

“天光”装置光学角多路系统倍增研究

向益淮¹ 高智星¹ 汤秀章¹ Sandor Szatmari² Bohus Janos²

(¹ 中国原子能科学研究院高功率准分子激光实验室, 北京 102413
² Department of Experimental Physics University of Szeged, Domter 9. H-6720 Szeged)

摘要 “天光”装置是我国目前最大的一台高功率氟化氪准分子激光装置, 装置主要包括前端激光器、一级放电抽运激光放大器、两级电子束抽运激光放大器、平滑化光学角多路及打靶平台诊断等系统, 装置输出激光波长为 248 nm, 脉宽为 23 ns, 输出能力为 6 束百焦耳量级。主要介绍了一种将装置现有的 6 束 23 ns 光学角多路系统升级到 12 束 10 ns 光学角多路系统的方法和技术。包括前端 10 ns 短脉冲激光的产生, 偏振分光原理, 紫外偏振激光的传输与控制及 6 路 12 束光学角多路系统的设计方案等。

关键词 激光器; “天光”装置; 光学角多路; 偏振分光; 光束均匀性

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s102009

Investigation of Double the Optical Angular Multiplexing System for “Heaven” Facility

Xiang Yihuai¹ Gao Zhixing¹ Tang Xiuzhang¹ Sandor Szatmari² Bohus Janos²

(¹ High Power Excimer Laser Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)
(² Department of Experimental Physics, University of Szeged, Domter 9. H-6720 Szeged, Hungary)

Abstract The “Heaven” facility is the maximal high power krypton-fluoride (KrF) excimer laser in our country. It is composed of an excellent beam profile amplified spontaneous emission (ASE) source, a discharge pumped KrF laser, two stage two-electron-pumped KrF amplifiers, six beams optical angular multiplexing system for beam smoothing, physical diagnostic system, etc. The facility can produce six beams, more than one hundred joule energy, 248 nm wavelength, 23 ns width laser pulse. This paper introduces a method and technology research of double the optical angular multiplexing system for “Heaven” facility. The main contents are as followed: the method of producing 10 ns pulse, the principle introduce of polarization beam split, and the design scheme of twelve beams angular multiplexing system.

Key words lasers; “Heaven” facility; optical angular multiplexing system; polarization beam split; uniformity of beams

OCIS codes 140.2180; 080.3620; 260.5430; 080.1510

1 引言

“天光”装置是我国目前最大的一台高功率氟化氪(KrF)准分子激光装置, 主要用于开展惯性约束聚变^[1]及冲击点火^[2]等基础物理问题的研究, 其现有的光学角多路系统是利用诱导空间非相干方法^[3]建立的一套 6 路平滑化光学角多路系统^[4], 系统中每束激光之间的时间间隔为 20 ns。由于新的实验需求, 下一步计划对装置的光学角多路系统进行升

级, 期望通过升级获得脉宽 8 ns、能量大于 200 J、光束不均匀性小于 2% 的激光输出。目前“天光”装置各级放大器的电子束宽度正好满足各自通过激光束的放大要求。如果输出脉冲宽度要由目前的 23 ns 变为 8 ns, 现有放大器的电子束宽度将远远大于通过激光束的脉冲宽度, 放大时会导致激光束的脉冲宽度出现展宽效应。为了避免这一效应, 必须升级现有的光学角多路系统, 目前装置的第一级放大器

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-12-01

作者简介: 向益淮(1976—), 男, 副研究员, 主要从事 KrF 准分子激光方面的研究。E-mail: xiangyh@ciae.ac.cn

是一台有三个放大腔的放电抽运激光器,每个腔的放电时间为 20 ns。第二级电子束抽运的预放大器的电子束宽度为 90 ns,但平顶部分只有 60 ns 左右。第三级电子束抽运的主放大器的电子束宽度为 160 ns,平顶部分只有 120 ns 左右。根据这一条件,要想放大 8 ns 的种子激光脉冲,三腔激光器的每个激光腔需要放大 2 束激光,预放大器需要放大 6 束激光,主放大器则需要放大 12 束激光。脉冲束与束之间的间隔为 10 ns。本文介绍了将现有的 6 束光学角多路系统进行倍增,建立一套 12 束激光输出的光学角多路系统的方法和技术。倍增后的系统需要考虑目前角多路大厅的空间条件,以及各级放大器的相互位置。最重要的一点是新的角多路系统仍然需要具有光束平滑的功能^[4],其输出光束的不均匀性需要保持现有水平,因此,角多路光路的设计必须考虑光束平滑所需的像传递光路布局。

2 10 ns 短脉冲种子光的产生

“天光”装置对种子光的能量、光束均匀性及脉冲宽度等参数有较高的要求,目前国内外出售的商用激光器很难满足这些要求。为了获得平滑的 10 ns 短脉冲种子光,采用了一种适用于放大自发辐射(ASE)平滑光束的脉宽压缩方法^[5],这种方法主要是利用激光猝熄的脉宽压缩原理^[6]。在此基础上,本课题组和匈牙利赛格德大学合作研制了一台短脉冲前端激光装置 Variex。装置由振荡器和放大器两个分离的放大抽运激光器构成,如图 1 所示。图 1 中的激光器是振荡器,主要是负责产生需要的短脉冲,右边的激光器是放大器,主要是将振荡器产生的脉冲进行初级放大,以达到下一级放大器对激光输入强度的要求。振荡器采用了激光猝熄压缩的方法来实现脉宽的压缩。该方法不但实现了将原本 20 ns 的脉冲宽度压缩到了 6~12 ns 范围可变,输出的光束还是 ASE 光,满足了对前端激光器输出光束均匀性的要求。输出能量约 20 mJ,经过放大器放大后可达 250 mJ,满足了下一级放大器的输入要求。输出脉宽的变化主要通过调整两个腔所充气体的气压来实现。

3 倍增光学角多路系统的分光方法

要想在现有 6 束光学角多路系统的基础上将系统的光束总数倍增到 12 束,如果采取传统的分光镜分束方法^[7]来建立新的光学角多路系统,不但无法

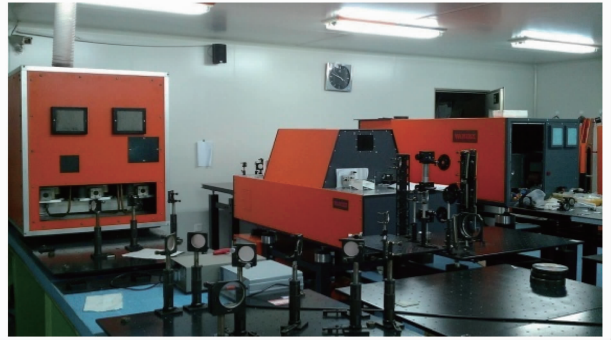


图 1 Variex 激光装置

Fig. 1 Facility of Variex laser

利用上现有的光学角多路系统,而且新的角多路光路将比以前复杂很多,所需的光学镜片及空间场地都将成倍增加。本着光路简单实用,尽量利用现有的 6 束平滑化光学角多路系统的原则,通过广泛调研,决定采取偏振分光的方法来建立新的 12 束光学角多路系统,其光路原理如图 2 所示。前端输出的种子光经过一块偏振分光体(PBSW)后,被分成传播方向相互垂直的 S 偏振和 P 偏振两束激光。其中 P 偏振光直接透射穿过分光片,S 偏振光经过分光片反射后,沿图 2 所示光路传播一定距离后与 P 光组束,形成 1 路 2 束的脉冲序列进入现有的 6 路光学角多路系统,两束激光之间的时间间隔由 S 光所经过的光程决定。经过角多路系统的多次分束后,输出的则是 6 路 12 束的激光。在输出的 6 路激光光路上再放置一片分光片,将每一路上组束的两束 S 光和 P 光再次分开,便可形成独立的 12 束激光。为了保证分光后光束的质量及能量分配平均,偏振分光片的选取很重要。由于“天光”装置的种子光是波长很短的 KrF 紫外激光,因此选择了超宽带偏光立方体分光器,其技术指标和实物如图 3 所示,该偏光立方体分光器由两个直角棱镜组成,其中一块的斜面上镀了电介质多层偏光膜,在入射面和出射面镀了防反射多层膜。其主要特点有:它可以分离较宽波长范围的偏光;垂直入射一束单色光,偏光立方体分光器允许 P 偏光通过,而 S 偏光全部被反射到垂直方向;几乎不发生光轴偏移和重影现象,光束质量也不会受到影响。从图 2 看出,分光时 S 光走过的光程和光学元件多于 P 光,会损失一部分能量导致能量分配不均匀,但在最后打靶前所有光束都将经过消延时光路,P 光走过的光程和光学元件又会多于 S 光,因此前面产生的能量分配不均将得到补偿。

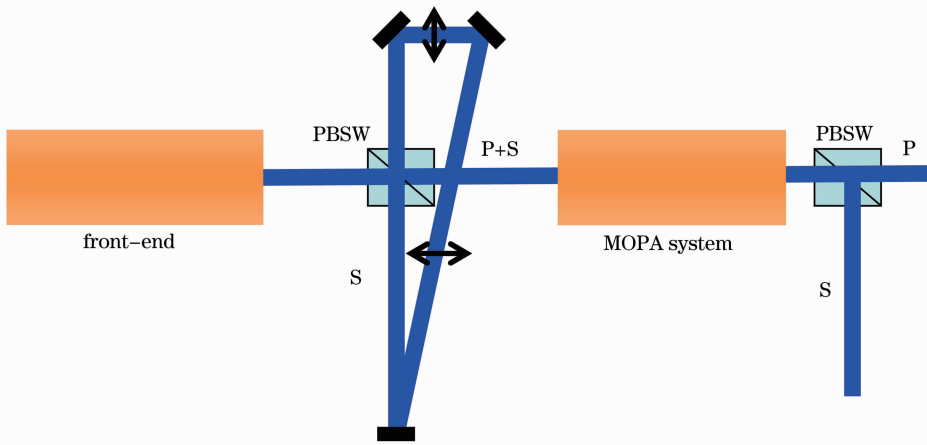


图 2 分光原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam split

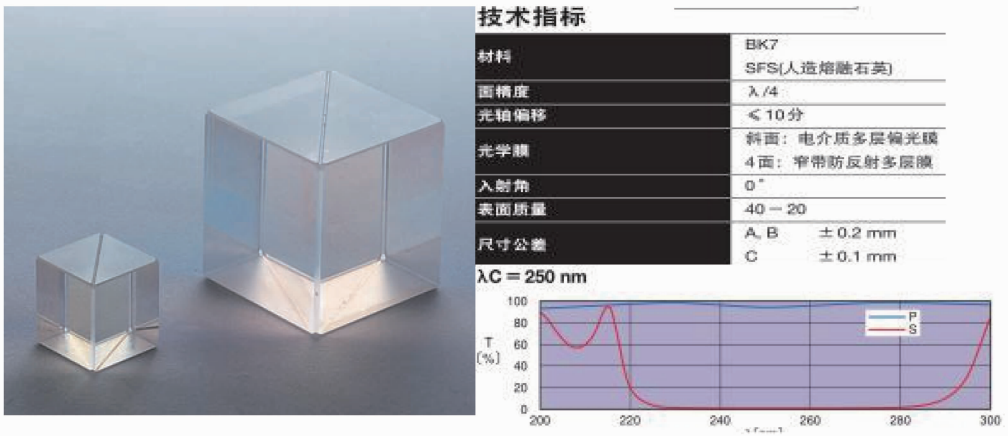


图 3 超宽带偏光立方体分光器

Fig. 3 Broad band polarization beam splitter

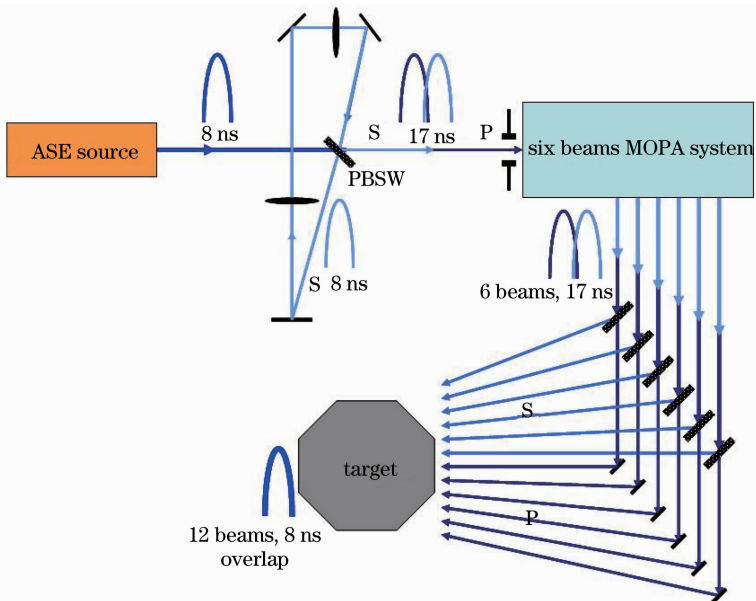


图 4 6路12束光学角多路系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of twelve beams angular multiplexing system

4 6路12束光学角多路系统的设计方案

根据上述分光方法,设计了“天光”装置12束光学角多路系统的方案如图4所示。通过调整气压,前端 Variex 激光器产生8 ns 的 ASE 平滑种子光源,经过偏光立方体分光器后形成P光在前S光在后的脉冲串,其脉冲宽度为17 ns,与现有的6束角多路系统中种子激光的脉冲宽度基本一样。将其按现有光路引入主振荡功率放大(MOPA)系统中,各级放大器的电子束宽度也基本能满足其放大的要求,最终输出的是6束17 ns 宽度脉冲串,每个脉冲串中含脉宽为8 ns 的P光和S光各一束。然后再

次利用偏振分光将每个脉冲串的P光和S光分开,形成6束脉冲宽度8 ns 的P光和6束脉冲宽度8 ns 的S光总计12束光,同时各束光之间的延时也消掉了,12束光就可以同时入射到靶室进行打靶聚焦。在焦点位置形成12束8 ns 的激光叠加焦斑。下面就光路中的各部分分别给予说明。

前端光路的设计如图5所示, Variex 激光器振荡器输出一束8 ns 的短脉冲激光,用一块前面所述的偏振分光体将其分为两束相互垂直的P光和S光,让S光多走3 m 光程后与P光组束,形成一路两束的脉冲串,脉宽约17 ns。然后将脉冲串注入电

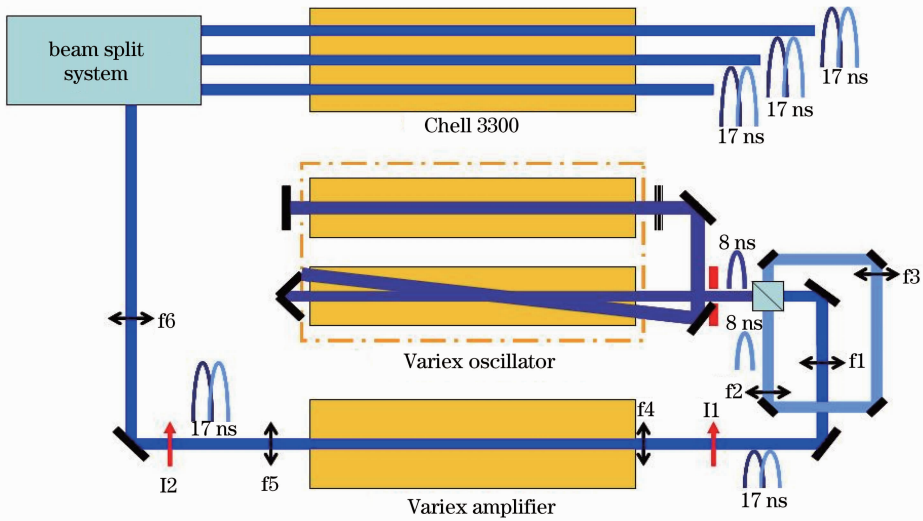


图5 前端光路示意图

Fig.5 Optical setup of the front-end

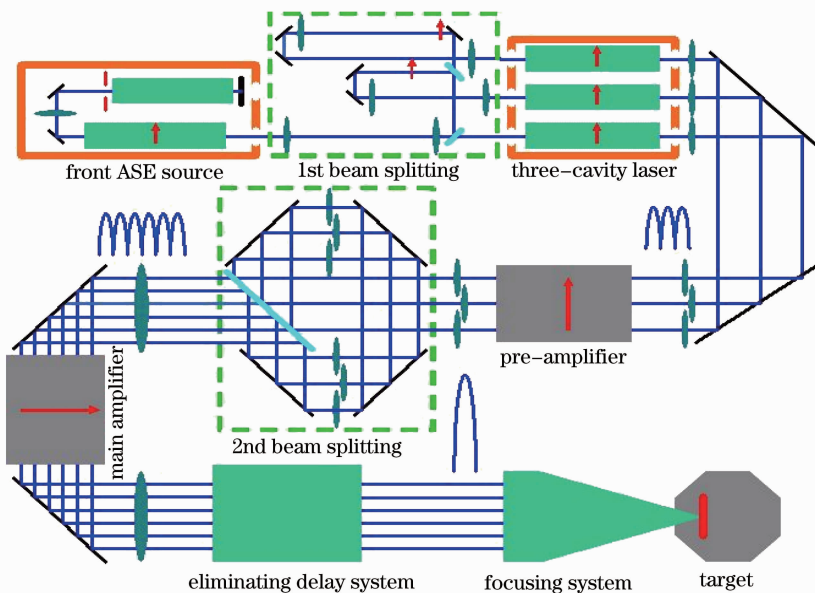


图6 现有的“天光一号”光学角多路系统示意图

Fig.6 Sketch map of optical angular multiplexing system on “Heaven I”

子束宽度为 20 ns 的 Variex 激光器放大腔中进行放大后输出。6 路 12 束光学角多路系统的光束平滑仍然采用基于连续像传递的诱导空间非相干 (FE-ISI) 方法, 振荡腔输出的 ASE 光照射一个小孔, 此小孔作为最初的物面, 透镜 f1、f4 和 f5、f6 组成两组像传递将小孔处的物面分布传递出 Variex 激光器。透镜 f2、f3 用于传递偏振分光后的 S 光多走的 3 m 路程。最终输出 Variex 激光器的为脉宽 17 ns 的 1 路 2 束平滑化激光束。图 6 给出了现有的 6 束平滑化角多路系统的光路示意图, 由于现有的前端 ASE 源是脉宽 20 ns 的平滑化激光束, 因此可以用新的 Variex 激光器及其平滑传递光路取代现有的前端 ASE 源作为新的种子光。为了尽可能不改变现有 6 束平滑化光学角多路系统的布局及像传递光路, 新的 Variex 激光器输出光束进入一次分束光路前的像位位置、像位大小及光束发散角等光束参数要与现有的光路保持完全一致, 这些参数主要是由激光器放置的位置和 f1~f6 这些透镜的焦距来决定的, 只要焦距选择合适, 是完全可以使输出光束与现有

光路保持一致的。

新 Variex 前端激光器输出的激光束经现有的 6 束平滑化光学角多路系统后, 输出的是 6 路 17 ns 的脉冲串, 每路脉冲串中包括 8 ns 的 P 光和 8 ns 的 S 光各一束, 为实现 12 束激光同时打靶, 需将每一路光束中的两束激光分离开。因此还需在靶室前利用 6 块前面所述的偏振分光体阵列, 如图 4 所示, 偏振分光体将每一路光束中的 S 光反射直接进入靶室, P 光完全透射通过偏振分光体, 然后利用一组 6 块反射镜阵列将其反射进入靶室。由于从前端开始 S 光比 P 光多走 10 ns 的光程, 因此只需将偏振分光体阵列和反射镜阵列之间的间距也定为 10 ns 的光程, P 光和 S 光之间的延时便被消除了, 12 束激光便可实现同时打靶。与现有的 6 束平滑化光学角多路系统相比, 6 路 12 束光学角多路系统仅多用了 7 块偏振分光体、一组 6 块的全反镜阵列以及前端 Variex 激光器的几块像传递透镜, 便实现了光束数目从 6 束到 12 束的倍增效果。

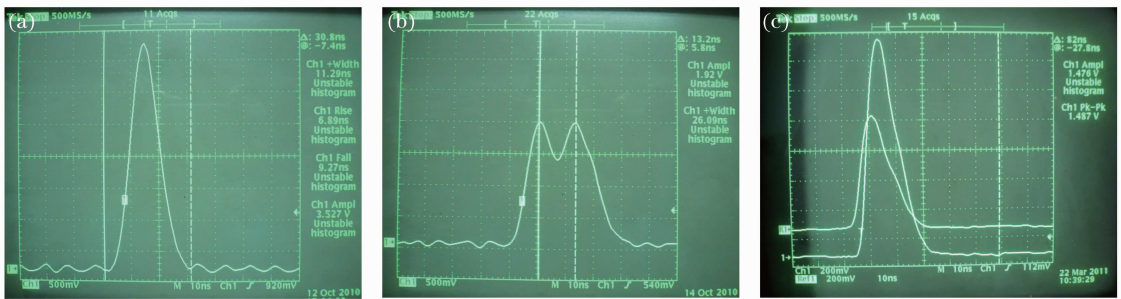


图 7 实验测得的波形结果。(a) 振荡器输出脉冲; (b) 压缩光脉冲; (c) 放大脉冲

Fig. 7 Result of pulse measure. (a) Output pulse of oscillator; (b) compressed pulse; (c) amplified pulse

5 倍增后激光参数的测量结果

利用上述的光路设计方案, 搭建了其中的一路两束的光路并进行了激光能量放大实验、脉宽及光束均匀性测量实验。测得主放大器输出的 1 路 2 束激光能量平均约为 40 J, 大于现有光路平均每束 30 J 的能量, 有助于提高打靶焦斑的功率密度。还分别测量了光路中不同位置输出的脉冲形状和宽度如图 7 所示, 其中 a 为偏振组束前 Variex 振荡器输出的脉冲, b 为偏振组束后的 1 路 2 束脉冲, c 为经过光学角多路系统后分离开的 S 光和 P 光脉冲。由图可以看出, 用猝熄法压缩后的脉冲宽度是满足要求的, 经过倍增后的光学角多路系统输出的 S 光和 P 光脉冲和之前的种子光脉冲基本一致, 从波形幅值看输出能量虽有不同, 但差别较小, 满足装置误差要求。另

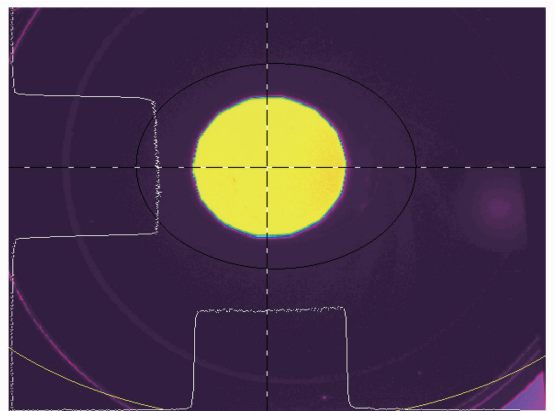


图 8 系统输出光束的均匀性

Fig. 8 Uniformity of the output beams of the system
外一个非常关心的重要参数是光束的均匀性。图 8 给出了输出光束的空间分布测量结果, 测量用的是

OPHIR 公司生产的高灵敏度紫外 CCD。经程序计算,其均方根(RMS)不均匀性为 1.8%,和现有角多路系统的输出光束不均匀性 1.6%基本一致。

6 结 论

上述的设计和实验结果表明,采用偏振分光的方法在“天光”装置上建立 12 束光学角多路系统是可行的,它不但结构简单,使用的镜片数量少,而且能充分利用现有的 6 束平滑化光学角多路系统,节约系统建立的成本。

参 考 文 献

- 1 Wang Ganchang, Yuan Zhishang. Inertial Confinement Fusion [M]. Anhui: Anhui Education Press, 1996. 172—188.
王淦昌, 袁之尚. 惯性约束核聚变[M]. 安徽: 安徽教育出版社, 1996. 172—188.
- 2 R Betti, C D Zhou, K S Anderson, *et al.*. Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal densities [J]. J Phys Conference Series, 2008, 12: 022024.
- 3 Xiang Yihuai, Shan Yusheng, Gong Kun, *et al.*. Experimental investigations of beam smooth technique for high power KrF laser system [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(2): 101—105.
向益淮, 单玉生, 龚 坤, 等. 高功率 KrF 准分子激光光束平滑技术的实验研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(2): 101—105.
- 4 Xiang Yihuai, Gao Zhixing, Tong Xiaohui, *et al.*. Development of new angular multiplexing for “Heaven I” [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 795—798.
向益淮, 高智星, 佟小惠, 等. “天光一号”平滑化角多路系统的建立[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 795—798.
- 5 Xiang Yihuai, Tang Xiuzhang, S Szatmari, *et al.*. A new method fit for compress the ASE pulse [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1381—1384.
向益淮, 汤秀章, S Szatmari, 等. 适用于放大自发辐射平滑光束的脉宽压缩方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1381—1384.
- 6 Gao Zhixing, Tang Xiuzhang, Zhang Haifeng, *et al.*. Excimer laser pulse compressed with pulse feedback [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(8): 1276—1280.
高智星, 汤秀章, 张海峰, 等. 利用脉冲负反馈压缩准分子激光脉冲[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(8): 1276—1280.
- 7 Lü Baida. Propagation and Control of High Power Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

栏目编辑: 韩 峰