM 光脉冲在增益介质中的直径为 7 mm,染料浓度继续减小,用 Sulforhodamine 640 的甲醇溶液作为增益介质,浓度为 2×10^{-5} mol, CPM 光脉冲通过增益介质的长度为 3 cm,泵浦光的光束直径为 12 mm。

在前三级放大器的各级之间,加入可饱和吸收体孔雀绿的乙二醇溶液,进行前三级放大器各级之间的隔离,有助于抑制放大自发辐射、光脉冲前沿的优先放大和非放大的 CPM 光脉冲由于放大的自发辐射有比较差的方向性,因此在各级之间加入光阑,可以减小放大自发辐射。

不论是在对撞脉冲锁模的环形染料激光器中,还是在 Q 开关的 Nd:YAG 激光泵浦的四级染料激光放大器中,由于自相位调制和群速度色散,会使超短光脉冲的脉宽展宽,而增益介质、饱和吸收体和各光学元件在我们所研究的波长范围内,一般都表现为正群速度色散,因此在超短光脉冲的产生过程中,负群速度色散是非常重要的,而一组四棱镜系统不仅能够进行正负群速度色散的调节,而且具有较低的能量损耗,因此在本实验中,我们利用一组可调色散的四棱镜系统对放大的光脉冲进行群速度色散的补偿。

3 实验结果与讨论

采用 LPE-1A 型激光功率计,测量了压缩以前的放大光脉冲的平均功率,那么每个放大光脉冲的平均能量为 100 μJ ,脉冲与脉冲的能量涨落小于 20%,放大自发辐射背景小于 20%。

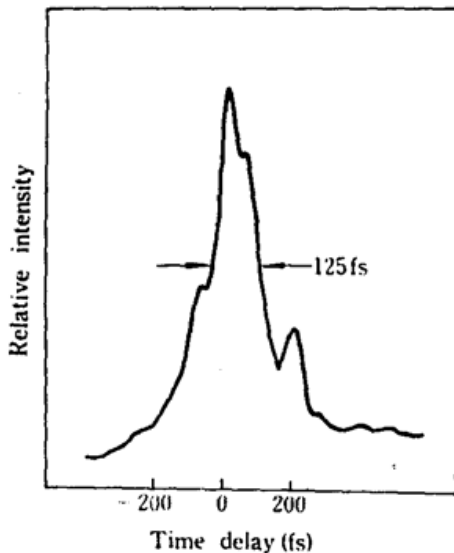


Fig. 2 Autocorrelation function of amplified optical pulses of 125 fs FWHM

图 2 给出了用非共线 I 型匹配的二阶强度自相关方法测量的放大光脉冲的自相关函数,假设光脉冲的形状为双曲正割函数,那么放大光脉冲的宽度为 125 fs,因此放大光脉冲的峰值功率 = 放大光脉冲的平均能量/光脉冲宽度 = $100 \mu\text{J}/125 \text{ fs} = 800 \text{ MW}$,由于输入 CPM 光脉冲的能量为 200 pJ,因此四级染料放大器的放大倍数 = $100 \mu\text{J}/200 \text{ pJ} = 5 \times 10^5$,转换效率 $\approx 0.04\%$ 。

在用一组四棱镜系统对放大的光脉冲进行群速度色散补偿以后,在 $L = 450 \text{ mm}$ 时,放大的光脉冲宽度被压缩到 70 fs,图 3 给出了压缩光脉冲的自相关函数,由于四棱镜系统对能量的损耗较小,因此压缩的光脉冲峰值功率达 GW。

四级染料激光放大器远非理想的放大器,而且随着放大光脉冲能量的提高,在放大器中产生的非线性现象就越严重,自相位调制使得光脉冲产生新的频率分量,而饱和放大使得光脉冲严重畸变,在飞秒量级,各光学元件和染料介质的群速度色散对飞秒光脉冲的展宽特别显著,泵浦光能量的涨落和非均匀性会导致放大光脉冲能量的涨落和放大光脉冲的空间不均匀性,而热效应又会导致放大光脉冲的畸变,放大自发辐射能增强背景信号和降低放大效率,因此在放大器的设计中必须综合考虑各种因素,以便达到最佳的放大。

在我们设计的四级染料激光放大器中,放大的光脉冲宽度在不经压缩的条件下仅为 125 fs,与国外同类四级染料放大器相比^[2],我们得到的放大光脉冲宽度比他们的小,这可能有下列原因:(1)在本实验中,增益介质的总长度为 11 cm,在第三级和第四级之间又少了一级饱和吸收体,而在他们的条件下,增益介质的总长度为 21 cm,因此由于增益介质的群速度色散引起的光脉冲展宽比他们要小;(2)在本实验安排中,第三级与第四级一样也采用纵向泵浦,而纵向泵浦对改善放大光脉冲的空间均匀性和时间形状都有益处,因而采用纵向泵浦能有效地提高放大效率和减小放大光脉冲的展宽;(3)在本实验的条件下,染料溶剂是乙醇或甲醇,而在他们的实验中,溶剂是水,并在水中加入 1.5% 的表面活性剂 Ammonyx LO,这对于放大自发辐射的抑制有较理想的结果,但实验研究也表明,水比乙醇或甲醇有更强的非线性效应,因此由于自相位调制和群速度色散引起的放大光脉冲展宽,水比乙醇或甲醇有更强的作用。

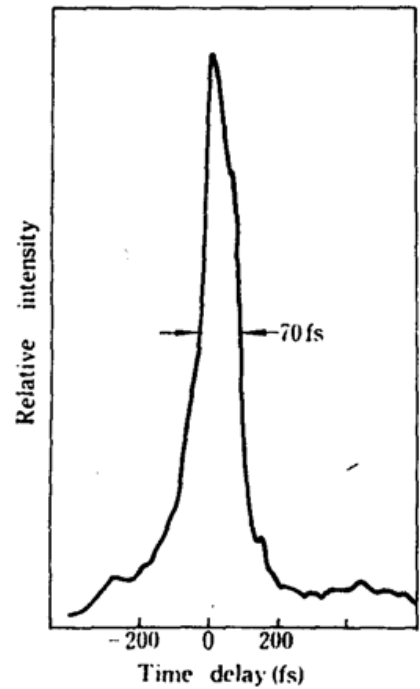


Fig. 3 Autocorrelation function of amplified optical pulses using a four-prism sequence compressor, the FWHM is 70 fs

参 考 文 献

- 1 R. L. Fork, B. I. Greene *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 671(1981)
- 2 R. L. Fork, C. V. Shank *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 223(1982)
- 3 D. C. Sun, Y. M. Hu *et al.*, *Acta Optica sinica*, **10**, 865(1986)
- 4 R. L. Fork, O. E. Martinez *et al.*, *Opt. Lett.*, **9**, 150(1984)