

基于振荡源XeCl准分子激光的变焦辐照技术研究

朱永祥 赵学庆 胡 云 王大辉 张永生

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 在直接驱动激光聚变中,变焦辐照可使得激光焦斑随聚变靶丸缩小,可增大激光与靶的能量耦合效率。基于像传递技术并利用电光削波开关中的检偏棱镜同时实现光脉冲的分束与波形分割,这种方式可充分利用脉冲激光能量,可有多种光束分割形式,并具备脉冲整形的能力。在实验室实现了XeCl准分子激光3台阶变焦辐照,以条纹相机记录了焦斑变化过程。实验结果表明,电光削波开关中电光晶体驱动电压的前沿陡度直接影响到变焦台阶之间的边界陡度。

关键词 激光光学;变焦辐照;电光削波开关;普克尔盒;XeCl准分子激光;像传递

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0502010

Research on Focus Zooming by Oscillator XeCl Excimer Laser

Zhu Yongxiang Zhao Xueqing Hu Yun Wang Dahui Zhang Yongsheng

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract In direct-drive laser fusion, the laser-target coupling efficiency can be enhanced and therefore the necessary driving laser energy can be reduced if the laser spot is zoomed with the target during implosion. A focal zooming is realized by image relay, in which the laser pulse is separated and split by the prism in an optical switch. By this scheme, the laser energy would not be wasted and that some multiple splitting ways and pulse shaping become possible. A three-stage focus zooming system of XeCl laser is established and the zooming process is recorded by a streak camera. The experimental results suggest that the edge gradient between the stages is determined by that of the driving pulse for the Pockels cell in the switch.

Key words laser optics; focal zooming; electro-optical switch; Pockels cell; XeCl excimer laser; image relay

OCIS codes 140.2180; 140.3300

1 引 言

直接驱动激光聚变是实现高增益惯性约束聚变(ICF)的备选方案,其中激光与靶的耦合效率是影响增益的关键因素之一^[1-11]。变焦技术的使用,即激光焦斑随靶球内爆压缩而减小,可显著提高激光与靶的耦合效率^[5-6,9-10,12]。高功率准分子激光具有波长短、带宽大、光斑均匀等特点,是一种优质的直接驱动ICF光源^[1,12-18],并且准分子激光装置一般采用像传递技术,可便捷地应用变焦技术^[19-20]。以2台阶变焦为例,先将光脉冲分束为独立的两路,各路均具有电光(EO)削波开关及特定的物孔,削波开关使得光脉冲的前后两部分在不同光路被依次选通,即相当于脉冲的不同部分通过大小不同的物孔,在合束后的脉冲光经聚焦透镜成像时,物孔的像也将在脉冲时间发生变化。美国海军实验室Kehne等^[20]报道了在准分子KrF激光Nike装置上开展的变焦辐照实验,该实验采用“先分束、后切割波形”的技术路线,实现了两台阶变焦辐照,这种切割脉冲波形的方法会导致被分割的子束波形之间没有关联,容易导致合束后的波形失真。

设计了一种借助电光削波开关中偏振棱镜直接分束并切割波形的变焦辐照方案,在实验室利用振荡源

收稿日期: 2014-11-06; 收到修改稿日期: 2015-01-26

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验基金(SKLLIM1006-1,SKLLIM1305)

作者简介: 朱永祥(1979—),男,博士,助理研究员,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: zhuyongxiang@hint.ac.cn

XeCl准分子激光实验演示了3台阶变焦辐照,以条纹相机记录了激光脉冲放大前后的焦斑变化过程,讨论了与变焦辐照相关的约束条件以及该方案在脉冲整形等方面的潜在应用。

2 变焦辐照方案设计

图1为3台阶变焦辐照中波形分割和分束部分的原理图。其中,纳秒量级激光脉冲从左向右传播至电光削波开关(图中虚线框部分),当脉冲后1/3部分入射时在普克尔盒上施加半波电压,使后1/3部分光偏振方向旋转 90° ,由于起偏棱镜(P)和检偏棱镜偏振方向垂直,脉冲的前2/3部分被检偏棱镜反射进入第2路光,而后1/3部分透射进入第1路光路。第2路光经全反镜入射至第二套电光削波开关,该开关的检偏棱镜偏振方向与第一套电光削波开关起偏器偏振方向垂直,类似地,当脉冲的前半部分已经透过第二个普克尔盒时,给普克尔盒施加半波电压,光脉冲后半部分的偏振方向旋转 90° ,脉冲的后半部分进入第2路,而前半部分被检偏棱镜反射成为第3路光,从而同时实现了光脉冲的分束与波形分割。

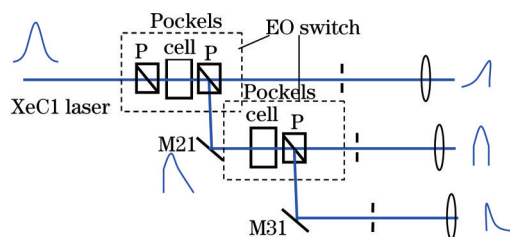


图1 电光削波开关检偏棱镜直接切割波形并分光的原理图

Fig.1 Scheme depicting direct division of laser pulse by EO switches

在各子光路中使用不同孔径的光阑作为物孔,物孔置于各自透镜的前焦面上,且物孔直径不大于光斑尺寸,被入射激光完全辐照。当3束光合束并经透镜聚焦时,根据成像关系,脉冲的不同部分对应的焦斑不同,因此可在透镜焦点上获得焦斑随时间呈三台阶变化的变焦过程。

在图1所示的波形分割和分束原理基础上,设计了实现三台阶变焦辐照原理性实验方案,如图2所示。为保证三路光在分束-合束过程中满足等光程条件,采用了反射式对镜以便于调节光程;如果不采用等光程结构,则相当于引入了各分束之间的光程差,合束后的光脉冲相对于原脉冲将波形失真。在合束的过程中,借助第二路光和第三路光偏振态相互垂直的特性,可以用偏振棱镜实现合束。在各路光没有能量损失或相等比例损耗的前提下,由于各路光等光程,合束的光脉冲波形可恢复为原波形。

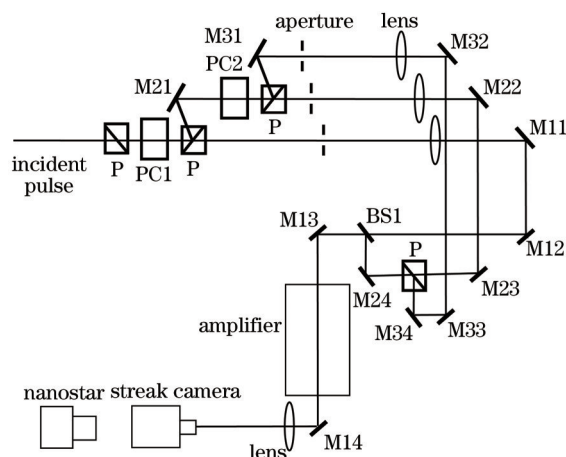


图2 实现三台阶变焦辐照的实验布局图

Fig.2 Experimental setup for achieving three-stage focal zooming

合束后的光脉冲经聚焦透镜成像,在其焦点处即为物孔的像。由于合束的光脉冲已经包含了与时间相关的物孔信息,因此在透镜焦面上将获得变焦辐照。将条纹相机狭缝置于焦斑中心,在激光与相机精密同步的条件下即可在条纹相机的荧光屏上获得随时间变化的一维光斑像。为考察激光能量放大对变焦辐照的影响,在经透镜成像前还经过了激光放大器能量放大。

3 变焦辐照原理性实验

按照图2所示的布局图,开展了三台阶变焦辐照原理性实验。其中入射光为Complex EI XeCl激光,输出激光波长为308 nm,脉宽为6.5 ns,单脉冲能量为4 mJ,光束发散角为5 mrad;实验中两个电光削波开关曾被用来实现电光削波^[20-22],其中普克尔盒电光晶体为K*DP晶体,晶体半波电压为3.12 kV,晶体充放电时间为0.15 ns,脉宽分别为10 ns和5.5 ns,下降沿时间分别为2 ns和0.9 ns;起偏和检偏棱镜为BBO晶体格兰-泰勒棱镜;激光放大器为PHOTON-1装置,增益的时间宽度为100 ns;条纹相机为中科院西安光学精密机械研究所研制的ZW-III型条纹相机,狭缝宽度连续可调,实验中狭缝宽度为50 μm,光谱响应范围170~800 nm,采用的档位为每满屏15 ns,最小时间分辨率优于0.5 ns;实验中以Nanostar相机记录条纹相机荧光信号;3个物孔直径分别为5.9、4.6、3.1 mm,物方透镜焦距和成像透镜焦距均为2.7 m。

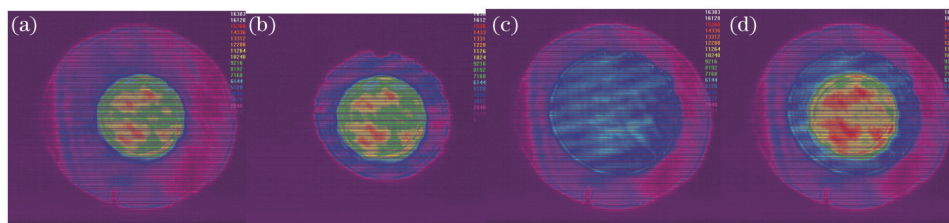


图3 LBA测量的未经能量放大的激光焦斑相互叠加结果

Fig.3 Time-integrated images of focal spots before being amplified recorded by LBA

由于条纹相机不能给出焦斑的二维信息,因此先用激光光斑分析仪(LBA)测量记录了激光焦斑形状,如图3所示。其中图3(a)~(c)分别给出了第1路光(小光斑)和第3路光(大光斑)、第1路光和第2路光(中等大小光斑)以及第2路光和第3路光焦斑叠加结果,图3(d)给出了3路叠加即整个脉冲的焦斑。

图4给出了条纹相机记录的未经激光放大的3台阶变焦辐照典型结果,其中图4(a)为3路光合束后的结果,图4(b)~(d)分别为第1路至第3路光单独测量结果。结合图3的结果可知,实验中实现了3台阶变焦辐照。

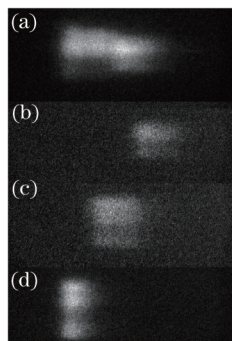


图4 条纹相机记录的能量放大前三台阶变焦辐照典型结果(未经放大)

Fig.4 Typical results of three-stage focal zooming before being amplified recorded by streak camera

图5给出了合束光经过能量放大、并经能量衰减后,条纹相机记录的变焦辐照结果。对比图4和图5可知,激光放大并未改变变焦特性,同时光斑的均匀性得到提高,其原因可能在于激光经历了饱和放大过程,内部强度差别减小。

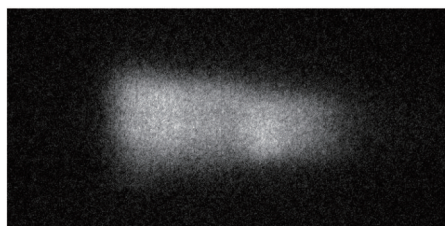


图5 条纹相机记录的能量放大后3台阶激光变焦典型结果

Fig.5 Typical result of three-stage focal zooming recorded by streak camera after being amplified

4 讨 论

不论是准分子激光所采用的基于像传递技术的变焦辐照^[19-20],还是固体激光所应用的基于任意整形技术的变焦辐照^[5],本质上都是先将光脉冲从时间和空间上分开,产生具有随时间变化、独立焦斑的子光束,再从空间上合并,并保持时间上的差别,这样就可以在同一空间位置上产生随时间变化的焦斑。本实验的特色之处在于用电光削波开关中的检偏棱镜同时实现波形分割(时间)和分束(空间)。

为了保持光波形的保真度,在分束-合束过程中保持了各光束之间光程相等,这是保真度的必要条件;考虑到光束传输过程及合束过程中的能量损耗不均等,为保持各子束之间的能量平衡,必要时需要在光路中插入衰减片。这也反过来说明,非等光程条件为脉冲整形提供了可能,在图2所示的光路中,如果按从上到下的顺序依次减小光程,则合束后获得脉宽压缩的光波形;反之,则获得脉宽展宽的波形;再考虑到3路光强度的变化,以及普克尔盒驱动电压波形带来的分束光波形的变化,则合束后的光波形将存在更多的变化可能。

图1所示的波形切割方式并不是唯一的,可根据需要调整EO驱动电压与脉冲波形的同步关系,实现光脉冲3部分可分别按不同的光路传播,因此共存在6种波形分割方式。在不同的分割方式中,对EO驱动电压波形的要求不同,应具体分析对待。

为实现各路光焦斑的不同,变化物孔的方式不是必需的,也可以采用相同的物孔、不同物方透镜焦距的方式,或者不同物孔、不同物方透镜焦距。可根据实际需要做选择。

由图4给出的实验结果可知,变焦辐照过程中没有清晰的台阶,即3路光之间存在相互叠加,这是由于使用的普克尔盒驱动电源需要1~2 ns的时间才能达到半波电压,因此各子束的前沿时间也为1~2 ns。要获得台阶清晰的变焦辐照,要求驱动电源具有陡的上升沿或下降沿。

图4和图5的结果表明,实验中获得的焦斑并不均匀,如图3所示,这是由于所采用的入射光为XeCl激光振荡源,要想获得均匀的焦斑,需采用空间诱导非相干等技术^[9]。在采用这些技术时,由于入射到电光削波开关中的光已包含散射源和初级物孔的信息,因此其变焦辐照将与振荡源条件有所不同。

5 结 论

基于电光削波开关和像传递技术,实现了基于振荡源XeCl激光的3台阶变焦辐照,并利用紫外条纹相机记录了脉冲放大前和放大后的变焦辐照过程。采用了一种直接利用电光削波开关中检偏棱镜实现波形切割和脉冲分束的方式,该方案简化了整体光路,提高了入射光脉冲的能量利用效率。研究还表明:1)分束之间满足等光程是保证合束后光脉冲波形保真度的前提条件,而非等光程为脉冲波形整形提供了可能;2)为获得台阶边界清晰的变焦辐照,要求普克尔盒电光晶体驱动电压具有陡的前沿或后沿。

参 考 文 献

- 1 S E Bodner, D G Colombant, J H Gardner, *et al.*. Direct-drive laser fusion: Status and prospects[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(5): 1901-1918.
- 2 S E Bodner, D G Colombant, A J Schmitt, *et al.*. High-gain direct-drive target design for laser fusion[J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(6): 2298-2301.
- 3 D G Colombant, S E Bodner, A J Schmitt, *et al.*. Effects of radiation on direct-drive laser fusion targets[J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(5): 2046-2054.
- 4 A J Schmitt, D G Colombant, A L Velikovich, *et al.*. Large-scale high-resolution simulations of high gain direct-drive inertial confinement fusion targets[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(5): 2716-2722.
- 5 B Canaud, F Garaude. Optimization of laser-target coupling efficiency for direct drive laser fusion[J]. *Nuclear Fusion*, 2005, 45(12): L43-L47.
- 6 B Canaud, F Garaude, P Ballereau, *et al.*. High-gain direct-drive inertial confinement fusion for the laser mégajoule: recent progress [J]. *Plasma physics and controlled fusion*, 2007, 49(12): B601-B610.
- 7 D G Colombant, A J Schmitt, S P Obenschain, *et al.*. Direct-drive laser target designs for sub-mégajoule energies[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14(5): 56317.
- 8 A J Schmitt, J W Bates, S P Obenschain, *et al.*. Direct drive fusion energy shock ignition designs for sub-MJ lasers[J]. *Fusion*

- Science and Technology, 2008, 56(1): 371–383.
- 9 M Temporal, B Canaud, B J L Garrec. Irradiation uniformity and zooming performances for a capsule directly driven by a 32M9 laser beams configuration[J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(2): 22701.
- 10 B Canaud, M Temporal. High-gain shock ignition of direct-drive ICF targets for the laser mégajoule[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(04): 43037.
- 11 J W Bates, A J Schmitt, D E Fyfe, *et al.*. Simulations of high-gain shock-ignited inertial-confinement-fusion implosions using less than 1 MJ of direct KrF laser energy[J]. High Energy Density Physics, 2010, 6(2): 128–134.
- 12 J D Sethian, M Friedman, E Al. Electron beam pumped KrF lasers for fusion energy[J]. Physics of Plasmas, 2003, 10(5): 2142–2146.
- 13 S P Obenschain, J D Sethian, A J Schmit. A laser based fusion test facility[J]. Fusion Science and Technology, 2009, 56(2): 594–603.
- 14 S P Obenschain, C J Pawley, K Gerber, *et al.*. Uniform target acceleration and imprinting studies with the nike KrF lasers[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 1997: CThJ2.
- 15 J D Sethian, S P Obenschain, K A Gerber, *et al.*. Large area electron beam pumped krypton fluoride laser amplifier[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(6): 2357–2366.
- 16 S P Obenschain, D G Colombant, A J Schmitt, *et al.*. Pathway to a lower cost high repetition rate ignition facility[J]. Physics of Plasmas, 2006, 13(5): 36320.
- 17 J L Weaver, S P Obenschain, J D Sethian, *et al.*. Advantages of KrF lasers for inertial confinement fusion energy[C]. 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010: 6–7.
- 18 J D Sethian, D G Colombant, J L Giuliani, *et al.*. The science and technologies for fusion energy with lasers and direct drive targets [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(4): 690–703.
- 19 R Lehmborg, J Goldhar. Use of incoherence to produce smooth and controllable irradiation profiles with KrF fusion lasers[J]. Fusion Technology, 1987, 11(3): 532–541.
- 20 D M Kehne, M Karasik, Y Aglitsky, *et al.*. Implementation of focal zooming on the Nike KrF laser[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84: 013509.
- 21 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. ASE Suppression in the high power excimer laser MOPA system based on electro-optical switch[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1):0102008.
胡 云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102008.
- 22 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. High contrast ratio ultraviolet electro-optical switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 561–564.
胡 云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 高对比度紫外电光削波开关[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 561–564.
- 23 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. Suppression of ASE from excimer laser using cascaded UV electro-optical switch[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 13–19.
胡 云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 由级联紫外电光开关控制准分子激光的自发辐射放大[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 13–19.

栏目编辑: 宋梅梅