

具有空间色散的超短脉冲放大器的研究

向望华 吴涛* 张贵忠 王清月

(天津大学精仪系, 天津 300072)

摘 要 分析了采用光栅引入空间色散的超短脉冲放大器对抑制谱带变窄、增益饱和及减少放大的自发辐射等作用, 并在实验上采用 $4f$ 系统的单级染料放大器, 获得了大于 10^3 放大倍率。

关键词 超短光脉冲, 增益饱和, 放大自发辐射(ASE).

1 引 言

高功率超短光脉冲在物理、化学、生物学等超快过程的研究中具有重要的应用前景。1981年 Fork 等人^[1]利用碰撞锁模获得飞秒超短光脉冲后, 1982年又实现了飞秒光脉冲的放大^[2]。这种串接式四级染料放大系统将单个脉冲能量放大到 10^5 倍, 十几年来, 人们均采用这种放大器^[3,4]。然而这种多级串接式染料放大器存在着难以克服的缺点, 即随着脉冲能量被放大, 脉冲的光谱宽度变窄, 造成放大后脉冲宽度展宽, 峰值功率降低, 如果再采取压缩措施将脉宽进一步压窄, 则势必带来损耗。本文在深入研究放大过程对超短脉冲所含各种频率成分的影响及对脉宽的影响的基础上, 使用光栅引入空间色散的染料放大系统, 从理论上分析了这种系统对于抑制谱带变窄、增益饱和以及减少放大自发辐射等都具有良好的效果。文中实验采用了光栅对组成的 $4f$ 系统的单级染料放大器, 获得了高于 10^3 的放大倍率。

2 放大过程中的光谱变窄

在一个均匀展宽的放大介质中, 荧光谱线中心频率处的增益最大, 远离中心频率处的光谱成分所获得的增益逐渐减小。当外界引入一超短光脉冲, 这种短脉冲包含各种不同的频率成分, 它们均可获得增益, 但由于在均匀加宽介质中, 增益饱和作用使整个增益曲线范围内的总的反转粒子数减少, 增益曲线整体下降, 介质对各频率成分提供的增益都减小, 因此如果输入脉冲的中心频率也在其中心附近, 则脉冲谱带中心将获得最大增益, 边缘频率部分获得的增益相对来说就小得多, 这种不同频率成分的非均匀增益放大的结果导致放大后的脉冲谱带宽度变窄。这种现象如图 1 所示。

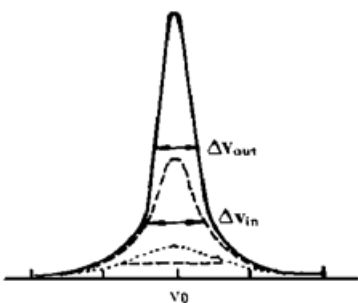


Fig. 1 Spectral narrowing after the pulse amplification

* 上海复旦大学物理系博士生, 上海 200433。

实际上不仅被放大的信号光脉冲有谱带变窄的效应, 染料中产生的放大的自发辐射谱带也随着泵浦光的增强而增大, 但其谱宽变窄。这种变窄除前所述荧光型所引起的非均匀增益因素之外, 染料放大器中随波长的变化, 各波长处的吸收截面、发射截面变化量的不同, 也是谱带变窄的一个原因^[5]。

3 具有空间色散的染料放大系统

由光学傅里叶变换可以知道, 谱带变窄, 脉冲的时间宽度就会增大, 因此峰值功率就难以提高, 这在超快过程的应用研究中是极为不利的, 因此尽可能地维持窄的脉宽和高的峰值功率是一个首要问题。对于一个被放大的信号脉冲, 则应保持对其脉冲中所有的频率都有大致相同的放大而无抑制机制, 为达此目的, 这里介绍一种引入空间色散的超短脉冲放大系统, 给出实验装置, 分析其特点, 报道实验结果。

3.1 实验装置原理图

如图 2 所示, G_1 、 G_2 为衍射光栅(600 l/mm); L_1 、 L_2 为柱面透镜 $f = 10$ cm; C 为染料盒; M_1 、 M_2 为平面反射镜。信号光脉冲从 M_1 输入, 经光栅 G_1 , 各种不同频率的光以不同的衍射角发射, 经柱面透镜 L 聚焦在染料盒的中心平面上。图中, 光栅、柱面透镜、染料盒的中心平面之间的距离均与柱面透镜的焦距 f 相同, 所以又称之为 $4f$ 系统。

如果忽略入射光的横截面的大小而将其视为一根光线, 则通过简单的几何光学计算即可得到染料盒中心各频率成分在空间分开的距离 b , 如图 3 所示。考虑中心波长 λ_0 与波长 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 的光都以 α_0 角入射到光栅 G_1 , 则 λ_0 的衍射角为 α_i , $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 的衍射角为 $\alpha'_i = \alpha_i + \Delta\alpha = \alpha_i + (\partial\alpha_i / \partial\lambda) \Delta\lambda$, 令 $\beta = \partial\alpha_i / \partial\lambda$ 为光栅的角色散率, 则两波长光波在染料盒中(即在放大区域中)的间距为

$$b = (\alpha'_i - \alpha_i)f = f\beta\Delta\lambda \quad (1)$$

可见, f 一定, β 可知, 对 b 是一个常数, 由此可以大致得出各频率光波在染料盒中被放大的

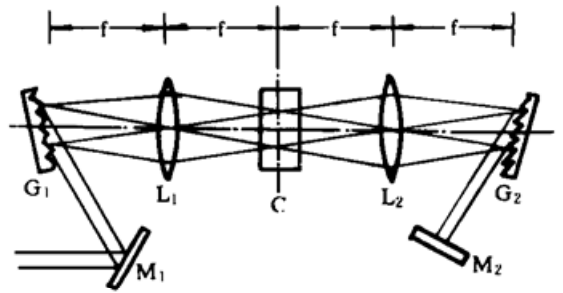


Fig. 2 Dye amplifier incorporating grating pair introducing spatial dispersion

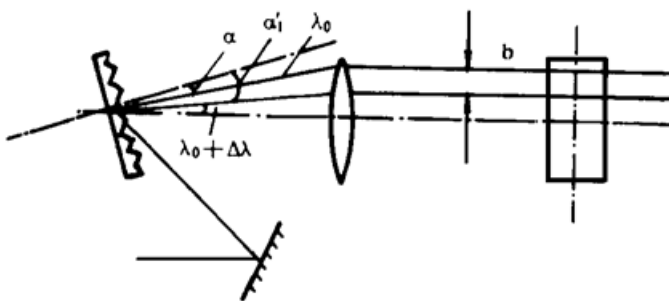


Fig. 3 Distances spatially dispersed for different frequency components

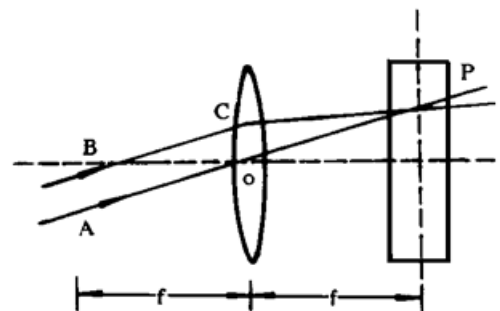


Fig. 4 Parallel rays are focused to the same point on the focal plane

位置, 也就可以知道被放大脉冲在空间散开的程度以及泵浦光应覆盖的范围。实际上, 对于一定直径的光束, 如果光束中心入射到光栅与系统光轴的交点, 则光束经光栅散射后, 每一种频率成分将以一束近似平行光束射向柱面透镜, 如图 4 所示, 光束中心线 AO 经过柱面镜的焦点, 这与前面所讨论的“光线”是一致的, 与焦平面交于 P 点, 光束其它光线 BC 则因其

平行光的特点以及经透镜成像的性质,将会聚于焦平面上同一点 P。由此可见,对于一定直径的光束,前面所作的近似讨论是合理的。

3.2 4f 系统的特点

由上述分析可知光脉冲经过这种光栅引入空间色散的 4f 系统后,各频率成分光线在染料盒中横向散开,因此泵浦光也必须复盖所有这些频率所占据的区域,所以这种空间色散的放大区域的面积要远大于多级串接式放大器的“泵线”面积,以便有利于被放大脉冲提取能量,而消除各频率成分之间的竞争机制,使得各频率成分都获得大致相同的放大。也就使得谱宽变窄现象不太明显。

其二,在空间色散的平面里,脉冲宽度被展宽,这是因为入射光经第一块光栅的色散到达染料盒中(即 L_1 的焦平面附近),脉宽将变为

$$\tau_s^2 = \tau_n^2 + \Gamma(\beta ak)^2 \quad (2)$$

式中 τ_n 为输入脉宽; $\beta = 2\pi cm / \omega_0^2 d \cos \alpha_0$ 为角色散率; a 为光束直径; k 为中心波长的波矢; Γ 为波型因子。(2) 式证明光栅将脉宽展宽了,而被放大的脉冲经由第二块光栅散射后,又被压缩回原来的脉冲宽度,因而整个放大系统并没有引入时间色散,放大后的脉冲宽度与输入脉宽相等,同时由(2) 式可以看出,这里所讨论的脉宽展开,是与输入光束的粗细直接相联系的,若作光线近似,则 $a = 0$, $\tau_n = \tau$, 并没有展开现象,因此,这种展宽,本质上只是空间展宽。由于放大过程中的脉宽增加,使得被放大信号峰值功率下降,从而有利于抑制增益饱和,有利于抽取能量,提高放大倍率,实验证明,这种放大器的放大率高于普通串接式单级放大器;其三,由于泵光的区域增大,泵浦功率密度下降,这就使得放大自发辐射小得多,从而使更多的泵浦能量被放大脉冲所抽取,提高了泵浦光的转换效率。

4 实验结果与分析

在本文的实验中,输入超短光脉冲为碰撞锁模(CPM)染料激光器输出的脉冲序列,其重复率为 100 MHz,放大器的泵浦源为 Q 开关 Nd:YAG 激光器,脉冲重复率为 1~5 Hz 可调。本文对光栅引入空间色散的放大器进行了大量的实验研究,并与多级串接式放大器做了比较,无论是在抑制放大的自发辐射的产生,提高放大器的增益以及防止脉冲展宽都具有良好的作用,是一种比较理想的超短脉冲放大装置。

4.1 抑制放大的自发辐射

在多级串接式放大器中,如何分配各级的泵浦能量,对于抑制放大的自发辐射和提高整体放大倍数是一个十分关键的问题,特别是抑制第一级的放大自发辐射尤为重要,因为第一级形成的放大的自发辐射在后几级中将会得到放大,并且与信号脉冲发生增益竞争,因此在多级串接式放大器中,第一级泵浦能量不宜过大,一般为 10 mJ,以后各级逐渐增大到 20 mJ, 50 mJ, 150 mJ, 这样来抑制放大的自发辐射逐级放大。而在本文所用的 4f 系统放大器中,当泵浦能量与串接式第一级的泵浦能量相同的情况下,放大的自发辐射的大小只是它的四分之一,这可通过在无信号输入的情况下观察示波器的强度幅值便可明显的反映出来。即使增大泵浦量,其增益获得增加,但放大的自发辐射却没有明显的变化。

4.2 放大倍数的测量

本文利用快速响应光电二极管和 hp1727A 存储示波器进行观测并拍照,为了保证光电二极管和示波器处于非饱和状态的线性工作范围区内,实验对待测的放大信号进行衰减,采

用这种方法进行多次观测, 其结果都是 $10^3 \sim 2 \times 10^3$ 倍。如输入碰撞锁模激光脉冲信号幅值为 80 mV (如图 5 所示), 放大后存储示波器的显示读数为 5.5 V (如图 6 所示), 插入衰减片的透过率为 10% 和 50% 共两片, 因此放大后的幅值应为 110 V, 这样放大倍率为 1375 倍, 应当指出, 这种观测并不十分精确, 但多次测量能反映放大倍数的量级在 10^3 倍。而对多级串接式放大器的实验观测发现, 除第一级的放大倍数为 200~300 倍左右外, 其余各级仅有 10~20 倍, 这个结果与国外所报道的结果相一致。采用串接式放大器产生的实验结果如图 7 (a)、图 7(b) 所示, 其中图 7(a) 是单级放大以后的脉冲波形, 幅值为 3 V, 考虑到衰减率, 实际为 28 V, 放大倍数为 350 倍, 图 7(b) 是两级放大后的脉冲波形, 放大倍数为 1000 倍左右, 显然放大倍数都不如 4f 系统的单级放大器, 同时从图中可以看出脉冲的两翼也宽得多。

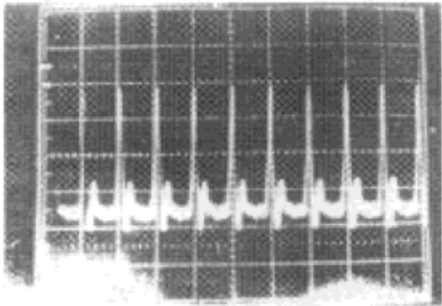


Fig. 5 The input laser pulse trace (20 mV/div)

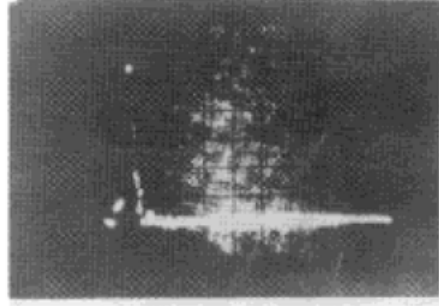


Fig. 6 The pulse shape after being amplified by the 4f system (1 V/div)

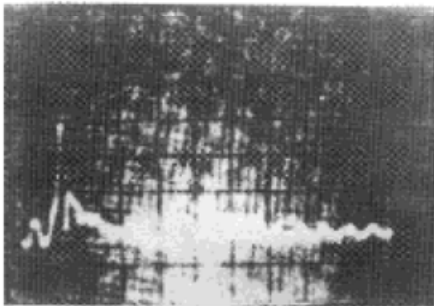


Fig. 7 (a) The pulse shape after the single stage (in series) amplification (1 V/div)

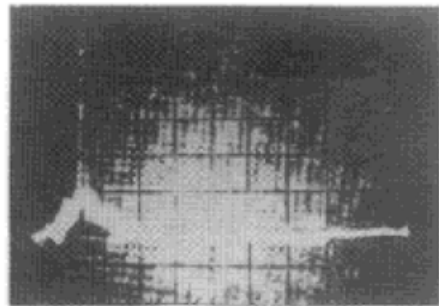


Fig. 7 (b) The pulse shape after two-stage (in series) amplification (1 V/div)

3.3 峰值功率

放大前的信号脉冲是输出 100 MHz 的序列脉冲, 平均功率 10 mW, 则可算出单个脉冲的能量为 0.1 nJ, 脉冲宽度为 90 fs, 则峰值功率为 1.1×10^3 W; 由于泵光为 Q 开关 Nd:YAG 激光倍频后产生的绿光, 其脉冲重复率 1~5 Hz 可调, 因此放大后的脉冲也是低重复率 1~5 Hz 可调。采用 LPE 型激光功率(能量)计, 测出每个脉冲的能量为 0.12 μ J, 放大后脉宽的测量值约 103 fs, 则峰值功率为 1.16×10^6 W, 其放大倍数亦为 10^3 倍, 与示波器观测的结果基本一致。上述实验结果表明, 利用光栅引入空间色散的放大器与串接式单级放大器相比, 所产生的增益要高得多。同时在实验中还发现, 由于本文所用的光栅衍射效率很低, 且泵光的模式也不很好, 如能进一步改善光栅的效率, 提高泵浦光的质量, 以获得良好的聚焦区域, 这种放大器的放大倍率将会进一步提高。以上是采用一个 4f 系统, 如果再加上一级 4f 系统进行放大, 预计会获得更加令人满意的结果。

结束语 本文讨论了低重复频率高放大倍率的超短脉冲染料放大器, 通过分析放大过程中光谱的变化, 研究了引入空间色散的放大结构, 对比实验结果, 可以知道单级具有空间色散的

放大器,产生的增益高于传统的单级放大器,但放大的自发辐射却很小,这是一种有前景的放大结构。目前碰撞锁模染料激光产生飞秒光脉冲已相当成熟,加上这种结构简单、调整方便、性能优良的放大器,将十分有效地促进超短脉冲应用的发展。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fork, B. I. Greene, C. V. Shank. Generation of optical pulses shorter than 0.1 ps by colliding pulse mode locking. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(9): 671~ 672
- [2] R. L. Fork, C. V. Shank, R. T. Yen. Amplification of 70 fs optical pulses to gigawatt powers. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(3): 223~ 225
- [3] 张晓天,朱鹤元,胡谊梅等.飞秒染料激光放大器.中国激光,1993, **20**(5): 326~ 329
- [4] W. H. Knox. Femtosecond optical pulse amplification. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(2): 388~ 397
- [5] J. Hebling, J. Kuhl. Generation of tunable femtosecond pulses by traveling wave amplification. *Opt. Commun.*, 1989, **73**(5): 375~ 379
- [6] S. Dinev, G. G. Paulus, W. Niehlich *et al.*. Dispersion-free amplification of femtosecond dye-laser pulses. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(18): 1298~ 1230

Ultrashort Pulse Amplification with Spatial Dispersion

Xiang Wanhua Wu Tao Zhang Guizhong Wang Qingyue

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 6 July 1995; revised 25 December 1995)

Abstract In this article, the behaviors of the suppression of spectral narrowing, gain saturation and reduction of amplified spontaneous emission (ASE) are analysed in the case of a grating pair which is used to introduce spatial dispersion in the ultrashort pulse amplifier. The gain factor greater than 10^3 was obtained experimentally with a 4-*f* system single-stage dye amplifier.

Key words ultrashort optical pulse, gain saturation, amplified spontaneous emission (ASE).