

宽谱带飞秒激光超连续谱特性的研究*

张伟力 章若冰 王清月

天津大学精密仪器工程系, 天津 300072

1993 年 3 月 3 日收到

利用高增益、低色散飞秒激光放大器研究了多种非线性介质的超连续谱特性, 获得宽谱带飞秒激光超连续谱.

PACC: 4280W; 4260F

一、引 言

飞秒光脉冲经过放大后可获得高于 10^5 增益, 聚焦后的峰值功率密度高达 10^{13} — 10^{15} W/cm², 因而在介质内传输过程中会表现出十分显著的非线性效应, 如自相位调制、自聚焦效应、四光子参量混频等. 飞秒光脉冲与某些介质的非线性相互作用将表现为强烈的自相位调制效应, 由此产生超连续激光脉冲, 谱带从可见光一直扩展到紫外光和红外光.

高重复率飞秒激光超连续谱是近年来发展起来的一种超快激光研究手段, 广泛应用于多种学科微观动力学过程和非线性光谱学的研究. 据文献报道, 1984 年 Knox 首次实现了高重复率飞秒光脉冲放大, 获得单脉冲能量为 1 μ J 的飞秒光脉冲, 将其聚焦在乙二醇喷流上, 获得高重复率飞秒激光超连续谱^[1]. 1988 年, Kryukov 等人将 0.5 μ J 飞秒光脉冲聚焦在 200 μ m 厚的乙二醇喷流上, 获得 380—720 nm 飞秒激光超连续谱^[2]. 随后, 在超快激光领域人们相继开展了该项研究.

本文在对飞秒激光放大过程进行系统的理论与实验研究基础上, 利用高增益、低色散、高光束质量飞秒激光放大系统, 在多种非线性介质上实现了宽谱带飞秒激光超连续谱.

二、实验描述

实验系统如图 1 所示, 由飞秒激光器、铜蒸汽激光器(CVL)、飞秒激光放大器及超连续谱产生器部分组成.

飞秒激光振荡器为 CPM 染料激光器, 输出 48 fs 光脉冲, 中心波长为 614 nm, 单脉冲能量为 3×10^{-11} J. CVL 用作放大器抽运源, 输出谱线为 510 和 578 nm. 在本实验中 CVL 平均输出功率为 3 W, 运转于 5 kHz 重复率. 利用双胶透镜将 CVL 光束聚焦, 在放大介质上焦斑直径约为 1 mm. 为获得理想的放大结果, CVL 脉冲宽度通常调节至 10 ns. 放大器为单级多通式, 采用两个曲率半径分别为 24 和 30 cm 的球面镜组成共焦腔结构.

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目.

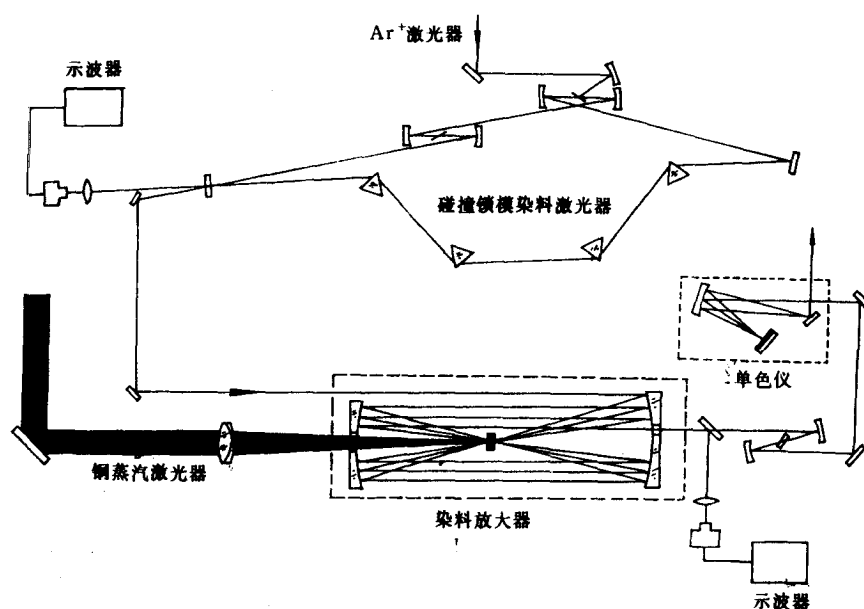


图1 飞秒激光超连续谱实验装置

光脉冲六次经过放大介质实现放大,随放大次数增加,放大介质处焦斑面积以 $(R_2/R_1)^2$ 倍率增大,其中 $R_2 > R_1$,从而有效地抑制增益饱和效应。镜面镀金属膜,用以克服镀膜介质膜引入的色散^[3]。放大介质为SR640乙醇溶液,以2 mm厚开放式石英染料盒取代以往的喷流,使得放大光脉冲获得 2.6×10^5 高增益和良好的光束质量。染料浓度为 5×10^{-4} M。

放大的飞秒光脉冲用曲率半径为5 cm的球面镜聚焦在非线性介质上,焦斑直径为10 μ m。非线性介质五维可调,以获得最佳状态。超连续光脉冲经透镜准直后,由镀铝反射镜引入测量系统。本文测量装置采用光栅单色仪及相应的光电倍增管,所用光栅闪耀波长分别为250 nm和1 μ m。在测量时,考虑了光栅二、三级衍射对测量结果的影响,并用棱镜单色仪进行了比较。

三、实验结果与分析

将2 μ J, 50 fs放大的飞秒光脉冲聚焦在厚度为3 mm的K9玻璃上,焦点峰值功率密度高达 5×10^{13} W/cm²,远高于 10^{12} W/cm²的超连续谱阈值。图2为K9玻璃超连续光谱实验曲线,光谱中心强度为614 nm,即入射飞秒光脉冲中心波长,光谱强度从中心向两侧平缓减弱。利用衍射光栅将光谱散开,在白色光屏上可清晰地看到从紫色一直到暗红色的可见光光谱。同时还获得了3 mm石英,3 mm乙二醇和1 mm乙二醇等介质的飞秒激光超连续谱,如图3至图5所示。

比较上述四种不同介质,1和3 mm乙二醇为不同厚度的同一介质,由于1 mm乙二醇光作用距离短,在相同的入射条件下,超连续谱阈值高于3 mm乙二醇。3 mm石英, K9玻璃和乙二醇为同一厚度的不同介质,具有不同的非线性折射率系数 n_2 ,因此,在相同入射条件下超连续谱阈值随 n_2 增大而降低。K9玻璃和石英为固体介质,强光热效应在一定程度上影响超连续谱稳定性,而且在K9玻璃焦点处留下了永久性黑化斑,而流动的乙二

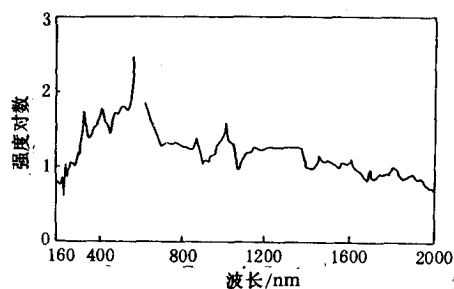


图2 3 mm K9 玻璃超连续谱实验曲线

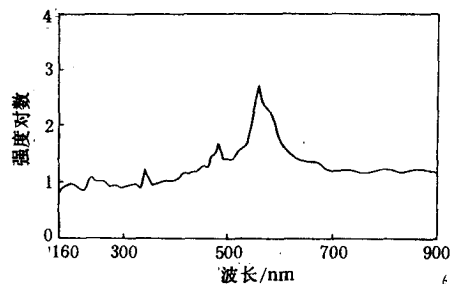


图3 3 mm 石英超连续谱实验曲线

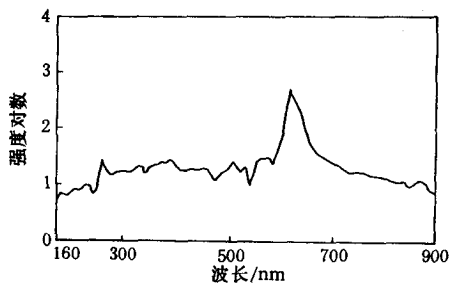


图4 3 mm 乙二醇超连续谱实验曲线

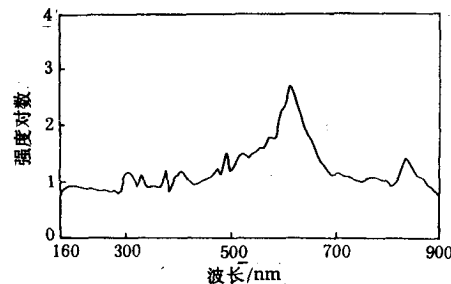


图5 1 mm 乙二醇超连续谱实验曲线

醇介质则缓解了强光热效应,超连续谱稳定性好.

实验结果表明,飞秒激光放大器多种参数直接影响超连续光谱的产生,低色散、高增益飞秒激光放大器是获得宽谱带超连续谱的关键.首先,放大器主要光学元件镀金属膜以减小系统色散量,使得放大光脉冲宽度相对信号光的展宽小于 10 fs,从而放大光脉冲无需腔外压缩,直接进入超连续谱实验.这样既提高了系统的峰值功率,又避免了再压缩引入的繁多光学元件及随之带来的能量损耗.其次,放大自发辐射(ASE)严重影响放大增益并造成极强的背景光.利用 ASE 空间发散特性,在放大器中插入空间滤波器,调节其位置和口径,能够有效地抑制 ASE 的影响.此外,以开放式染料盒取代喷流并选择适当厚度和染料浓度,使得放大增益和放大器光束质量得到明显改善.同时,放大介质溶剂及 CVL 脉宽的合理选择将有效提高放大增益.

1970 年 Alfano 等人实验获得了皮秒超连续谱,随后,Penzkofer 等人用参量四光子相互作用理论解释了这一现象^[4].随飞秒光脉冲的产生,1983 年 Fork 首次实现了 10 Hz 低重复率飞秒白光连续谱^[5].实验研究发现,从时间、空间和光谱特性三方面都表明自相位调制效应是产生飞秒超连续谱的主要机制.该方面的理论计算尚未见报道.本文利用自相位调制效应作为产生飞秒超连续谱的机制,对此进行了初步的理论计算,并与实验结果作了比较.

$$\text{若放大的飞秒光脉冲光场为 } E(t, z) = \epsilon(t, z) \exp[i(\omega_0 t - k_0 z)], \quad (1)$$

$$\text{则强光作用下,介质折射率变化为 } \delta n(t, z) = \frac{1}{2} n_2 \epsilon^2(t, z), \quad (2)$$

式中 n_2 为非线性折射率系数.假设光在介质中经过 dz 距离,则脉冲各部位引起的附加相

$$\text{位为} \quad \delta\phi(t) = k_0 dz \delta n(t). \quad (3)$$

经坐标变换, $t' = t - \frac{z}{c} n_0$, $z' = z$, (1)式可写为

$$E(t', z) = \epsilon(t', z) \exp\{i[\omega_0 t' + \phi(t', z)]\}, \quad (4)$$

$\phi(t', z)$ 为经过 dz 之前光脉冲的相位, 经 dz 后,

$$E(t', z + dz) = \epsilon(t', z) \exp\{i[\omega_0 t' + \phi(t', z) - \delta\phi(t', dz)]\}, \quad (5)$$

$$\text{式中附加相位为} \quad \delta\phi(t', dz) = \frac{1}{2c} \omega_0 n_2 dz \epsilon^2(t', z). \quad (6)$$

图 6 为利用计算机模拟方式获得的石英介质飞秒激光超连续谱, 入射光为 $2 \mu\text{J}$, 50 fs 放大的光脉冲, 石英厚度为 3 mm . 与实验结果相比, 曲线精细结构稍有不同. 因为在强光作用下, 除自相位调制效应以外, 其他非线性效应, 如自聚焦效应、四光子参量混频等都参与超连续谱的产生. 因此, 飞秒激光超连续谱形成机理需要考虑到其他非线性效应的影响, 有待于进一步的研究.

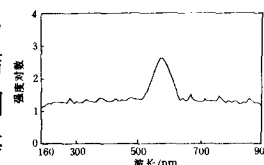


图 6 3 mm 石英超连续谱
计算模拟曲线

与邓道群、周寿桓同志作过有益的讨论, 谨此致谢.

- [1] W. H. Knox, M. C. Downer, R. L. Fork and C. V. Shank, *Opt. Lett.*, **9**(1984), 552.
- [2] I. V. Kryukov, P. G. Kryukov, E. V. Khoroshilov and A. V. Sharkov, *Sov. J. Quantum Electron.*, **18**(1988), 830.
- [3] 章若冰、张伟力、王清月、周乃序, *光学学报*, **13**(1993), 199.
- [4] A. Penzkofer, W. Kaiser, *Optical and Quantum Electron.*, **9**(1977), 315.
- [5] R. L. Fork, C. V. Shank, C. Hirlimann and R. Yen, *Opt. Lett.*, **8**(1983), 1.

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF WIDE-BAND FEMTOSECOND LASER SUPERCONTINUUM

ZHANG WEI-LI ZHANG RUO-BING WANG QING-YUE

Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072

(Received 3 March 1993)

ABSTRACT

The characteristics of supercontinuum in various nonlinear materials has been investigated with high-gain, Low-dispersion femtosecond amplifier. The wide-band femtosecond laser supercontinuum has been obtained.

PACC: 4280W; 4260F