



·惯性约束聚变物理与技术·

激光聚变内爆 D³He 质子源的在线诊断系统*

滕 建, 邓志刚, 单连强, 温家星, 袁宗强, 王为武, 张天奎, 田 超,
张 锋, 于明海, 卢 峰, 洪 伟, 贺书凯, 张智猛, 齐 伟,
崔 波, 徐秋月, 魏 来, 李颖洁, 夏立琼, 张 兴,
吴玉迟, 粟敬钦, 周维民, 谷渝秋

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 提出了一种基于混合像素探测器作为记录介质的用于激光聚变内爆 D³He 质子源能谱和产额测量的在线磁谱仪诊断系统。通过对探测器上特征团簇数目和能量的识别, 结合诊断系统排布, 可以快速获取激光聚变反应产生的 D³He 质子源的能谱和产额。在神光装置上对该诊断系统进行了测试。实验使用 31 束纳秒激光聚焦到靶丸上驱动聚变反应。靶丸内充有原子比 1:1 的 D₂ 和 ³He 的混合气体。在线磁谱仪诊断系统测量到了中心能量在 14.6 MeV、半高全宽为 2.1 MeV、产额约 $(2.3 \pm 0.13) \times 10^9$ 的初级 D³He 质子能谱。该系统的建立可以实时给出 D³He 质子源能谱和产额信息, 从而更加及时地指导实验的开展。

关键词: 激光聚变; 内爆; 质子能谱; 在线诊断

中图分类号: O539

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210497

Online diagnosis system for D³He proton in laser fusion implosion experiments

Teng Jian, Deng Zhigang, Shan Lianqiang, Wen Jiaying, Yuan Zongqiang, Wang Weiwu,
Zhang Tiankui, Tian Chao, Zhang Feng, Yu Minghai, Lu Feng, Hong Wei, He Shukai,
Zhang Zhimeng, Qi Wei, Cui Bo, Xu Qiuyue, Wei Lai, Li Yingjie, Xia Liqiong,
Zhang Xing, Wu Yuchi, Su Jingqin, Zhou Weimin, Gu Yuqiu

(Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: An online magnetic spectrometer system based on a hybrid pixel detector is proposed for the diagnosis of the D³He proton spectrum and yield in laser fusion implosion experiments. By identifying the number and energy of the track clusters and considering the experiment setup, the proton spectrum and yield could be deduced in time. The online diagnosis system is tested on the SG laser facility, in which 31 laser beams are focused on the capsule to drive the fusion reaction. With D₂ and ³He gas mixed 1:1 by atomic ratio, the primary D³He proton energy spectrum with center energy of 14.6 MeV, FWHM of 2.1 MeV, and yield of 2.3×10^9 is obtained. This system could provide the D³He proton spectrum and yield online, which would be helpful to improve the experiment in time.

Key words: laser fusion, implosion, proton spectrum, online diagnosis

在激光聚变物理研究中, 激光驱动靶丸内爆产生的质子源的能谱和产额是很重要的参数。一方面这些参数可以表征聚变燃料压缩后的等离子体状态, 提供聚变点火、燃烧和内爆动力学研究中的重要信息^[1-6], 如 D³He 质子的能谱可以提供壳层面密度信息^[4-5]。另一方面, 利用内爆质子源作为诊断束开展质子照相等诊断研究^[7-10], 也需要知道质子的能谱和产额信息。

目前, 用于 D³He 质子能谱和产额测量的诊断设备主要包括基于磁分析方法的磁谱仪^[11-12]和基于质子能量沉

* 收稿日期: 2021-11-18; 修订日期: 2022-03-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0206001); 国家自然科学基金项目(11875048, 11775202); 等离子体物理重点实验室基金项目(6142A04190102, 6142A04210103)

联系方式: 滕 建, tengjian@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 单连强, slqiang@caep.cn;

周维民, zhouwm@caep.cn。

积布拉格峰特性的楔形滤片谱仪^[13-14]。常用的记录介质为 CR39 粒子径迹探测器^[15], 该探测器需要在打靶后进行数小时的刻蚀, 很大程度上会影响实验打靶进度, 不便于及时调整打靶策略, 而且在产额较低情况下对径迹的识别也依赖于人的经验, 不利于推广。也有少量使用 Si 光二极管、MCP 等在线探测器作为记录介质。这些探测器存在空间分辨率较差、结构复杂等问题, 限制了其使用范围。

为了解决以上问题, 提出了一种基于混合像素探测器作为记录介质的用于激光聚变内爆 D³He 质子能谱和产额测量的在线磁谱仪诊断系统。该系统利用质子在二极磁铁中的偏转位置来确定质子信号的能量, 利用混合像素探测器记录质子径迹来确定质子产额。通过屏蔽结构的优化设计, 有效排除了实验打靶 X 射线和电磁辐射场的干扰。在神光激光装置的内爆实验中, 成功获得了实时的质子能谱和产额数据。

1 实验排布

质子在线探测系统结构如图 1 所示, 主要由准直狭缝、二极磁铁和混合像素探测器组成。准直狭缝距离靶点 $D=1.695$ m。准直狭缝的设计在满足能量分辨的同时可以提高统计计数, 从而提高能谱和产额测量的置信度。实验产生的 D³He 质子源将通过准直狭缝的限制后进入到二极磁铁。准直狭缝宽度决定了系统的能谱分辨。首次实验诊断设计中, 在厚 1 mm 的 Ta 片上刻长 $L=10$ mm、宽 $W=0.5$ mm 的狭缝。二极磁铁的磁隙宽度、峰值磁场强度分别为 20 mm, 0.65 T, 在满足磁场强度要求的同时满足足够数量的质子被探测器记录到。用于数据分析的磁场分布使用搭载三维电机的高斯计对其进行了测量。

进入二极磁铁中的质子受磁场洛伦兹力发生偏转, 最后入射到混合像素探测器上。混合像素探测器探测面角度的设计满足质子尽可能垂直入射到探测器上, 以提高测量的能谱分辨。不同能量的质子在磁场中的回旋半径不同, 因而到达混合像素探测器上的位置也不同。对不同位置的质子信号进行统计, 就可以获得质子的能谱和产额信息。

混合像素探测器是一种基于 CMOS 加工技术的半导体探测器, 具有单量子计数特性。作为原理性样机研制, 本设计使用了基于 Timepix 芯片的一款小型探测器 MiniPix。该探测器像素阵列为 256×256 , 像素大小 $55 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$, 探测面积 $14 \text{mm} \times 14 \text{mm}$ 。Timepix 探测器基本结构如图 2 所示。

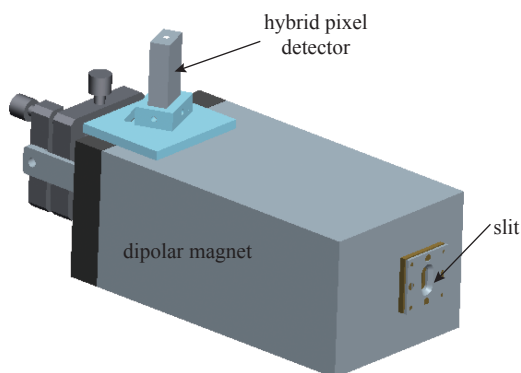


Fig. 1 Schematic of the online proton diagnosis system

图 1 质子在线探测系统结构图

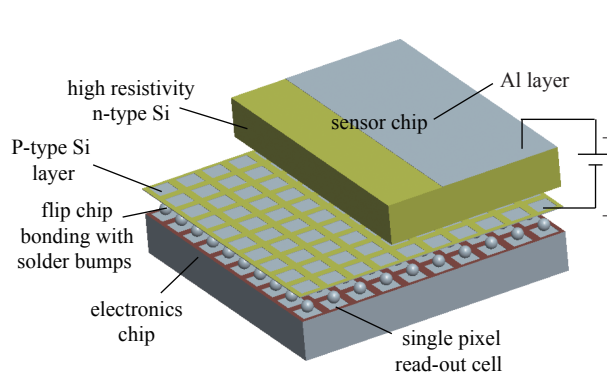


Fig. 2 Schematic of the Timepix detector

图 2 Timepix 探测器基本结构示意图

该探测器用于质子信号探测的基本过程为: 首先, 入射质子将能量沉积在其中的高阻抗 n 型 Si 中产生电子空穴对(电子空穴对的数量正比于质子沉积能量); 其次, 产生的电子空穴对在反向偏置电压作用下被分开, 并分别向探测器两极漂移, 在像素收集电极上产生电脉冲信号; 最后, 通过读出芯片对电脉冲信号进行读取。电脉冲信号的强度与沉积能量成正比关系, 使得可以通过电脉冲信号来判断质子能量。由于不需要经过其他闪烁体的转化, 该探测器具有非常高的灵敏度、量子效率以及最大化的空间分辨率, 非常适合低质子产额的实验诊断。该探测器具有 3 种测量模式: 计数模式(Counting)、到达时间模式(TOA)、时间过阈模式(TOT)。其中, 时间过阈模式可以同时记录能量和位置信息。实验诊断采用时间过阈模式(可以同时记录能量和位置信息), 通过统计来获取质子能谱和产额信息。

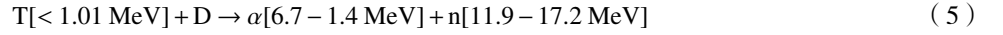
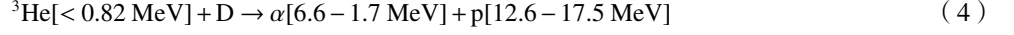
实验打靶过程中还会产生大量 X 射线和电磁辐射场等干扰信号。为了屏蔽 X 射线干扰, 在探测器感应前覆盖了厚 $100 \mu\text{m}$ 的 Ta 膜, 该厚度的选择满足实验产生的 D³He 质子信号的透过以及对 X 射线足够强的衰减。为了屏蔽电磁辐射场的干扰, 整个探测系统安装于一个封闭的金属盒中。

2 能谱分辨分析

在初始充有 D₂ 和 ³He 气体的靶丸内爆过程中^[11], 初级反应包括



次级反应包括



从反应方程可以看到 D³He 质子的来源主要有两种: (1) D 和 ³He 直接反应的初级 D³He 质子; (2) DD 反应产生的 ³He 再与 D 反应的次级 D³He 质子。在 D³He 质子产生的同时也伴随有 α , T, 以及初级 DD 质子等离子体的产生。

从反应方程(1)~(5)可以看到, 在 D³He 聚变反应产生质子过程中, 也伴随有 α , T, 以及初级 DD 质子等离子体的产生。其中 α 离子能量在 1.4~6.7 MeV 之间, T 离子能量约为 1.01 MeV, 初级 DD 质子能量约为 3.02 MeV。这些离子在 Ta 中的最大射程为 30 μm , 均无法穿过用于 X 射线屏蔽厚 100 μm 的 Ta 膜, 因此, 探测器上记录的只有 D³He 质子信号。

质子在磁场强度为 B 、长度为 L 的匀强磁场中偏转, 偏转半径 $R = \frac{\sqrt{2mE}}{eB}$ (m 为质子质量, E 为质子能量), 如图 3 所示。

穿过磁场区域后偏转距离为 $y = L \times \tan \frac{\theta}{2}$, 其中 (L 为磁场区域长度, θ 为偏转角度)。当 $L \ll R$ 时, $\tan \theta \approx \theta = L/R$, 于是偏转距离

$$y = \frac{L^2}{2R} = \frac{L^2}{2} \frac{eB}{\sqrt{2mE}} \quad (6)$$

通过计算探测器上束斑 s 跨度的能量范围 ΔE , 得到能量分辨为

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2s}{y \left[1 - \left(\frac{s}{2y} \right)^2 \right]^2} \approx \frac{2s}{y} = \frac{4s \sqrt{2mE}}{eBL^2} \quad (7)$$

由此可知, 随质子能量的升高, 能量分辨会变差。若要实现更强的分辨, 需要增加磁场强度和磁铁的长度。

设计的磁铁结构尺寸如图 4 所示, 最大长度为 15 cm。模拟使用质子能谱范围为 10~20 MeV, 可以覆盖 D³He 质子的整个能段且中心能量 (15 MeV) 也接近 D³He 质子的中心能量 14.7 MeV。根据式(7), 计算得到 15 MeV 质子在磁铁长度 15 cm、磁场强度 6.5 T、狭缝宽度 500 μm 的磁谱仪中的能谱分辨为 7.7%。实际上, 由于磁场有一定分布且质子经过的磁铁长度小于 15 cm, 使得分辨会比理论计算值大一点。将测量的三维磁场分布值代入 CST 电磁仿真软件中, 模拟计算了质子在系统中的传输过程, 得到的质子运动轨迹如图 4 所示。

对质子能量及其在探测器上的位置信息进行统计, 给出了质子能量与偏移距离的关系如图 5 所示。约 15 MeV 质子在探测面偏移距离约 11.8 mm, 该位置处能谱分辨约 9%。相对于狭缝宽度 (500 μm) 来说, 探测器像素 (55 μm) 对能量分辨的影响可以忽略不计。

3 实验结果

在神光激光装置上开展的内爆物理实验中, 对该诊断系统进行了初步测试。实验使用 31 束纳秒激光聚焦到

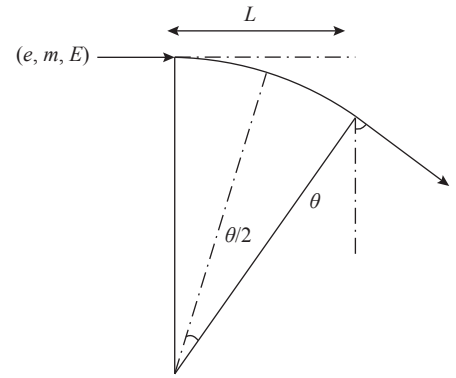


Fig. 3 Schematic of proton trace in the magnetic field

图 3 质子在磁场中偏转示意图

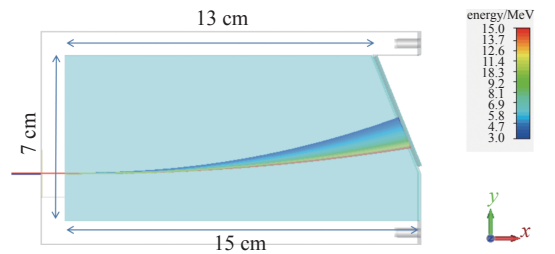


Fig. 4 Trace of proton in the magnetic spectrometer

图 4 质子在磁谱仪中的运动轨迹

玻璃薄壳靶丸上以驱动聚变反应。玻璃薄壳靶丸内充有原子比 1:1 的 D_2 和 3He 混合气体, 气体密度为 1.5 MPa。诊断获得了如图 6(a) 所示图像, 可以看到在偏转距离 11.8 mm 附近有一个长约 11 mm、宽约 1 mm 的长条形多点团簇像。通过径迹识别和提取得到团簇个数约 320 个。图 6(b) 为团簇结构的放大图, 可以看到每个团簇占据约 9 个像素, 峰值强度 8 MeV。该位置对应于模拟计算的约 15 MeV 质子在探测器上的位置, 同时团簇像长度相当于一个点源通过准直狭缝的投影像长度, 因此可以判断该图像为想要诊断的 D^3He 质子信号。在偏离位置更大的地方也获得了强度和分布类似于 D^3He 质子信号的团簇像。由于质子在穿过准直孔边缘时会散射, 因此可以判断这些团簇像为散射质子信号。在大背景环境下, 还可以看到很多点状的低强度信号, 如图 6(c) 所示。这些信号则是通过实验环境产生的 X 射线干扰信号。由于干扰信号和团簇信号在结构和强度分布上都有很大差别, 因此可以通过径迹识别来提取 D^3He 质子信号。

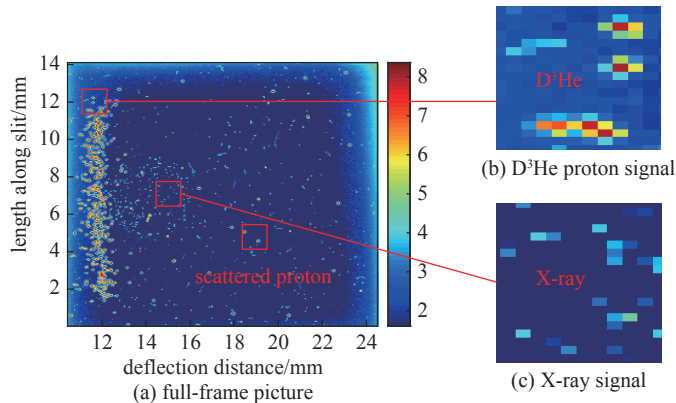


Fig. 6 Signal on the detector

图 6 实验采集到的图像

根据前面提取到的 320 个质子, 考虑质子源各项同性发射以及准直狭缝到靶点的接收立体角为 $\Omega=L \times W/D^2=1.74 \times 10^{-6}$ rad, 计算得到质子产额为 $(2.3 \pm 0.13) \times 10^9$ 。根据图 5 的能量位置关系, 处理得到如图 6(d) 所示的质子能谱数据。其中心能量为 14.6 MeV, 半高宽为 2.1 MeV。实现了 D^3He 质子能谱和产额的实时测量。

在上述实验条件下, 模拟计算燃料面密度约 1 mg/cm^2 。次级质子产额比初级质子产额小 4 个量级^[9]。探测器上记录到的质子个数约 320 个。按照次级质子与初级质子产额比例, 被探测器记录的次级质子不到 1 个, 因此可以判断测量到的是初级 D^3He 质子的能谱。

4 结 论

提出了一种用于激光聚变内爆 D^3He 质子源能谱和产额测量的在线磁谱仪诊断系统。通过磁铁结构的设计、混合像素探测器技术的研究以及屏蔽结构的设计, 成功实现了 D^3He 质子能谱和产额的在线测量。对该系统的能谱分辨进行了模拟分析, 可以实现约 15 MeV 质子小于 10% 的能谱分辨。在神光激光装置上开展实验中, 使用 31 束纳秒激光聚焦到玻璃薄壳靶丸上以驱动聚变反应, 靶丸内充有原子比 1:1 的 D_2 气和 3He 气体。实验测量得到中心能量为 14.6 MeV, 半高宽为 2.1 MeV, 产额为 $(2.3 \pm 0.13) \times 10^9$ 的初级 D^3He 质子能谱。作为原理性样机研制, 使用的探测器 (MiniPix) 尺寸较小, 二极磁铁的磁场强度较低, 限制了诊断的能谱范围和能谱分辨。

参考文献:

- [1] Zhou C D, Theobald W, Betti R, et al. High- ρR implosions for fast-ignition fuel assembly[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98: 025004.
- [2] Delamater N D, Wilson D C, Kyrala G A, et al. Use of d^3He proton spectroscopy as a diagnostic of shell ρR in capsule implosion experiments with ~ 0.2 NIF

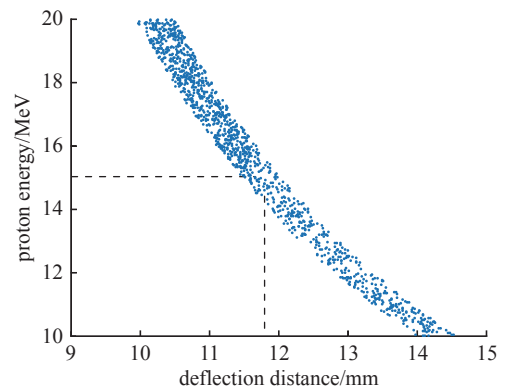
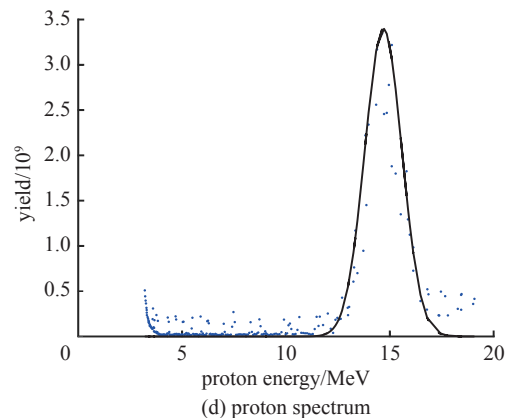


Fig. 5 Relationship of proton energy and deflection distance

图 5 质子能量与偏移距离的关系



- scale high temperature Hohlräume at Omega[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2008, 79: 10E526.
- [3] Frenje J A, Li C K, Séguin F H, et al. Diagnosing fuel ρR and ρR asymmetries in cryogenic deuterium-tritium implosions using charged-particle spectrometry at OMEGA[J]. [Physics of Plasmas](#), 2009, 16: 042704.
- [4] Goncharov V N, Sangster T C, Radha P B, et al. Performance of direct-drive cryogenic targets on OMEGA[J]. [Physics of Plasmas](#), 2008, 15: 056310.
- [5] Séguin F H, Li C K, Frenje J A, et al. Using secondary-proton spectra to study the compression and symmetry of deuterium-filled capsules at OMEGA[J]. [Physics of Plasmas](#), 2002, 9(6): 2725-2737.
- [6] Li C K, Séguin F H, Frenje J A, et al. Charged-particle probing of X-ray-driven inertial-fusion implosions[J]. [Science](#), 2010, 327(5970): 1231-1235.
- [7] 单连强, 吴凤娟, 袁宗强, 等. 激光惯性约束聚变动理学效应研究进展[J]. [强激光与粒子束](#), 2021, 33: 012004. (Shan Lianqiang, Wu Fengjuan, Yuan Zongqiang, et al. Research progress of kinetic effects in laser inertial confinement fusion[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2021, 33: 012004)
- [8] Huntington C M, Fiuza F, Ross J S, et al. Observation of magnetic field generation via the Weibel instability in interpenetrating plasma flows[J]. [Nature Physics](#), 2015, 11(2): 173-176.
- [9] Rosenberg M J, Li C K, Fox W, et al. A laboratory study of asymmetric magnetic reconnection in strongly driven plasmas[J]. [Nature Communications](#), 2015, 6: 6190.
- [10] 滕建, 赵宗清, 丁永坤, 等. 基于D³He反应产生的单能质子对ICF内爆过程的照相模拟研究[J]. [强激光与粒子束](#), 2011, 23(1): 137-140. (Teng Jian, Zhao Zongqing, Ding Yongkun, et al. Simulation of D³He fusion monoenergetic proton radiography of ICF implosions[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2011, 23(1): 137-140)
- [11] Séguin F H, Frenje J A, Li C K, et al. Spectrometry of charged particles from inertial-confinement-fusion plasmas[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2003, 74(2): 975-995.
- [12] Teng Jian, Zhang Tiankui, Wu Bo, et al. DD proton spectrum for diagnosing the areal density of imploded capsules on Shenguang III prototype laser facility[J]. [Chinese Physics B](#), 2014, 23: 075207.
- [13] Seguin F H, Sinenian N, Rosenberg M, et al. Advances in compact proton spectrometers for inertial-confinement fusion and plasma nuclear science[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2012, 83: 10D908.
- [14] Zhang Xing, Zheng Jianhua, Yan Ji, et al. The application of proton spectrometers at the SG-III facility for ICF implosion areal density diagnostics[J]. [High Power Laser Science and Engineering](#), 2015, 3: e28.
- [15] 伍波, 苏明, 滕建, 等. 内爆初级质子能谱直接测量方法[J]. [强激光与粒子束](#), 2014, 26: 122002. (Wu Bo, Su Ming, Teng Jian, et al. Directly measuring DD-produced proton spectra in ICF implosion[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2014, 26: 122002)