

文章编号: 0258-7025(2003)10-0865-08

20 TW 亚皮秒激光系统(SPS)与中子产生实验研究

谢兴龙¹, 朱健强¹, 刘凤翹², 杨镜新¹, 管富义¹, 黄关龙¹, 戴亚平¹, 李美荣¹,
薛绍林¹, 高 奇¹, 薛志玲¹, 邵 敏¹, 庄亦飞¹, 韩爱妹¹, 彭增云¹, 张伟清¹, 张明科¹,
诸彩龙¹, 林尊琪¹, 郑志坚³, 丁永坤³, 陈家斌³, 王世绩⁴, 顾 援⁴, 王 伟⁴, 王瑞荣⁴, 吴 江⁴
(高功率激光物理国家实验室,¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所,² 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)
(³ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;⁴ 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 利用啁啾脉冲放大技术, 建成了一台基于钕玻璃放大器 1053 nm 波长的亚皮秒超短脉冲激光系统(SPS)。系统的输出峰值功率大于 20 TW, 靶面最高能量可达 16 J, 采用离轴抛物面反射镜聚焦, 在靶面上获得 2×10^{18} W/cm² 的激光功率密度, 以此激光脉冲轰击氘化聚苯乙烯平面靶, 获得单次发射最高 2.4×10^4 个中子产额。对中子产生的机理进行了相关的讨论。

关键词 惯性约束聚变技术; 亚皮秒超短脉冲激光; 钕玻璃放大器; 中子产额

中图分类号 TN 248.1; TN 249 **文献标识码** A

20 TW Sub-picosecond Laser System (SPS) Applied for the Neutron Experiment

XIE Xing-long¹, ZHU Jian-qiang¹, LIU Feng-qiao², YANG Jing-xin¹, GUAN Fu-yi¹,
HUANG Guan-long¹, DAI Ya-ping¹, LI Mei-rong¹, XUE Shao-lin¹, GAO Qi¹, XUE Zhi-ling¹,
SHAO Min¹, ZHUANG Yi-fei¹, HAN Ai-mei¹, PENG Zeng-yun¹, ZHANG Wei-qing¹,
ZHANG Ming-ke¹, ZHU Cai-long¹, LIN Zun-qi¹, ZHENG Zhi-jian³, DING Yong-kun³,
CHEN Jia-bin³, WANG Shi-ji⁴, GU Yuan⁴, WANG Wei⁴, WANG Rui-rong⁴, WU Jiang⁴

National Laboratory on High Power Laser and Physics, ¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences,

² Shanghai Institute of Lasers and Plasma, Shanghai 201800, China

³ Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

⁴ Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China

Abstract A Nd³⁺-doped-glass-based sub-picosecond laser system with the maximum peak power of greater than 20 tera watts and the energy on target surface of 16 J is accomplished by using the chirped laser pulse amplification technology. While the laser pulse is focused by an off-axis parabolic mirror, the power density on target surface of approximately 2×10^{18} W/cm² is acquired. In the performed neutron experiment, a C₈D₈ plate target is placed on the focal spot of the off-axis parabolic mirror. The maximum neutron yield for a single shot reaches 2.4×10^4 . Still some other related problems are discussed.

Key words ICF; sub-picosecond ultra short laser pulse; Nd³⁺-doped glass based amplifier; neutron yield

收稿日期: 2003-08-27; 收到修改稿日期: 2003-09-02

基金项目: 国家高技术惯性约束聚变主题(编号: 2002AA842100)资助项目。

作者简介: 谢兴龙(1968.3—), 中国科学院上海光学精密机械研究所副研究员, 博士, 主要从事超短脉冲与强激光技术研究。E-mail: xiexl329@mail.shnc.ac.cn

1 引 言

太瓦级超短脉冲激光系统可以在焦点附近产生 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 的功率密度,等效于生成约 $3 \times 10^{10} \text{ V/cm}$ 的电场,这一数值已大于价电子形成的库仑场强,从而使产生的等离子体电子与激光场产生非线性相互作用。而且因为激光脉冲较短,其持续时间小于流体动力学特征时间和建立热平衡的特征时间,因此在不大的体积内可以形成密度很高的强烈不平衡等离子体,可用以研究形成等离子体的相干和非相干 X 射线辐射,用来加速粒子和从事热核点火研究^[1]。在利用高功率超短脉冲进行激光聚变快点火研究方面,2001 年,日本和英国科学家首次利用超短脉冲激光对其原理做了可行性验证,他们利用一束 60 TW(50 J)的超短脉冲将常规的 ICF 中子产额提高了一个数量级^[2],2002 年又进一步使中子产额提高了 3 个数量级^[3],这一演示实验的成功,推动了国际上许多大型实验室建立新型高功率超短脉冲激光器的研究,引发了 ICF“快点火”研究新一轮的发展热潮。

啁啾脉冲放大(CPA)技术是目前获取超短、超强激光脉冲的经典方法,它首先利用展宽器对飞秒级或亚皮秒级的激光脉冲引入一定的啁啾量,使脉冲展宽,注入高增益的预放,当脉冲能量达到毫焦耳量级,再通过主放大器将能量提高到设计的水平,最后利用压缩器引入与展宽器相反的啁啾量,使脉冲宽度复原,从而获得高功率超短脉冲激光输出。

本文介绍最新建成并投入使用的 1053 nm 波长的 20 TW 超短脉冲系统(SPS 装置)。激光输出脉冲宽度为 0.5~0.9 ps,用一块离轴抛物镜聚焦激光,得到了 30 μm 直径的焦斑,功率密度为 $2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$,采用 98% 氘代聚苯乙烯平面靶做中子产生实验,当注入靶的能量为 16 J 时,获得了最高 2.4×10^4 个中子。

2 SPS 超短脉冲激光系统

图 1 为 SPS 超短脉冲激光系统示意图,SPS 装置的前端包括飞秒激光振荡器、展宽器和高增益再生放大器三部分,目的是提供给主放大器适当时间宽度和能量的激光脉冲。飞秒激光振荡器采用了相干公司的 Mira900 钛宝石自锁模激光器,该激光器采用 14 W 连续多线氩离子激光器(InNova 400)作为抽运源,用双折射晶体对波长进行调谐,当调谐到 1053 nm 时,输出锁模脉冲的平均功率为 300 mW,

重复频率为 76 MHz,水平偏振,谱宽 16 nm,脉宽 100 fs,TEM₀₀ 模。

为了更好地提取放大器中的能量,同时抑制激光脉冲放大过程中的自聚焦和自调制,振荡器输出的飞秒激光脉冲在放大之前,必须进行展宽。SPS 系统展宽器的排布示于图 2,入射光经过一法拉第隔离器之后,由 M_1 调整入射到光栅的角度为 75° ,一级衍射光经球面反射镜 R 到 M_3 ,然后再到 R ,再到光栅,衍射后到达 M_2 ,调整 M_2 使光束原路返回,最后从法拉第的第一个偏振片输出。如果已知入射光的光谱宽度,那么展宽后的激光脉宽可由下式给出^[4]

$$t = \frac{\lambda L (\lambda n)^2 \Delta\omega}{2\pi c^2 [1 - (\lambda n - \sin\theta)^2]}$$

式中, L 为展宽器的有效长度, λ 为激光中心波长, n 为光栅每毫米的刻线数, θ 为激光脉冲在光栅上的入射角。SPS 系统展宽器所采用的光栅每毫米条纹数为 1800, $R = 1860 \text{ mm}$,光栅的中心与 M_3 的距离 L 为展宽器的等效长度,大约为 350 mm,100 fs 的激光脉冲经过展宽器之后宽度约为 800 ps。

SPS 系统前端的第三部分是高增益钛宝石再生放大器(参见图 1(a)),用来放大展宽后的激光脉冲,将其能量提高到毫焦耳量级,然后注入主放大器系统。再生放大器的振荡腔由两个凹面全反镜(曲率半径为 3 m),一个 KD*P 普克尔盒和一块宽谱带偏振片组成。腔长 1.8 m,钛宝石晶体长 2 cm,掺杂浓度 0.15 wt.-%,两端切成布鲁斯特角,置于腔的中央。抽运光源为调 Q Nd:YAG 倍频激光器(Surelite I, Continuum Co.),输出 532 nm 波长,脉冲能量 150 mJ,脉宽 6 ns,用分束镜 BS 等分光束,再经两个相同透镜会聚,双向抽运钛宝石晶体。到达晶体端面时光斑尺寸 $\sim 1.7 \text{ mm}$ 。合理调节偏振片的角度,再生放大器的中心波长可调为 1053 nm。抽运光到达钛宝石端面的时间与 KD*P 普克尔盒引入种子脉冲开关动作时间的同步精度可达 $\pm 2 \text{ ns}$,同样 KD*P 普克尔盒的倒出时间延迟精度亦能达到 $\pm 2 \text{ ns}$ 。这样,KD*P 普克尔盒开关动作时间漂移对放大脉冲输出能量的影响基本可以忽略。

展宽之后的激光脉冲经再生放大器之后,脉冲宽度为 650 ps,光谱宽度 $\sim 6 \text{ nm}$,单脉冲能量 $\sim 1 \text{ mJ}$ 。

为了提高 SPS 超短脉冲激光系统输出激光的光束质量和压缩之后的信噪比,在主放大器系统的设计中,对全系统的 B 积分进行了严格的控制,借

鉴于神光-Ⅱ放大链设计思路,对 SPS 系统实施像传递到靶室,增加了自动准直系统。如图 1 所示,主放大系统包括 7 级钕玻璃棒,5 台空间滤波器

法拉第隔离器,啁啾激光脉冲在放大的同时经空间滤波器滤波和扩束,最后输出光束的净口径约为 95 mm。

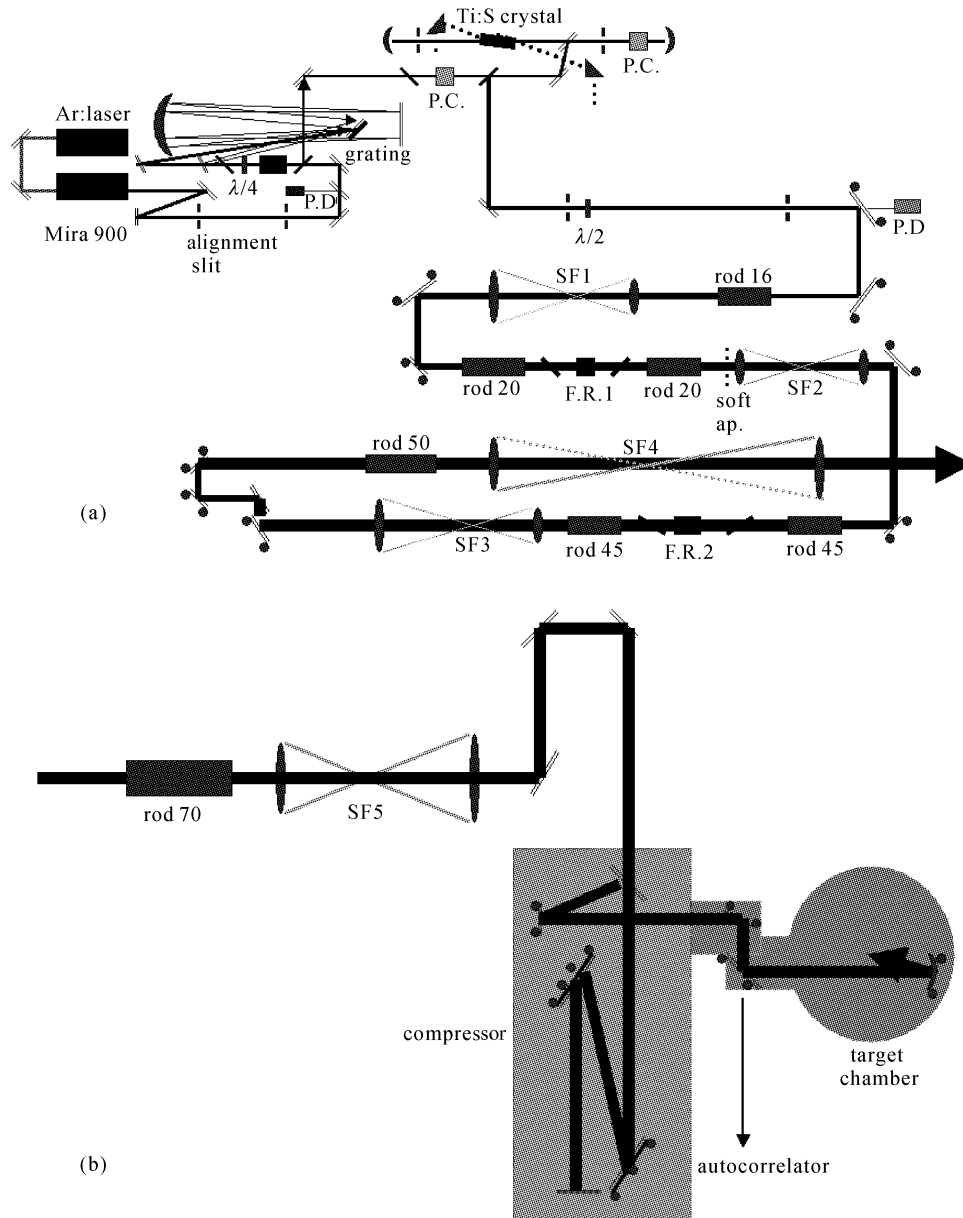


图 1 SPS 超短脉冲激光系统

(a) 振荡器、展宽器、再生放大器与钕玻璃主放大系统;(b) 末级放大器、压缩器和靶室系统,压缩器和靶室保持在 10^{-3} Pa 的真空内

Fig. 1 Schematic of the sub-picosecond laser system

(a) master oscillator, pulse stretcher, regenerative amplifier and the main laser bay;

(b) $\phi 70$ mm rod amplifier and the last spatial filter, 10^{-3} Pa vacuum host for compressor and the target chamber

SPS 系统的像传递包括两部分,以系统中的软边光阑为界,软边光阑之前,以飞秒激光振荡器的光腰为像面,分别以展宽器的光栅、再生放大器的光腰、第一个空间滤波器的输入端为像面级联传递到软边光阑。软边光阑之后,以软边光阑为像面,利用

各级空间滤波器级联成像到靶室。

软边光阑按超高斯设计,设计透过率参数为:

$$F(r) = \exp\{-[(r-5)/1.7]^4\} \quad 5 \text{ mm} < r < 10 \text{ mm}$$

$$F(r) = 1 \quad r < 5 \text{ mm}$$

$$F(r) = 0 \quad r > 10 \text{ mm}$$

5 级空间滤波器的参数如表 1 所示。

放大器的增益介质采用 N31 型磷酸盐玻璃,在放大器的设计中, B 积分是用来衡量超短脉冲激光的输出信噪比和小尺度自聚焦破坏程度的关键参

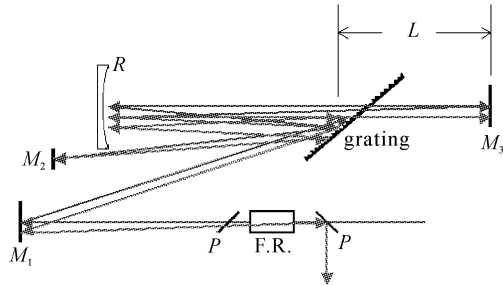


图 2 四通展宽器示意图

Fig. 2 Schematic of the four-pass laser pulse stretcher

数,其表达式为^[5]

$$B(L) = \frac{8\pi^2}{\lambda c} \times 10^7 \int_0^L \frac{n_2}{n_0} P(z) dz$$

式中, L 为增益介质长度, n_2 为非线性折射率系数,对于磷酸盐钽玻璃介质, $n_2 = 1.15 \times 10^{-13}$ esu, n_0 为线性折射率, $n_0 = 1.528$, $P(z)$ 为功率密度,对于 1053 nm 波长有

$$B(L) = 188.11 \times 10^{-13} \int_0^L P(z) dz$$

$P(z)$ 单位为 W/cm^2 。计算 B 积分时,取输出功率的时间平均值,主放大器的 B 积分和设计参数如表 2 所示。从表中可以看到, B 积分的总增量 = 1.017,基本上满足了超短脉冲系统 B 积分总增量小于 1 的要求。

表 1 空间滤波器参数

Table 1 Specifications of the spatial filters

	Input focal length /mm	Input beam diameter /mm	Output focal length /mm	Output beam diameter /mm
SF1	2950.0	14.0	3628.5	17.0
SF2	1289.9	10.5	3749.0	30.0
SF3	2777.1	30.0	4231.9	45.0
SF4	2914.4	45.0	3976.2	61.0
SF5	1967.3	61.0	2985.0	92.0

表 2 放大器的设计参数

Table 2 Designed parameters for rod amplifiers

	$\phi 16$ mm	$\phi 20$ mm	$\phi 20$ mm	$\phi 45$ mm	$\phi 45$ mm	$\phi 50$ mm	$\phi 70$ mm
Pump energy /J	53760	53760	53760	53760	53760	53760	71680
Rod cubic / cm^3	70	110	110	440	440	687	1924
Pump energy density / $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$	768	490	490	122	122	78	37.2
Small signal gain / K_0	120	120	120	30	30	16	12
Beam diameter /mm	10	17	17	30	30	45	61
Input energy /J	0.0005	0.01	0.1	0.15	0.5	~1	~5
Output energy /J	0.02	0.25	1.0	0.75	2.5	5.4	20
B integral	0.006	0.05	0.175	0.039	0.129	0.205	0.413
Output pulse width /ps	650	650	600	500	500	450	450

主放大器系统最后的输出能量为 20 J,在最后一级空间滤波器之后,光斑尺寸 ~ 92 mm,脉冲宽度 450 ps,光谱宽度 3.5 nm,近场填充因子 $\sim 52.7\%$,图 3 显示了 CCD 近场测量仪测得的光斑近场分布结果。

信噪比是超短脉冲激光系统的一个最重要的指标,它的测量采用了两个探测器,一个用作标定,由于每发激光脉冲的能量有起伏,所以以标定探头读数反映激光发次之间的相对值;另一个作为信噪比

的测量,测得压缩后的激光脉冲能量信噪比大约为 500:1,通过计算转换为功率信噪比大约为 $10^5:1$ 。在 SPS 主放大链中使用了光路自动准直系统。采用动态跟踪的方法,整个自动准直过程在 5 min 之内完成,从而解决了以前靠手工调整困难。

SPS 系统的压缩器放置在真空室中,其真空度按激光在压缩器中最大功率密度估算,要求为 6×10^{-3} Pa,真空室水平方向尺度为 3000 mm,直径 1000 mm,光路中心高度约 1000 mm。压缩器内使

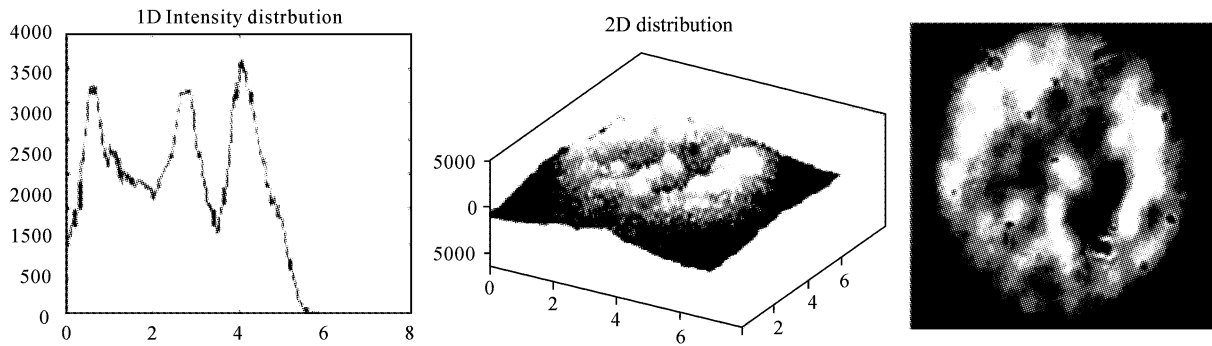


图 3 CCD 近场测量仪的近场测量结果, 激光光斑尺寸 ~95mm, 显示近场光束填充因子 52.7%

Fig. 3 Beam quality measured by a near-field CCD camera. The beam size reads ~95 mm and the filling factor 52.7%

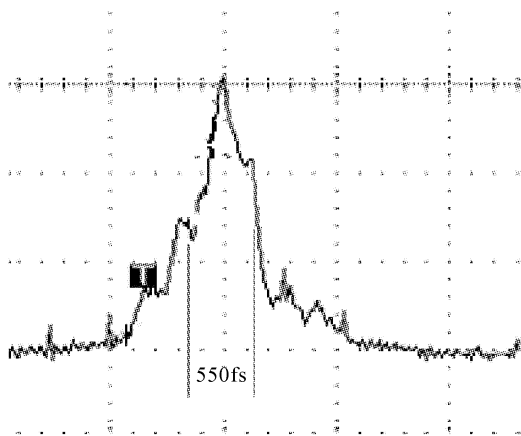


图 4 压缩脉冲测量结果

Fig. 4 Trace of an autocorrelator for compressed laser pulse

用一对平行放置的镀金光栅, 光栅尺寸为 390 mm × 190 mm × 60 mm, 条纹数为 1700 lines/mm, 设计入射角为 67.5°, 双通设计两光栅中心距为 1127.24 mm, 压缩器总效率为 64%。从主放大器链输出的激光脉冲, 经过光栅压缩器之后, 脉冲宽度最短为 550 fs, 采用单次相敏自相关仪 (Positive Light Mode SSA) 测量输出的激光脉冲。图 4 所示为啁啾激光脉冲经过压缩器之后测得的相关信号, 对应于激光脉宽 550 fs。

SPS 系统靶室内部的结构如图 5 所示, 压缩后的超短脉冲由一离轴抛物面反射镜聚焦到靶点, 反射镜焦距 $f = 520$ mm, 焦斑弥散圆 ~20 μm 。在相互正交的两个方向上利用 CCD 监视仪锁定靶位。为了提高调靶的精度, 设计了显微望远系统, 正面监视系统首先将靶的像经过凹面镜和凸面反射镜组成的望远镜系统之后, 由显微物镜成像到 CCD 上, 再由监视器确定靶的位置, 整个系统的放大倍数为 200 倍, 调整精度为 10 μm , 侧面利用照相机的长焦

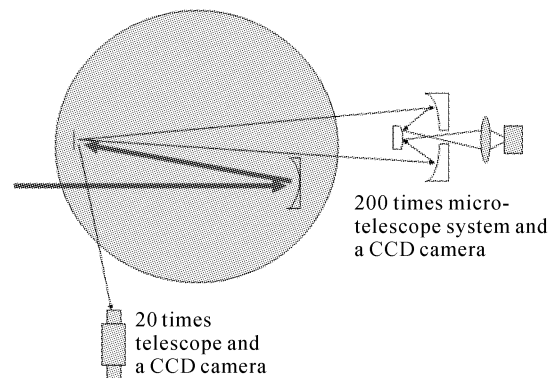


图 5 靶室光路示意图

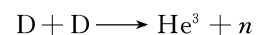
Fig. 5 Schematic for target chamber

镜头装在平行光管的前面, 并将平行光管的像成到 CCD 上, 其放大倍数为 20 倍。

靶上焦斑尺寸的大小, 直接决定了 SPS 系统所能获得的最高功率密度, 为了测量焦斑尺寸的大小, 我们将图 5 中显微望远系统的 CCD 监视器换成了光斑近场测量仪, 在靶位置上放置镀铝反射镜, 将焦点的像反射到近场测量仪, 以此确定焦斑的尺寸, 图 6 显示了总输入能量为 1 J 左右的测量结果, 其纵向和横向的半值宽度约为 30 μm 。

3 中子产生与分析

超短脉冲与 C_8D_8 靶相互作用产生中子的机制源于如下反应^[1]



中子能量接近于 2.45 MeV, 普遍认为聚变中子是由于激光射入靶内, 使氘核加速后与未加速氘核碰撞的结果。当高强度皮秒激光脉冲辐照到靶上时, 在脉冲持续时间内, 强库仑场使靶原子中的电子迅速剥离, 产生超热电子, 当激光的功率密度大于 10^{18} W/cm² 时, 超热电子的能量将达到或超过 1

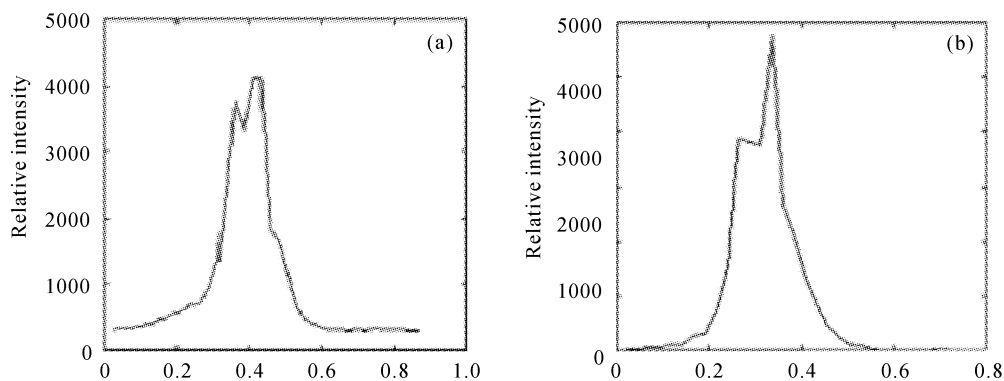


图 6 激光焦斑尺寸的测量结果,横轴每 0.1 个标度代表 $25 \mu\text{m}$

(a) 焦斑横向尺寸的测量结果;(b) 焦斑纵向尺寸的测量结果。整个焦斑的半高宽尺度为 $30 \mu\text{m}$

Fig. 6 Measurements for the size of focal spot. Horizontal dimension every 0.1 unit represents $25 \mu\text{m}$

(a) and (b) represent the measured spot size in two perpendicular directions. They all read approximately $30 \mu\text{m}$

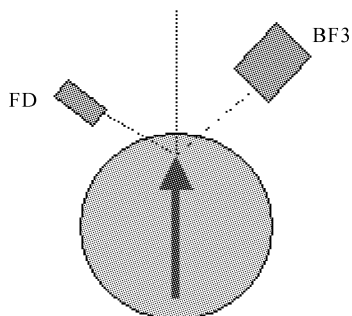
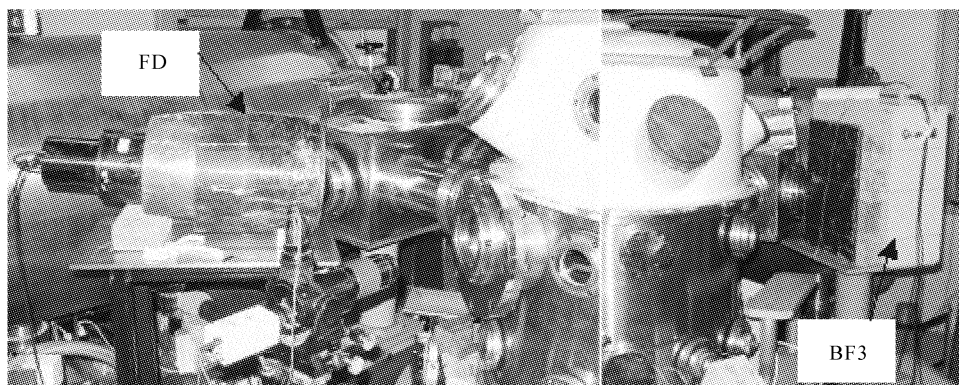


图 7 中子测量示意图

FD 为快响应闪烁体计数器,BF3 为慢响应中子计数器,测量过程中,BF3 距离中子靶 70 cm ,与入射激光成 50° 的位置不动,快探头在不同角度的位置移动

Fig. 7 Photograph of the neutron measurement setup

FD means fast respond neutron detector and BF3 slow respond neutron detector. In the whole experiment, BF3 is placed at the angle of 50° with respect to the direction of incident laser beam and 700 mm away from the target, while the FD moved at the different angle and different distance away from the target

MeV,这些电子在靶中建立强电场,进一步加速后续的离子,使其加速到几百至 MeV 的量级。部分高能的重核进入靶体与其他重核碰撞,发生束靶相互作用,产生中子。在中子实验中 C_8D_8 靶的尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,厚度 $500 \mu\text{m}$,氘化率 98% ,采用闪

烁体/光电倍增管快响应计数器和 BF3 慢响应计数器同时记录探测发射的中子,并将两种不同机制的计数器测到的结果相互比对。图 7 给出了中子测试的探头排布。

图 8 显示了快响应计数器放置在三种不同角

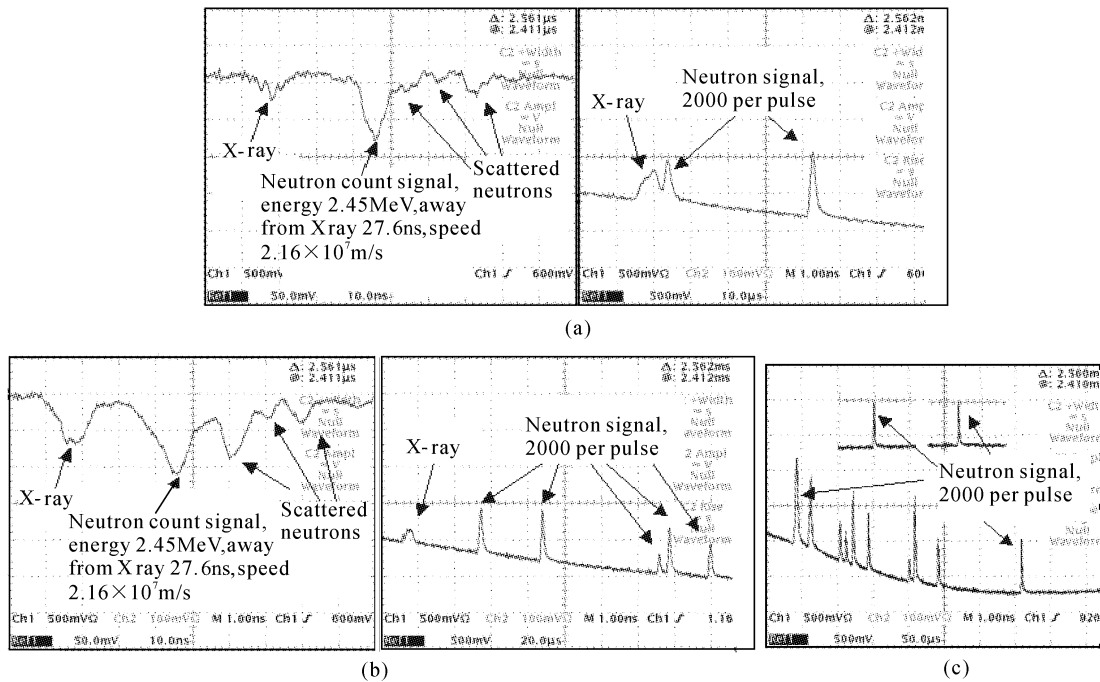


图 8 三种不同角度下快慢中子计数器的测量结果

(a) 快响应计数器在 12.5° 时的测量结果, 左为快响应计数器的信号, 对应中子记数 4540, 右为慢响应探测器的记数, 三个信号, 第一个是 X 光, 另外两个信号代表中子数 4000 个, 激光能量 13.2 J; (b) 快响应计数器在 60° 时的测量结果, 左为快响应计数器的信号, 对应中子记数 9000, 右为慢响应探测器的记数, 对应中子数 10000 个, 激光能量 13.44 J; (c) 慢响应探测器的记数, 探头放置角度为 50° , 对应中子数 24000 个, 激光能量 15.7 J。此时, 快探头放置在 90° 位置, 中子信号饱和

Fig. 8 Results of the neutron yield experiment by the fast and slow respond detector at three different angles

(a) fast detector is placed at an angle of 12.5° . Left graph represents the neutron count of fast detector, it reads 4540 while right graph the neutron count of slow detector and reads 4000. On target laser energy is 13.2 J; (b) fast detector is placed at an angle of 60° . Left graph represents the neutron count of fast detector, it reads 9000 while right graph the neutron count of slow detector and reads 10000. On target laser energy is 13.44 J; (c) the neutron count of slow detector it reads 24000. On target laser energy is 15.7 J. while the fast detector is placed at an angle of 90° and the signal saturates the scope of the oscilloscope

度, 而慢响应探头固定不动的情况下, 两探头对应的测量结果。对于快响应探头, 第一个峰是 X 光信号, 第二个峰的面积代表了中子产额, (a), (b), (c) 三种测量条件下该峰与 X 光信号分别有 27.6, 28.0 和 25.3 ns 的延迟, 在 (a), (b) 情况下探头与靶的距离均约为 60 cm, (c) 情况下探头与靶的距离为 55 cm, 分别对应的中子速度为: 2.174×10^7 m/s, 2.143×10^7 m/s 和 2.174×10^7 m/s, 而 2.45 MeV 能量的中子速度为 2.167×10^7 m/s, 二者的微小差别是由于探头与靶之间距离的测量误差带来的, 因此该峰对应的中子记数, 反映了 $D+D \rightarrow He^3 + n$ 作用的几率。该峰之后分布了几个次峰, 但在 D-D 反应中不会有对应能量的中子信号出现, 而且也不是电信号的反冲, 通过分析认为是由于中子与靶室壁等其他阻挡物之间多次散射的结果。对于慢探头, 每一个脉冲表示 2000 个中子计数, 图 8(c) 中表明

在 20 TW, 16 J 能量到达靶的情况下, 50° 放置的慢响应计数器记录了大约 2.4×10^4 个中子, 此时 90° 放置的快响应计数器信号饱和。

为了测量中子产额的角分布, 将快反应探头测量的结果在同一角度对不同发次取平均, 并与慢反应探头的结果比较, 如图 9 所示, 可以看出在误差范围内, 两计数器给出的单位立体角中子产额记数基本一致, 说明此时的中子分布是各向同性的。图 10 表示中子计数与打靶能量的关系, 当激光脉冲到靶能量由 11.8 J (未压缩脉冲能量 ~ 18.5 J) 增大到 15.7 J (未压缩能量 24.5 J) 时, 中子产额由 2000 个左右增加到 24000, 提高了 12 倍, 这说明, 随着能量的增大, 超热电子的数量和能量都加大, 产生束靶碰撞几率呈指数关系增长, 这表明, 在 ICF 快点火驱动中, 不但需要提高超热电子的能量, 而且也需要同时提高超热电子的数量, 要求 ICF 快点火激光装置

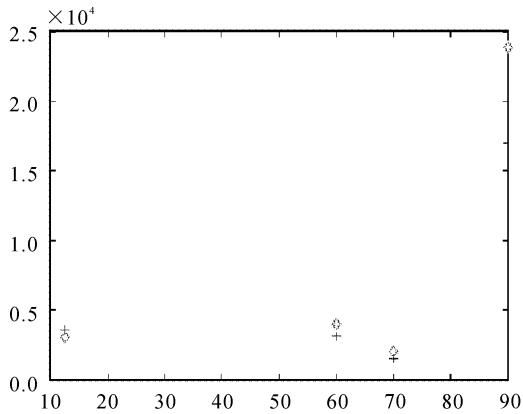


图 9 中子计数与角分布的关系

纵坐标为中子计数,横坐标为角度,“◇”为慢反应计数器的平均结果,“+”为快反应计数器的平均读数。表中快反应计数器的读数对应于计数器放置在对应该角度的测量结果,为了说明中子的分布情况,将慢反应计数器的对应测量结果也标于图上,只是慢反应探头在测量时的位置是固定不变的

Fig. 9 Neutron yield distribution via detection angle

Vertical dimension is the neutron count while horizontal dimension is the detection angle. In the graph, “◇” represents the result of slow respond detector. And “+” the result of fast respond detector (which is kept at a constant place during the measurements) for the laser shot corresponding to the fast detector

不但要输出较高的功率密度,而且也要提供较高的脉冲能量。

致谢 作者衷心感谢贺贤土、张维岩、方勤学、曾先才、黄桂学的支持和帮助,感谢激光聚变中心制靶组提供了优质的 C_3D_8 靶。

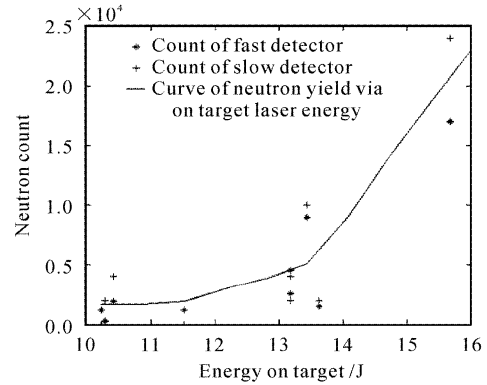


图 10 中子计数与打靶能量的关系

“+”为慢反应计数器的结果,“◇”为快反应计数器的读数

Fig. 10 Relationship between the neutron and laser energy on target

参 考 文 献

- 1 Todd Doitmire. Laser fusion on tabletop [J]. *Optics & Photonics News*, 2002, **13**(6):29~32
- 2 R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima *et al.*. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition [J]. *Nature*, 2001, **412**(6849):798~802
- 3 R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima *et al.*. Fast heating scalable to laser fusion ignition [J]. *Nature*, 2002, **418**:933~934
- 4 A. A. Andreev, A. A. Mak, V. E. Yashin. Generation and applications of ultrastrong laser fields [J]. *Quantum Electron.*, 1997, **24**(2): 99~114 (in Russian)
- 5 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**:2346~2349