

激光加热充氖靶丸的压缩实验研究

何绍堂

西南核物理与化学研究所, 成都, 610003

张覃鑫

北京应用物理与计算数学研究所, 北京, 100088

杨向东 丁耀南 成金秀

西南核物理与化学研究所, 成都, 610003

1989年3月27日收到

在神光 (10^{12} W) 激光器上, 用充 Ne 靶丸开展了内爆压缩实验研究。结果表明: 实现了激光加热靶丸的对称性内爆压缩, 芯部电子密度达 10^{23}cm^{-3} , 平均内爆速度为 $3.3 \times 10^7\text{cm/s}$ 。

PACC: 0630E; 5270; 3270; 5200

一、引言

在惯性约束聚变 (ICF) 实验研究中, 最重要的一项工作就是爆推型靶的压缩实验研究。它是用多路(至少两路)脉冲激光直接加热含有聚变燃料的球型靶丸, 使燃料受到加热和压缩而引起聚变反应, 通过诊断内爆压缩的各种现象, 开展内爆压缩物理的研究。因为这一研究能提供大量的物理信息, 如等离子体电子温度、电子密度、中子产额、压缩的对称性和均匀性, 以及压缩的流体动力学特性等。通过这一研究, 可以帮助我们加深对惯性约束聚变物理的了解, 从而不断改进和创造条件, 促进可控聚变堆的早日实现。

从 70 年代中期以来, 国外很多实验室开展了大量的爆推型靶的内爆压缩实验研究。我们在神光 (10^{12} W) 激光装置上, 开展了聚变靶的压缩实验研究, 实现了对称性内爆压缩, 芯部电子密度为 10^{23}cm^{-3} , 平均内爆速度达 $3.3 \times 10^7\text{cm/s}$ 。

二、实验条件与诊断方法

实验是在神光激光装置上完成的。这是一台双束钕玻璃 ($1.06\text{ }\mu\text{m}$) 高功率脉冲激光器。实验中从南、北两路输出两束脉冲激光, 两束激光脉冲的时间同步偏差小于 10 ps, 每束激光能量为 15—100 J, 两束输出能量相差值与它们的平均能量相比在 1—28% 内变化, 激光脉冲宽度约为 100 ps, 信噪比为 10^4 — 10^7 , 采用 $f/1.7$ 透镜聚焦, 靶面焦斑直径约为 120 μm 。

实验中使用的玻璃微球壳靶直径为 80—106 μm , 靶的壁厚为 0.7 μm , 球壳的偏心度为 6.7—10%, 球壳内充 Ne 气, 压力约为 $6.08 \times 10^5 \text{ Pa}$.

实验中, 用 X 射线针孔相机诊断压缩的对称性和体压缩比. 针孔直径为 16 μm , 用 10 μm 厚的 Ta 箔加工而成. 用天津 II 型 X 射线探伤胶片记录 X 射线象. 胶片前面用镀 Al (360 nm 厚) 塑料膜 (2 μm 厚) 作挡光层. 实验中使用了两台针孔照相机, 都安装在与激光光轴垂直的平面上. 一台物距 1.7 cm, 象距 20 cm; 另一台物距 0.8 cm, 象距 7.6 cm.

一台 X 射线条纹相机用于测量内爆压缩的动力学特性. 条纹相机的分辨时间为 15 ps, 响应能区为 1—10 keV. 条纹相机前加了一个直径为 20 μm 的针孔. 针孔距靶球为 3.5 cm, 距象机窄缝为 46.5 cm. 由于窄缝有一定的宽度, 图象的分辨时间为 41 ps, 空间分辨为 20 μm . 实验中最困难的是针孔位置的调节, 因为要调到窄缝-针孔-靶丸在同一直线上, 条纹相机安装在与激光光束成 90° 的方向上, 是用激光经纬仪进行瞄准观察.

使用了两台晶体谱仪测量等离子体的 X 射线谱. 一台安装在与激光光束成 60° 的方向上, 使用 RAP ($2d = 2.612 \text{ nm}$) 平面晶体, 覆盖波长范围为 0.49—1.2 nm, 用于测量

玻璃 (Si 和 Na) 壳发射的谱线. 另一台安装在与激光光束成 85° 的方向上, 使用 KAP ($2d = 2.6632 \text{ nm}$) 平面晶体, 覆盖波长范围为 0.75—1.3 nm, 主要用于测量 Ne 等离子体的线发射. 晶体尺寸: 长为 48 mm, 宽为 10.5 mm, 厚为 1.5 mm. 经晶体衍射的 X 射线用 Kodak

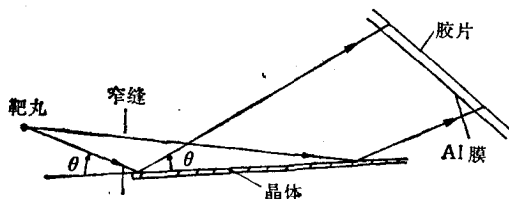


图1 晶体谱仪结构示意图

AA-5 无屏胶片进行记录. 胶片暗盒前用两层 400 nm 的 Al 膜挡去可见光. 晶体谱仪结构示意图见图 1.

X 射线在晶体上衍射服从 Bragg 衍射定律

$$k\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

式中 λ 为波长; k 为衍射级数; $2d$ 为晶格常数; θ 为 X 射线与晶体平面的夹角, 即衍射角.

用分析获得的 X 射线谱, 可以求得等离子体的电子温度和压缩后的电子密度.

三、实验结果

1. 压缩的对称性

针孔照相获得的胶片感光密度的分布径迹, 能说明压缩的对称性. 图 2 是 2118 号打靶获得的密度径迹. 从图 2 看出, 这一发打靶压缩基本上是对称的.

2. 体压缩比

将靶丸内 Ne 气的初始体积和被压缩后的体积之比定义为体压缩比. 记体压缩比为 σ , 有

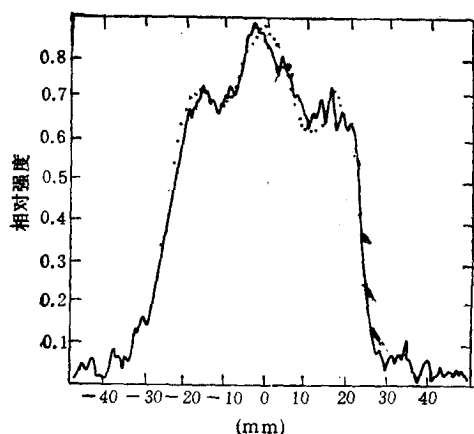


图2 2118号打靶获得的针孔照片的密度, 分布和模拟结果 读数时横坐标放大50倍;
——为实验; ...为拟合

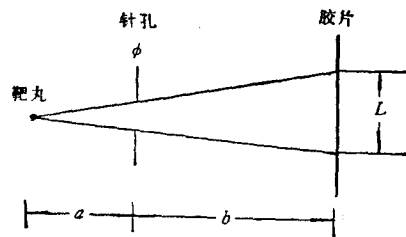


图3 针孔使象展宽

$$\sigma = V_0/V, \quad (2)$$

式中 V_0 为初始体积, 由靶丸直径和壁厚的测量给出. V 为压缩后的体积, 由针孔照相的密度径迹的中心峰的 FWHM 给出.

针孔照相的密度径迹图中, 有三个峰. 可以认为边缘峰是玻璃球壳的 X 射线形成的, 中心峰是受压缩后的 Ne 等离子体的 X 射线形成的. 实验证明, 压缩得越紧, 两边缘峰与中心峰的重叠越严重. 采用重峰解析法求出了中心峰的轮廓, 然后获得了 FWHM 值. 重峰解析用三个高斯分布函数叠加的数值拟合. 对 2118 号打靶, 得到密度分布函数为

$$f(x) = 0.64 \exp\{ -[(x+18)^2/2 \cdot 6.5^2] \} + 0.84 \exp[-x^2/2 \cdot 7.9^2] \\ + 0.67 \exp[-(x-19)^2/2 \cdot 6.3^2].$$

由此得出中心峰的半极大值的全宽度为 18.56 mm. 因为密度计读数时放大 50 倍, 换算后的半极大值全宽度为 0.371 mm.

针孔的大小为直径 $16 \mu\text{m}$, 对象有一定的展宽. 见图 3 的分析, 得出展宽数值为 $L = \phi \frac{a+b}{a} = 0.16 \text{ mm}$. 针孔照相放大倍数为 9.5 倍. 扣除此两个因素后, 得出中心峰即压缩后 Ne 的直径为 $21.36 \mu\text{m}$.

$$\text{由以上分析, 求得体积压缩比 } \sigma = \left(\frac{87.6}{21.36} \right)^3 = 68.4.$$

3. 电子温度的确定

用 Ne 的类-H 和类-He 线的强度比 R_3 来确定电子温度 T_e .

$$R_3 = I(1s-3p)/I(1s^2-1s^23p) = \frac{A_{1-3}^{\text{H}}(h\nu) \cdot N_{3p}^{\text{H}}}{A_{1-3}^{\text{He}}(h\nu) \cdot N_{3p}^{\text{He}}}, \quad (3)$$

式中 I 为谱线强度; A 为爱因斯坦系数; N 为跃迁的上能级离子数密度; H 和 He 分别代表类-H 和类-He; $h\nu$ 代表发射 X 射线.

近似地认为系统处于热平衡状态. 此时可以用波耳兹曼分布和萨哈公式将 (3) 式变

换为

$$R_s \approx 3(N_i^{+10}/N_i^{+9})\exp(-0.029/T_e), \quad (4)$$

式中 T_e 以 keV 为单位; N_i^{+10}/N_i^{+9} 为 Ne 的类-H 和类-He 离子数密度之比, 可以用日冕模型进行计算. 我们未进行计算, 直接采用 Yaakobi 等人^[4]计算的曲线(见图 4)来确定电子温度 T_e . 图 5 是用晶体谱仪获得的 2118 号打靶的谱线. 从图 5 得到 $I(1s-3p)/I(1s^2-1s3p) = 4.17$, 由图 4 求得电子温度 $T_e = 375\text{eV}$.

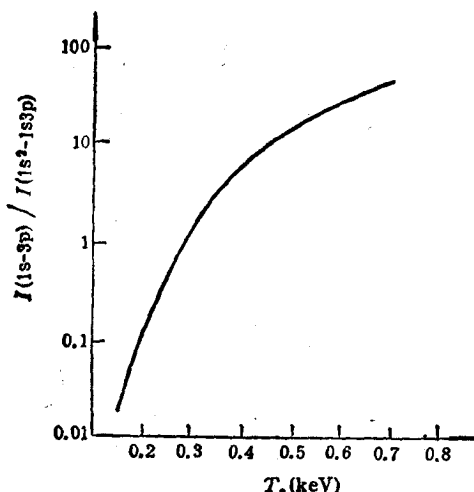


图 4 线强度比与电子温度的关系

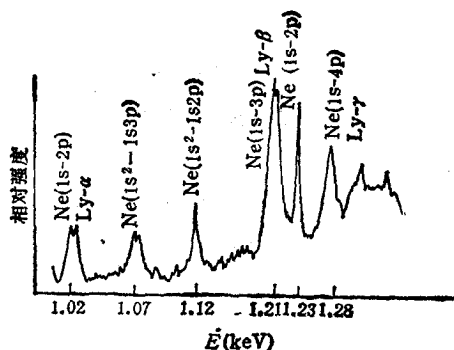


图 5 充 Ne 靶丸发射的 X 射线谱 2118 号

4. 电子密度的确定

用谱线轮廓的加宽来确定电子密度. 从图 5 看出, Ne 的 Lyman 线 (Ly- α (1s-2p), Ly- β (1s-3p), Ly- γ (1s-4p)) 明显地比 Na 线的线形要宽得多, 这是由于稠密等离子体的 Stark 加宽和 Doppler 加宽引起的. 在激光压缩实验研究中, 国外普遍使用谱线形状的理论模拟来求压缩后的电子密度^[1-5], 我国侯氢、李家明^[6]也作了这方面的理论工作. 我们在获得本实验的数据后, 也进行了数值模拟工作. 我们采用文献[5]的思想, 在给定电子温度和电子密度的条件下, 给出了类氢离子的 Lyman 线系的前 4 条线, 即 Ly- α , Ly- β , Ly- γ 及 Ly- δ 的 Stark 线型公式, 并考虑了离子的 Doppler 效应的影响, 从而得到了等离子体发射谱线线型公式. 在数值模拟中, 使用的微观电场分布函数是根据文献[4]的方法计算的. Stark 加宽的线型公式是根据电子碰撞近似和离子准定态线性 Stark 效应得到的. 图 6 和图 7 给出 Ly- γ 线和 Ly- β 线的数值模拟结果, 由此获得的电子密度为 $N_e = 10^{23}\text{cm}^{-3}$. 假设 Ne 气加热后, 每个原子平均剥离出 8.5 个电子, 而靶丸内充气压力为 $6.08 \times 10^5\text{Pa}$, 求得压缩度为 72.7.

从图 5 看出, Ly- α 线出现双峰, 中心出现下沉, 用我们的计算模拟不能解释, 这是因为等离子体的自吸收形成的, 这种现象称为线的自反向 (self-reversal). 要对自反向线进行数值模拟, 还应考虑高密度等离子体的自吸收.

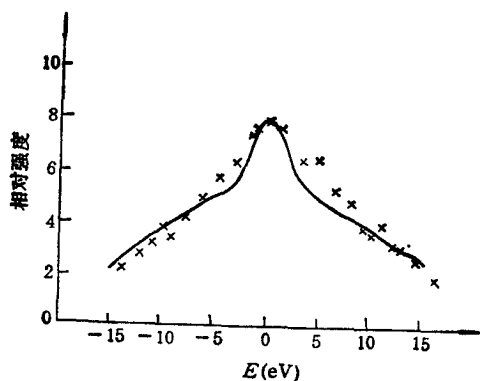


图6 Ly- γ (9.7 Å) 线的理论模拟(实线)与实验结果(×)
 $T_e = 400\text{eV}$; $N_e = 10^{23}\text{cm}^{-3}$

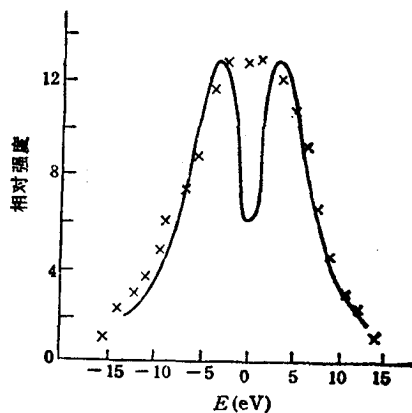


图7 Ly- β (10.239 Å) 线的理论模拟(实线)与实验结果(×) $T_e = 400\text{eV}$; $N_e = 10^{23}\text{cm}^{-3}$

5. 内爆速度的确定

由条纹相机针孔照相的照片分析得出内爆时间为 150 ps, 平均内爆速度为 $3.3 \times 10^7 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

四、结 论

在神光激光器上,进行了激光加热充 Ne 靶丸的压缩实验研究,获得了较好的结果。表 1 给出三发打靶的数据。这些数据,使我们加深了对内爆动力学的了解。

表1 三发打靶获得的结果

打靶号	球壳尺寸 $\phi(\mu\text{m})$	充氖压力 (Pa)	靶面激光 能量 南/北(J)	激光脉 冲宽度 (ps)	体压缩 比 σ	电子温度 T_e (eV)	平均内 爆速度 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	芯部电子 密度 Ne (cm^{-3})
2118	89	6.08×10^8	32.0/30.7	~100	68.4	375	3.3×10^7	1×10^{23}
2220	89	6.08×10^8	41.9/47.9	99	50.1	425	/	0.8×10^{23}
2425	101	6.08×10^8	47.7/51.1	94	57.3	380		0.9×10^{23}

本工作得到郑志坚副研究员的指导和支持。本所 208 室和 209 室制备了靶,中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室提供了激光器的运行。在此表示感谢。

本实验于 1986 年 12 月在上海神光装置上完成。

- [1] B. Yaakobi *et al.*, *Phys. Rev.*, **A19**(1979), 1247.
- [2] H. R. Griem *et al.*, *Phys. Rev.*, **A19**(1979), 2421.
- [3] J. D. Kilkenny *et al.*, *Phys. Rev.*, **A22**(1980), 2746.
- [4] R. J. Tighe and C. F. Hooper, Jr., *Phys. Rev.*, **A15**(1977), 1773.
- [5] B. Held *et al.*, *Phys. Rev.*, **A29**(1984), 896.
- [6] 侯 氢、李家明,物理学报, **37**(1988), 1972.

COMPRESSION EXPERIMENTS OF NEON-FILLED GLASS MICROBALLONS IRRADIATED BY TWO 1.06 μ m LASER BEAMS

HE SHAO-TANG

Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu, 610003

ZHANG TAN-XIN

Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100088

YANG XIANG-DONG DING YAO-NAN CHENG JIN-XIU

Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu, 610003

(Received 27 March 1989)

ABSTRACT

The compression experiments with neon-filled microballoons were performed using Shengguang (10^{12} W) neodymium glass laser facility. The results showed that the laser-driven implosion compression ratio was about 70, the electron density reached 10^{23} cm $^{-3}$, the averaged implosion velocity was about 3.3×10^7 cm/s.

PACC: 0630E; 5270; 3270; 5200