

激光等离子体中子发射研究

潘成明 张树干 朱大庆

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1982年7月21日收到

提 要

本文研究了脉宽(FWHM)为毫微秒量级、功率为 10^{10} 瓦、 10^{11} 瓦的单束和脉宽为毫微秒、亚毫微秒的六束四种激光核聚变装置上,激光辐照含氘热核材料平面靶、微球靶和充气氘(D_2)玻壳微球靶中子发射特性。

一、引 言

激光等离子体中子辐射特性研究是激光核聚变研究工作的一项重要内容。本文报道了用BF₃中子探测器和中子飞行时间闪烁谱仪测量在脉宽(FWHM)为4毫微秒、输出能量为30—60焦耳;脉宽为2毫微秒、输出能量为300—500焦耳的单束和脉宽为2毫微秒、输出能量为50焦耳/束(六束总输出能量约300焦耳);脉宽为100微微秒、输出能量为10焦耳/束(六束总输出能量约60焦耳)的六束钽玻璃激光装置上,激光辐照氘化聚乙烯(CD₂)、平面靶、微球靶,氘化锂LiD,氘冰D₂平面靶和充气氘玻壳微球靶的中子发射特性。比较和分析了四种激光装置的实验结果,并给出一些可能的解释。

二、激 光 器

四种激光核聚变装置均在文献[1—4]中报道过。激光器的综合性能如表1所示。

表1 四种激光核聚变装置性能

激光装置编号	1	2	3	4
总功率(瓦)	$0.2-2 \times 10^{10}$	2×10^{11}	$\sim 1.5 \times 10^{11}$	6×10^{11}
激光束数	1	1	6	6
脉宽(毫微秒)	4	2	2(1—4可调)	0.1
输出能量(焦耳)	30—60	300—500	~ 50 /束	5—10/束
光束发散角(全角)(毫弧度)	< 1	0.3	0.4	0.5
超前荧光能量(毫焦耳)	< 2.0	—	1/束	< 1
波长(微米)	1.06			

三、中子探测器

实验中,使用 BF_3 中子探测器^[5]和中子飞行时间闪烁谱仪测量激光等离子体的中子辐射。

为提高探测效率, BF_3 中子探测器探头由 16 个经测试挑选性能一致的 SZJ-1 型 BF_3 正比计数管并联而成。有效接收面积为 56×32 厘米²。前方有 2 厘米、后方有 4 厘米石蜡慢化激光等离子体氘氙反应释放出的 2.45 兆电子伏快中子。慢化后的热中子为 BF_3 正比计数管接收,经前置放大器到示波器上显示计数。

该探测器采用 Po-Be 中子源、中国科学院物理研究所等离子体焦点脉冲中子源和在复旦大学 2.5 兆电子伏质子静电加速器上标定。为了适应激光等离子体总体物理实验的需要,其中加速器标定又分别采用定标器计数和示波器拍照两种不同的记录方法。所有标定方法,结果基本自洽(见表 2)。

表 2 BF_3 中子探测器标定结果

探头	1 #				2 #				3 #				4 #			
标定方法	Po-Be	等 离子体 焦点	加速器		Po-Be	等 离子体 焦点	加速器		Po-Be	等 离子体 焦点	加速器		Po-Be	等 离子体 焦点	加速器	
	中子 源		定 标 器 记 录	示 波 器 记 录	中子 源		定 标 器 记 录	示 波 器 记 录	中子 源		定 标 器 记 录	示 波 器 记 录	中子 源		定 标 器 记 录	示 波 器 记 录
效率	$(3.5 \pm 0.4)\%$	$(2.3 \pm 0.6)\%$	—	$(2.6 \pm 0.2)\%$	$(2.9 \pm 0.3)\%$	$(2.0 \pm 0.7)\%$	$(2.2 \pm 0.1)\%$	$(2.2 \pm 0.1)\%$	—	—	$(3.1 \pm 0.2)\%$	$(3.0 \pm 0.2)\%$	—	—	$(2.2 \pm 0.1)\%$	$(2.0 \pm 0.1)\%$

中子飞行时间闪烁谱仪效率高,时间响应快。不仅可以测量中子通量,而且可以测定中子飞行时间能谱和中子发射时间特性。从而获得激光等离子体核反应特性、离子温度等各种信息。

该探测器由前 $\phi 78$ 毫米、后 $\phi 56$ 毫米、厚 90 毫米锥形 ST-401 型塑料闪烁体,加上 56 AVP 或 R 1246 快速响应光电倍增管组成。探头正面外包 10 毫米(在 10^{11} 瓦单束激光装置上为 35 毫米)、侧面 5 毫米厚的铅筒以防止激光等离子体产生的 X 射线的干扰。为了保证激光等离子体发射的快中子能量都能损耗在闪烁体中,从而有最大的光能输出,我们曾对闪烁体的最佳厚度作了理论计算,计算结果为 86 毫米,我们取为 90 毫米。

该探测器曾在复旦大学 2.5 兆电子伏质子静电加速器上作探测器灵敏度刻度;将 YAG 锁模激光器输出的脉宽为 50 微微秒的激光脉冲经倍频成波长为 5300 埃的激光束,用它作为 δ 光源标定光电倍增管时间响应^[6];利用六束亚毫微秒激光装置辐照金属靶,所产生的约 100 微微秒的 X 射线脉冲作为 δ 光源标定整个谱仪(包括闪烁体、光电倍增管、传输电缆和记录系统)的时间响应;用脉宽为 30 毫微秒、波长为 5300 埃的激光对谱仪动

态线性输出范围作了测量。结果见表 3。

表 3 闪烁体谱仪标定结果(工作电压—2400 伏)

单个中子平均输出电荷(库仑/个)	$6.4 \times 10^{-11} (\pm 29\%)$	
响应时间	上升时间(毫微秒)	1.7 ± 0.2
	FWHM (毫微秒)	3.2 ± 0.4
线性输出电荷(库仑)	$(4.8 \pm 0.4) \times 10^{-9}$	

BF_3 中子探测器和中子飞行时间闪烁谱仪在靶场的布局见图 1。在 10^{10} 瓦单束装置上, BF_3 探测器离靶为 50 厘米、闪烁谱仪离靶为 7 厘米到 29 厘米; 在 10^{11} 瓦单束装置上, BF_3 探测器离靶 42 厘米, 闪烁谱仪离靶为 12 厘米到 118 厘米; 在六束毫微秒和亚毫微秒装置上, BF_3 探测器离靶均为 65 厘米, 闪烁谱仪离靶分别为 30 厘米和 25 厘米。

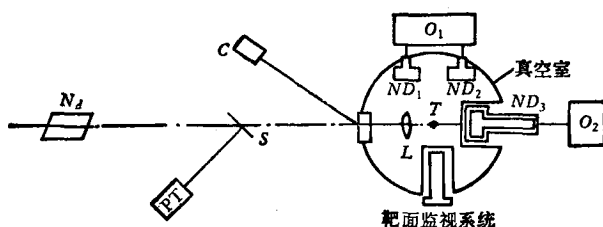


图 1

N_d ——末级输出器件; S ——分光镜; PT ——触发示波器扫描光二极管; C ——测量能量碳斗; L ——打靶透镜; T ——靶; ND_1, ND_2 —— BF_3 中子探测器; ND_3 ——中子飞行时间闪烁谱仪; O_1 ——OK-17 示波器; O_2 ——快速响应示波器

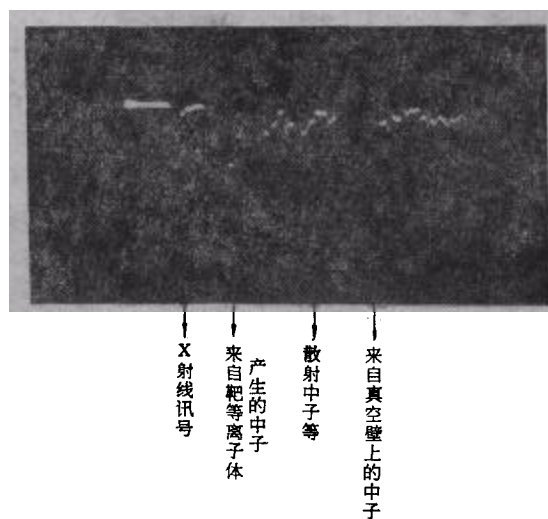
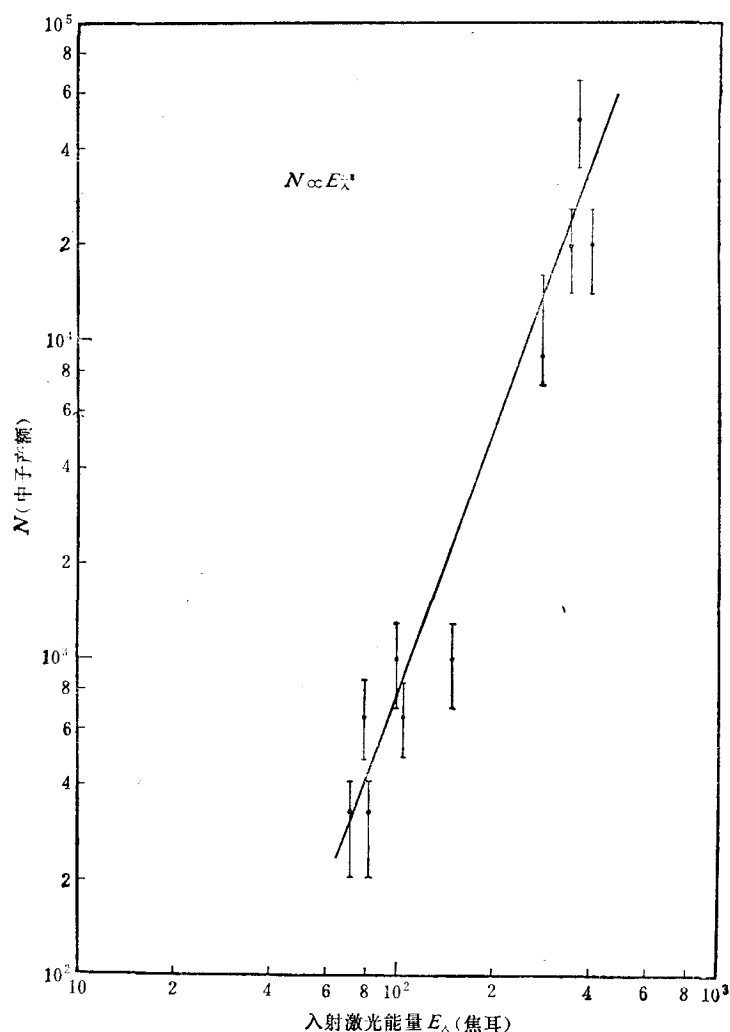


图 2 在 10^{11} 瓦单束激光装置上, 闪烁谱仪离开靶 (CD_2)₄₂ 厘米记录到的中子讯号波形 中子产额为 2.9×10^6 /脉冲[水平扫描速度 50 毫微秒/格、垂直灵敏度 8.5 伏/格]

四、实验结果

在功率为 10^{10} 瓦单束激光装置上,激光辐照氘化锂 LiD 平面靶,在正确调焦的情况下,激光能量为 40 到 55 焦耳,探测器能记录到中子的打靶几率为 $1/3$,能量大于 55 焦耳可以获得稳定的中子输出,中子产额为 10^2 量级.激光辐照氘冰靶,中子产额为 10^3 量级.

在功率为 10^{11} 瓦单束激光装置上,激光辐照氘化聚乙烯 $(\text{CD}_2)_n$ 平面靶, BF_3 中子探测器和闪烁谱仪记录到的中子讯号强度大幅度增长. 当把闪烁谱仪从 12 厘米拉到 42 厘米再至 84 厘米和 118 厘米时,均接收到中子讯号. 中子讯号照片见图 2. 照片中的第一个峰值中子讯号的飞行时间和靶内激光等离子体 D-D 反应产生的 2.45 兆电子伏中子能量飞行时间相对应. 中子产额为 2.9×10^4 /脉冲. 总的产额 N 和对应的激光器入射到



靶上的能量 E_λ 的结果见图 3, 它们之间的关系为 $N \propto E_\lambda^{2.8}$. 该装置上 BF_3 探测器记录到的中子讯号见图 4.

在毫微秒六束激光装置上, 激光辐照 $(\text{CD}_2)_n$ 微球靶, 两种探测器记录到的中子产额为 10^3 /脉冲量级. 结果见表 4. 激光辐照充气玻璃壳微球靶, 两种探测器均未记录到中子讯号. 从 X 射线针孔照相的底片来看, 也未见到与中子发射相对应的“压缩”.

在亚毫微秒六束装置上, 激光辐照 $(\text{CD}_2)_n$ 微球靶, 中子产额为 10^2 /脉冲量级. 实验结果见表 4. 为了准确定标中子的飞行时间, 我们有意识地在中子探测器的 X 射线屏蔽

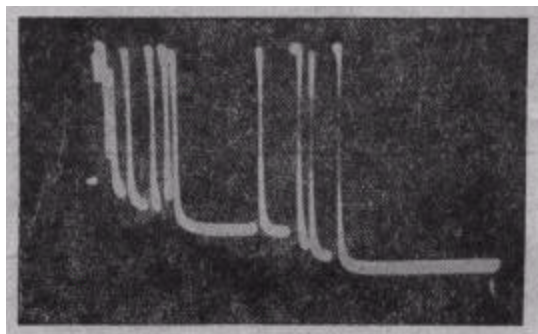


图 4 在 10^{11} 瓦单束装置上, 激光辐照氘化聚乙烯靶 $(\text{CD}_2)_n$, BF_3 探测器记录到的中子讯号[水平扫描速度 500 微秒/满屏]

筒的中央开一 $\phi 5$ 毫米的小孔, 以便让激光等离子体产生的 X 射线部分地进入探测器, 作为时间标记用. 例如图 5 在亚毫微秒六束装置上拍摄的中子讯号照片, 根据光路延迟、探头离靶的距离、探头的讯号渡越时间、电缆线长度可算出激光等离子体发射的 X 射线相对于激光延迟为 58.9 毫微秒, 实验值为 58 ± 2 毫微秒, 二者一致. 中子探头离靶 25 厘米, 中子讯号相对于 X 射线延迟理论值为 11 毫微秒, 实验值为 11 ± 2 毫微秒, 也完全一致.

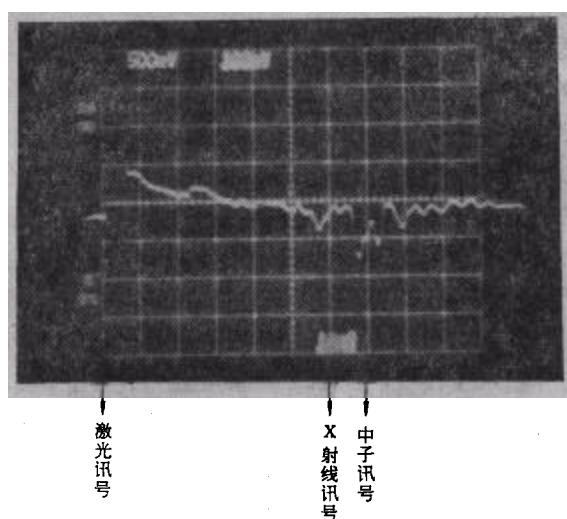


图 5 在亚毫微秒六束激光装置上, 激光辐照 $(\text{CD}_2)_n$ 微球靶, 闪烁谱仪记录到的中子讯号 中子产额为 4×10^2 /脉冲[扫描速度为 10 毫微秒/格, 垂直灵敏度为 1 伏/格]

表 4 毫微秒和亚毫微秒六束装置中子发射实验结果比较

激光装置	毫 微 秒							亚 毫 微 秒							
束数	6							4					2		
总输出功率 (10^{10} 瓦)	18.3	11.3	10.9	9.6	22.7	15.5	1.8	54.5	34.1	25.4	31.0	30.0	34.5	8.3	10.6
总输出能量 (焦耳)	366.1	226.1	218.5	192.3	254.8	311.1	35.2	54.5	34.1	25.4	31.0	30.0	34.5	8.3	10.6
脉宽	~2 毫微秒							~100 微微秒							
靶尺寸 (微米)	$\phi 55$	$\phi 95$	$\phi 95$	$\phi 100$	$\phi 100$	$\phi 105$	$\phi 120$	$\phi 95$	$\phi 290$	$\phi 340$	$\phi 353$	$\phi 90$	$\phi 523$	$\phi 560$	$\phi 660$
中子产额	$\sim 10^3$	$\sim 10^3$	$\sim 10^3$	$\sim 10^3$	$\sim 10^3$	$\sim 2 \times 10^3$	$\sim 2 \times 10^3$	2.5×10^2	2.5×10^2	2.5×10^2	2.5×10^2	4×10^2	2.5×10^2	8.0×10^2	8.5×10^2

注: 表中的靶均为氘化聚乙烯 (CD_2)_n 微球靶

在该装置上,激光辐照充气玻璃壳微球靶,结果和毫微秒六束装置一样,两种探测器均未接收到中子讯号,X射线针孔照相底片,也没有见到相应的“压缩”。

五、分析讨论

1. 从四种激光等离子体装置所获得的中子讯号结果来看,它们有明显的下列特性:

1) 中子脉冲讯号宽度显著大于激光脉冲宽度。在功率为 10^{11} 瓦的单束装置上,达 50 毫微秒(见图 2)。

2) 从中子讯号的飞行时间看,除了来自等离子体 D-D 反应能量为 2.45 兆电子伏的第一个大脉冲中子讯号外,还有延迟的脉冲中子讯号。其幅度有大有小,大的可与第一个大脉冲讯号(图 2)相比拟。

3) 尽管亚毫微秒脉宽的六束激光装置和毫微秒六束装置的功率相当,但激光辐照氘化聚乙烯 (CD_2)_n 微球靶的中子产额,前者明显低于后者。

4) 实验中,我们发现两种探测器的结果按中子发射各向同性计算总的中子产额,多数情况会出现明显的不一致,而且两种探测器的结果没有恒定的比例关系。

对于上述中子发射的第一个特性,我们认为可能是这样的:在激光主脉冲到来之前,由于激光器的超前荧光辐射引起靶的表面汽化并产生一个低密度的“冷”的等离子体云。当激光主脉冲到达靶上时,在激光功率密度 I 超过阈值时,激光辐照氘化聚乙烯靶,在临界密度面和 $1/4$ 临界密度面之间会激发起参量不稳定性。根据 Shearer 等人的计算^[5],阈值强度估计为 6×10^{12} 瓦/厘米²,在我们的 10^{11} 瓦单束激光装置上,其功率密度为 10^{14} — 10^{15} 瓦/厘米²,比起阈值强度高出二到三个量级,显然能激发起这种参量不稳定性,产生高能电子和离子,这些电子、离子大部分向外喷射,由于电子质量比离子质量小得多,因此电子跑在离子前面并建立静电场。当氘离子通过电场被静电加速,能量明显提高,这些氘的快离子经过预先形成的在靶周围的等离子体云碰撞产生 $\text{D(d, n)}^3\text{He}$ 反应。实验中,用法拉第筒测得氘的快离子速度为 $\sim 10^8$ 厘米/秒即能量在 10 千电子伏以上,因而反应有足够

大的截面。同时,靶周围低密度等离子体云厚度估计为 5 厘米^[8],根据简单公式

$$t = L/v_{if},$$

式中 L 为氖离子飞行距离, v_{if} 为氖的快离子速度,就可算出氖的快离子通过低密度等离子体云的飞行时间 t ,显然

$$t = L/v_{if} \approx 5/10^8 = 50 \text{ 毫微秒}.$$

这我们的实验值是一致的。

延迟中子主要两个来源:

(1) 对于中子讯号脉冲幅度和来自靶等离子体中子讯号脉冲幅度相似的那些延迟中子,可能主要来自激光等离子体的氖的快离子轰击附着在真空壁上的氖核产生的,由于中子飞行距离长,到达探头的时间也延长。

(2) 对于较弱的中子脉冲讯号,估计激光等离子体产生的中子可能通过次级散射源,如真空靶室中的靶架、透镜及其他探测元件散射形成的。在一般情况下,次级散射的中子要比 D-D 反应直接产生的中子脉冲幅度低。

亚毫微秒和毫微秒六束装置,尽管总的输出功率差不多,但是中子产额前者为 10^2 /脉冲量级,后者为 10^3 /脉冲量级,两者相比差得多。D-D 反应中子产额 N 的表达式^[9]为

$$N = \int_v \int_t \frac{1}{2} n_D^2 \langle \sigma v \rangle dt dv,$$

其中

$$\langle \sigma v \rangle = 2.6 \times 10^{-14} T_i^{-2/3} \exp[-18.76 T_i^{1/3}] \text{ 立方厘米} \cdot \text{秒}^{-1},$$

T_i 的单位为千电子伏。由此式可知,中子产额 N 与激光等离子体的加热时间 t 有一定的关系,在同样的离子温度 T_i 的条件下,亚毫微秒的六束装置比起毫微秒六束装置加热等离子体时间要短,因此积分的中子产额也低。另外,中子产额的大小和被吸收的激光能量关系很大,尽管两者功率差不多,但亚毫微秒装置比起毫微秒装置的输出能量小得多(约一个量级),因此中子产额也要低。

对于上述中子发射的第四个特性,说明中子发射不完全是各向同性的。显然,这是由于束-靶产生的中子的结果。由上可知,我们记录到的中子讯号基本上还是非热核中子。

2. 激光辐照氖化锂 (LiD) 和氖冰 (D_2) 靶实验,中子产额差一个量级,这和 Causo 等人的理论^[10]是一致的。

3. 在 10^{11} 瓦单束激光装置上,虽然中子飞行时间闪烁谱仪前方有 10 毫米、侧面 5 毫米厚的铅筒屏蔽激光等离子体产生的 X 射线,但是探测器仍接收到 X 射线讯号(见图 2)。后来把前方 10 毫米厚铅层增加到 35 毫米,才消除了这个讯号。这可能是由于参量离子声不稳定性引起的。在激光泵浦场作用下,入射的电磁波频率 ω_0 被耦合成为电子等离子体波频率 ω_{e-p} 和离子声波频率 ω_{i-s} ,即

$$\omega_{ia} = \omega_0 - \omega_{e-p}.$$

这两种等离子体在激光波的激励下不断增长且达到很大的强度,使得其中一些高能电子被加速,通过韧致辐射产生高能 X 射线,致使其穿透铅层进入中子探头。

本工作是与我所 10^{10} 瓦、 10^{11} 瓦单束和毫微秒及亚毫微秒六束激光装置全体人员共同合作完成的。郭景芳、聂朝江、林尊琪等同志也参加了部分工作。感谢滕永禄同志对本文提出的有益建议。

参 考 文 献

- [1] 徐至展等, 激光, **5** (1979), 12.
- [2] Deng Ximing and Yu Wenyan, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **QE-17**(1981), 1650.
- [3] 徐至展等, 物理学报, **29**(1980), 439.
- [4] 邓锡铭等, 光学学报, **1**(1981), 289.
- [5] 潘成明等, 核聚变与等离子体物理, 待发表.
- [6] 潘成明、朱大庆, 核电子学与探测技术, (4)(1982), 23.
- [7] S. Glasstone, R. M. Loverg, Controlled Thermonuclear Reactions.
- [8] J. I. Katz, *Appl. Phys. Lett.*, **6**(1973), 342.
- [9] F. Floux, *Nuclear Fusion*, **11**(1971), 637.
- [10] A. Caruso, R. Gratton, in Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi" Course XLVIII Edited by P. Calolirola.

INVESTIGATION ON NEUTRON EMISSION FROM LASER-PLASMAS

PAN CHENG-MING ZHANG SHU-GAN ZHU DA-QING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The characteristics of neutron emissions from laser-plasmas have been studied. Targets in the form of plane and spherical pellet were made of thermonuclear material containing deuterium, and irradiated by single beam laser system with pulse duration of the order of ns and six-beam laser systems with pulse duration of the order of ns and sns respectively.