

光谱分辨条纹相机测量高能啁啾脉冲特性^{*}

谢旭东[†] 王 道 朱启华 曾小明 王凤蕊 黄小军 周凯南 王 方
蒋东镇 黄 征 孙 立 刘 华 王晓东 邓 武 郭 仪 张小民

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理国家级重点实验室 绵阳 621900)

(2007 年 1 月 13 日收到 2007 年 2 月 8 日收到修改稿)

实验演示了光谱分辨条纹相机法测量高能啁啾脉冲特性, 该方法不仅可以用于测量纳秒量级的放大啁啾脉冲, 还可以实时监测压缩器的调节. 通过实验证实百焦耳 PW 演示平台输出的百焦耳量级的纳秒啁啾脉冲具有可压缩性.

关键词: 光谱分辨条纹相机, 啁啾脉冲, 纳秒脉冲

PACC: 4260

1. 引 言

近年来用啁啾脉冲放大技术(chirped pulse amplification, CPA)获得高能量的途径很多, 而钽玻璃系统成功地将 CPA 激光能量提升到数焦耳, 美国劳伦斯利弗莫尔实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)成功地演示了用钽玻璃放大器系统产生 1.5 PW (10^{15} W) 激光脉冲^[1]. 高能 PW 激光可用于射线照相、快点火研究和高能量密度物理学研究等, 目前国际上美、法、日、英、德等国家正在开展高能拍瓦激光装置的研制工作. 与钛宝石系统相比^[2,3], 钽玻璃最具吸引力的优点是其光学质量好, 口径大, 放大脉冲的能量可以高达数千焦耳. 但是其荧光带宽仅有 20—30 nm, 放大过程中钽玻璃有限增益带宽和增益窄化效应的影响相当严重^[4-7], 要产生能量上千焦耳脉宽 1 ps 以下的压缩脉冲仍然具有相当的难度. 因此对放大啁啾脉冲特性的测量有助于深入了解宽带高能激光放大动力学过程, 优化放大系统设计, 获得脉冲宽度更窄的高能激光脉冲. 但是目前测量激光脉冲参数的方法不适用于纳秒尺度的啁啾脉冲, 如 FROG(frequency-resolved optical gating)^[8], SPIDER(spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction)^[9]仅适用于飞秒脉冲, 自相关仪的测量范围最多到皮秒量级, 电子采样

示波器能测量纳秒脉冲却不能反映脉冲的啁啾特性. 我们以掺钽磷酸盐玻璃为增益介质开展了百焦耳 PW 演示研究工作, 目标是产生能量大于百焦耳脉宽约 1 ps 的激光脉冲. 为了深入认识啁啾脉冲放大特性, 预先验证啁啾放大脉冲的压缩特性, 提出光谱分辨条纹相机测量啁啾放大脉冲特性的方法. 赋予传统的条纹相机以光谱分辨本领, 仅从条纹相机输出的一幅条纹图就可以同时获得被测啁啾脉冲的时间与光谱特性以及两者间的关系即啁啾特性. 条纹相机具有皮秒量级的时间分辨率, 使得它不仅可以测量纳秒尺度啁啾脉冲的特性, 也适用于压缩后的皮秒脉冲, 成为实时监测压缩器调节的手段.

2. 测量原理

众所周知光脉冲在色散介质内以群速度传输, 经过色散介质后脉冲不同光谱成分具有不同的群延迟(group delay), 即表现出啁啾特性. 将其群延迟函数在中心频率处按 Taylor 级数展开

$$T_g(\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \frac{\partial^i T}{\partial \omega^i} \bigg|_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^i, \quad (1)$$

$\partial T_g(\omega_0) / \partial \omega$ 是光谱的群延迟色散, 为了能将啁啾脉冲压缩回傅里叶变换极限, 其群延迟色散必须在脉冲带宽内为零即群延迟是常数.

条纹相机的工作原理是利用高速扫描实现时间

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)批准号 2006AA84502 资助的课题.

[†] E-mail: xiexudong76@yahoo.com.cn

与空间变换,当入射激光脉冲经过条纹相机的狭缝由透镜聚焦到条纹管的光阴极上,打出光电子,经过加速的光电子进入条纹相机偏转场中的电极之间,高速线性偏转电压使不同时刻进入的光电子在上下方向发生不同程度的偏转,偏转电子经过微通道倍增后,轰击到荧光屏上,产生与狭缝方向平行的条纹.电子的偏转与它通过偏转电极时的瞬间偏转电压成正比,因此,脉冲的时间分布就被转换成条纹相的空间分布.条纹的空间宽度就代表了脉冲的时间宽度.当入射脉冲为宽带啁啾脉冲时,先用衍射光栅将光谱成分在空间分离,再通过透镜成像到条纹相

机的狭缝上,此时不同的光谱成分在空间沿狭缝方向分布,如图 1 中 x 方向,实现光谱分辨.介质色散使脉冲具有正啁啾,短波成分比长波成分经历更多的群延迟,其前沿是长波后沿是短波.不同时刻进入条纹相机狭缝的频谱成分在相空间偏转的角度不同,产生一条与狭缝成一定角度的条纹图,这就是光谱分辨条纹图.其沿狭缝方向(图 1 中 x 轴)表示不同的光谱成分,偏转方向(图 1 中 y 轴)表示不同光谱成分之间的群延迟.条纹图包含了被测啁啾脉冲的光谱信息、脉冲宽度信息和啁啾信息.

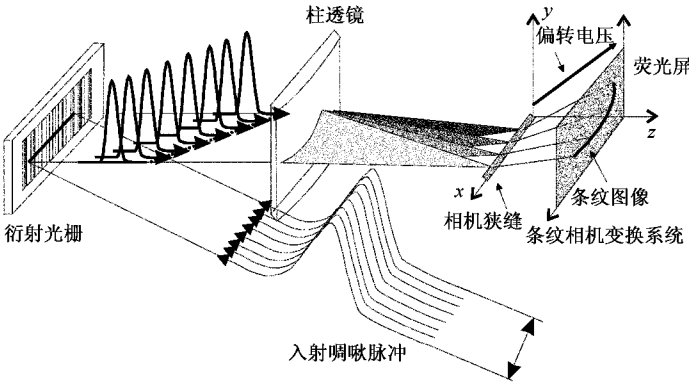


图 1 光谱分辨条纹相机原理

3. 实验及分析

我们利用光谱分辨条纹相机法在 PW 验证平台上开展了测试实验,该装置的目标是产生能量大于 100 J 脉宽约 1 ps 的激光脉冲,采用了超连续注入的 OPA(optical parametric amplification)技术产生 1054 nm 的飞秒种子^[10],单透镜单光栅大展宽量的展宽器将飞秒种子展宽到纳秒量级^[11],放大器增益介质是国产 N31 掺钕磷酸盐玻璃,预放大级采用数级棒状放大器^[12],主放大级采用原星光 II 的大口径片状放大器.受展宽器带宽的限制,注入到放大器的激光是带宽约 8 nm 脉冲宽度 2 ns 左右的啁啾脉冲.放大后的数百焦耳的啁啾脉冲由压缩器压缩回皮秒量级.目前装置正处于联机调试中,它能输出能量超过百焦耳的纳秒啁啾脉冲.

放大器输出的啁啾脉冲经过光栅衍射,其包含的频谱成分具有不同的衍射传输角度,通过透镜聚焦成一条焦线,与条纹相机水平方向狭缝重合.条纹相机的光学系统将狭缝成像到光阴极.光阴极被激

光轰出的光电子最终转换成荧光屏上的条纹像.图 2 是用 CCD 数据采集系统获取的光谱分辨条纹像.垂直方向是条纹相机的偏转电压所致光电子偏转方向,也就是时间扫描方向,从上往下扫描,脉冲前沿出现在图像的上部,后沿在下部.水平方向是光谱分布方向,左端是长波,右端是短波.

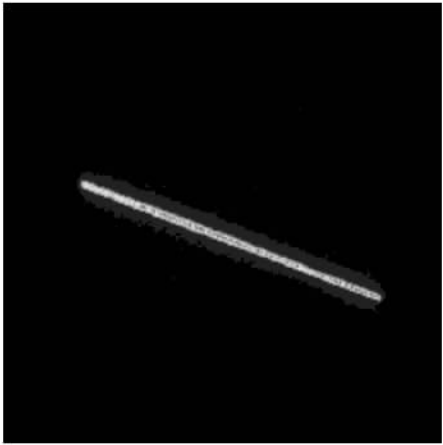


图 2 光谱分辨条纹图

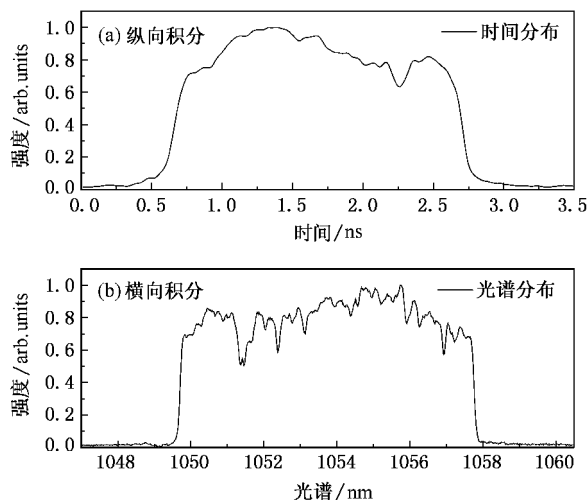


图3 条纹图提取的时间与光谱信息

条纹图表征了啁啾脉冲不同时间片对应的光谱分布. 不仅如此, 对图像沿纵轴积分, 相当于将沿条纹相机狭缝空间分开的光谱成分合并到狭缝上一点, 这就是条纹相机的通常用法, 得到啁啾脉冲的时间分布, 如图 3(a) 所示. 对图像沿横轴积分, 相当于条纹相机未加偏转扫描电压, 等效为一台光谱仪, 得到啁啾脉冲的光谱分布, 如图 3(b) 所示. 利用条纹相机时间分辨率高的特点, 从条纹图中可看出脉冲的啁啾特性, 即光谱成分随时间的变化情况. 图 2 中沿着条纹从左上到右下时间增加, 脉冲的光谱成分从长波平滑过渡到短波(相对于 1054 nm 的中心波长). 脉冲主要表现出线性啁啾, 放大后的脉冲具有可压缩性. 它也可以用于测量压缩后的啁啾脉冲. 如果光栅压缩器提供的负色散刚好抵消啁啾脉冲的正色散, 脉冲将被压缩至傅里叶变换极限, 条纹图将是平行于狭缝方向即横向的一条细线, 可以用来实时监测指导压缩器的调节. 衍射光栅的角色散会造成被测量啁啾脉冲的波前倾斜 (wavefront tilt)^[13], 等效于条纹图与光谱轴(水平轴)有一个倾斜角, 在数据处理时可以通过计算将其消除. 压缩皮秒脉冲, 关心其带宽内的群延迟就足够了, 而条纹相机的分辨率也决定了其不能反映高阶啁啾, 因此它能反映纳秒量级啁啾脉冲的线性特性.

条纹相机的时间分辨率高, 加上其光谱分辨能力, 使得我们可以更方便地发现啁啾脉冲放大过程中的一些细节. 图 4 是在全系统发射时获得的条纹图, 出现的沿纵向的亮点是放大器自激振荡产生的激光. 自激激光与主激光的区别非常明显, 这是常规方法办不到的. 自激激光的光谱在中心波长附近, 这

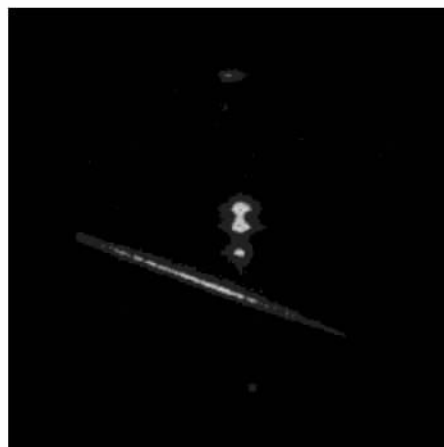


图4 自激现象

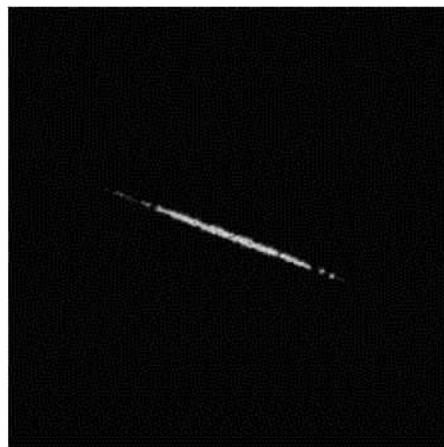


图5 全系统工作光谱变窄

是因为它获得更高的增益. 自激的存在, 造成宽带啁啾脉冲得不到充分放大, 指导我们增加了系统的隔离措施.

通过实验我们发现当几十微焦的种子光被放大到接近百焦耳时, 其光谱从最初的约 8 nm 带宽下降到 4 nm 左右, 而脉冲宽度也从 2 ns 变到 1 ns 左右. 放大过程的增益窄化效应非常明显, 比较图 5 和图 2 可以直观地看出光谱变窄现象. 从图中还可以看出光谱变窄与脉冲宽度变短的关系, 由于放大过程中增益窄化效应造成啁啾脉冲两翼的光谱变弱, 相当于在时间上被削波造成脉冲宽度变短. 随光谱窄化产生的啁啾脉冲宽度变窄现象不利于充分提取放大器增益介质内的存能, 严重时短脉冲诱发的强烈非线性效应还会造成光学元件的损坏, 更重要的是为了在压缩后获得皮秒甚至亚皮秒的短脉冲, 必须采取光谱补偿措施控制放大过程中光谱窄化效应.

4. 结 论

通过实验演示了光谱分辩条纹相机法用于啁啾脉冲特性测量,为深入认识高能宽带啁啾脉冲放大过程提供了有效的方法,指导我们对放大系统改造

完善,测量结果表明放大器输出的百焦耳量级的纳秒脉冲呈线性啁啾,脉冲具有可压缩性.该方法为压缩器的粗调提供了直观指导,用单次自相关仪测量的结果表明系统输出的脉冲可以被压缩到 1 ps 以下.

[1] Perry M ,Pennington D ,Stuart B ,Tietbohl G ,Britten J ,Brown C ,Herman S ,Golick B ,Kartz M ,Miller J ,Powell H ,Vergino M ,Yanovsky V 1999 *Opt. Lett.* **24** 160

[2] Lu X Q ,Fan D Y ,Qian L J 2002 *Acta Optica . Sinica* **22** 1060 (in Chinese)[卢兴强、范滇元、钱列加 2002 光学学报 **22** 1060]

[3] Cao D M ,Wei Z Y ,Teng H ,Xia J F ,Zhang J ,Hou X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1202 (in Chinese)[曹东茂、魏志义、滕 浩、夏江帆、张 杰、候 洵 2000 物理学报 **49** 1202]

[4] Yang J J ,Ruan S C ,Hou X 1999 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 165 (in Chinese)[杨建军、阮双琛、候 洵 1999 强激光与粒子束 **11** 165]

[5] Li C D ,Zhang Z Q ,Xu Z Z 1996 *Acta Optica . Sinica* **16** 299 (in Chinese)[李传东、张正泉、徐至展 1996 光学学报 **16** 299]

[6] Zhao S H ,Wang Y S ,Chen G F ,Wang X H ,Hou X 1997 *Acta Photonica . Sinica* **26** 197 (in Chinese)[赵尚弘、王屹山、陈国夫、王贤华、候 洵 1997 光子学报 **26** 197]

[7] Liu L Q ,Peng H S ,Wei X F ,Zhu Q H ,Huang X J ,Wang F D ,Zhou K N ,Zeng X M ,Wang X ,Guo Y ,Yuan X D ,Peng Z T ,Tang X D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2764 (in Chinese)[刘兰琴、彭翰生、魏晓峰、朱启华、黄小军、王晓东、周凯南、曾小明、王 逍、郭仪、袁晓东、彭志涛、唐晓东 2005 物理学报 **54** 2764]

[8] Trebino R ,DeLong K ,Fittinghoff D ,Sweetser J ,Krumbügel M ,Richman B ,Kane D 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 3277

[9] Iaconis C ,Walmsley I A 1999 *IEEE. J. Quantum Electrons.* **35** 501

[10] Zhang X M ,Fan D Y ,Zeng X M ,Wei X F ,Huang X J ,Zhu Q H ,Qian L J 2006 *Opt. Lett.* **31** 646

[11] Wang X ,Zhu Q H ,Lin D H ,Huang X J ,Zeng X M ,Zhou K N ,Wang F ,Jiang D B ,Xu B ,Liu L Q ,Xie X D ,Wang X D ,Guo Y 2006 *Chinese. J. Lasers* **33** 895 (in Chinese)[王 逍、朱启华、林东晖、黄小军、曾小明、周凯南、王 方、蒋东镔、徐 冰、刘兰琴、谢旭东、王晓东、郭 仪 2006 中国激光 **33** 895]

[12] Chen Y B ,Yuan X D ,Guo L F ,Zhang J B ,Wang Y F ,Li D M ,Chen D H ,Wang X D 2000 *High Power Laser and Particle Beams* **12** 158 (in Chinese)[陈远斌、袁晓东、郭良福、张建波、王一菲、李冬梅、陈德怀、王晓东 2000 强激光与粒子束 **12** 158]

[13] Bor Z ,Rácz B ,Szabó G ,Hilbert M ,Hazim H 1993 *Optical Engineering* **32** 2501

High energy chirped pulse characteristics observed by spectral-resolved streak camera^{*}

Xie Xu-Dong[†] Wang Xiao Zhu Qi-Hua Zeng Xiao-Ming Wang Feng-Rui Huang Xiao-Jun

Zhou Kai-Nan Wang Fang Jiang Dong-Bin Huang Zheng Sun Li Liu Hua

Wang Xiao-Dong Deng Wu Guo Yi Zhang Xiao-Min

(*National Key laboratory of laser Fusion ,Laser Fusion Research Center ,CAEP ,Mianyang 621900 ,China*)

(Received 13 January 2007 ; revised manuscript received 8 February 2007)

Abstract

We observed the characteristics of high energy nanosecond chirped pulse by spectral-resolved streak camera ,which works well with energetic chirped pulse of nanosecond pulse duration. At the same time ,it can monitor the alignment of grating compressor. The measurement results show that the pulse generated by PW demonstration facility is linearly chirped ,verifying the compressibility of amplified nanosecond pulse.

Keywords : spectral-resolved streak camera , chirped pulse , nanosecond pulse

PACC : 4260

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA84502).

[†] E-mail :xiexudong76@yahoo.com.cn