

利用 x 射线激光干涉诊断等离子体电子密度^{*}

王 琛¹⁾ 王 伟¹⁾ 孙今人¹⁾ 方智恒¹⁾ 吴 江¹⁾ 傅思祖¹⁾ 马伟新¹⁾
顾 援¹⁾ 王世绩¹⁾ 张国平²⁾ 郑无敌²⁾ 张覃鑫²⁾ 彭惠民²⁾ 邵 平³⁾
易 葵³⁾ 林尊琪³⁾ 王占山⁴⁾ 王洪昌⁴⁾ 周 斌⁴⁾ 陈玲燕⁴⁾ 金春水⁵⁾

¹⁾ 上海激光等离子体研究所, 上海 800-229 信箱, 上海 201800)

²⁾ 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 8009 信箱, 北京 100088)

³⁾ 上海光学精密机械研究所, 上海 800-211 信箱, 上海 201800)

⁴⁾ 上海市同济大学物理系, 上海 200092)

⁵⁾ 长春光学精密机械研究所应光室, 长春 130022)

(2004 年 3 月 4 日收到, 2004 年 5 月 15 日收到修改稿)

x 射线激光探针干涉方法是诊断高温高密度激光等离子体电子密度等信息的重要工具. 利用神光 II 装置输出激光驱动类镍-银 x 射线激光作为探针, 成功地进行了马赫-曾德尔干涉法诊断实验, 获得了清晰的包含等离子体信息的动态干涉条纹图像, 并据此给出了待测 C_8H_8 等离子体临界面附近电子密度的空间分布.

关键词: 等离子体电子密度诊断, x 射线激光, 马赫-曾德尔干涉仪

PACC: 5270, 4255V, 5270L

1. 引 言

由于 x 射线激光波长短、脉冲短、亮度高而又具有良好相干性的独特优点, 使得 x 射线激光探针方法成为诊断高温高密度激光等离子体的一种重要手段. 这种诊断, 一方面可以提供相关的等离子体信息, 更重要的是可以用来校验相应的程序, 对激光惯性约束聚变(ICF)等研究具有重要意义. 因此, 从 x 射线激光演示成功以来^[1], 就持续不断地进行着此类诊断应用的研究^[2-8].

一般来说, 激光作为探针穿越等离子体, 光束的强度、前进方向、光程都会发生变化. 采用阴影法^[2]、偏折法^[3-5]和干涉法^[6-10], 分别检测探针光束强度、方向和光程的变化, 就可以获得等离子体电子密度的相关信息. 其中, 只有干涉法能够直接得到等离子体电子密度的分布情况, 因此是最有意义的方法. 但是, x 射线激光作干涉法实施的难度很高: 一方面, 相应的光学元件, 特别是用于 x 射线激光分束的元件难以制作; 另一方面, 对 x 射线激光的光束特性,

如相干性、均匀性, 以及强度等的要求也很高.

目前, 已进行过一些干涉法诊断等离子体的实验演示, 包括利用多层膜半透半反镜分束的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)干涉法^[6]、利用掠入射光栅分束的 M-Z 干涉法^[7,8]、劳埃德(Lloyd)镜干涉法^[9]、菲涅耳双镜干涉法^[10]等. 这些实验初步演示了这种应用的可能.

本文描述了我们在采用 x 射线激光探针干涉诊断等离子体电子密度方面取得的进展. 利用类镍-银 x 射线激光作为探针, 采用多层膜半透半反镜分束的 M-Z 干涉方案, 诊断了激光辐照 C_8H_8 平面靶产生的等离子体, 获得了反映等离子体电子密度信息的清晰的干涉条纹图像, 实验给出的电子密度数值已经非常接近于驱动激光对应的临界密度.

2. 实验方案

实验在神光 II 激光装置上进行, 实验排布示意图如图 1. 利用装置南北两路预-主脉冲基频激光(波长为 λ)经柱面透镜列阵-非球面主透镜形成的均匀线

* 国家自然科学基金(批准号 69989801)和国家高技术惯性约束聚变基金(批准号 863-804-7-3)资助的课题.

聚焦 辐照两块对接的镀银玻璃平板靶 ,产生波长为 13.9nm 的类镍-银 x 射线激光 ,以此作为探针光 .其中每路驱动激光的脉冲宽度约 90ps ,能量约 100J ,预-主脉冲的强度比为 5% ,时间间隔为 3ns ;焦线长度为 18mm ,宽度为 80 μ m ,每块靶的长度为 16mm .经过仔细调节对接的两块靶的靶面间距和夹角 ,优化了驱动条件 ,最终获得的类镍-银 x 射线激光输出的能量为 400 μ J ,光束沿靶法线和靶平面的发散角分别约为 3mrad 和 7mrad .一块涂有厚 50 μ m 的 C₈H₈ 玻璃平板靶 ,位于距 x 射线激光出口约 500mm 处 ,由装置的另一路预-主脉冲基频激光线聚焦辐照产生待测等离子体 .辐照 C₈H₈ 靶的激光焦线长为 3.5mm ,宽为 450 μ m ,靶面激光辐照强度为 6 \times 10¹³ W/cm² ;焦线与水平入射的 x 射线激光光束垂直 ,因此 x 射线激光探针穿越的等离子体厚度为 450 μ m .探针经过为 500mm 的自然发散 ,对等离子体的探测范围为 1.5mm \times 3.5mm .

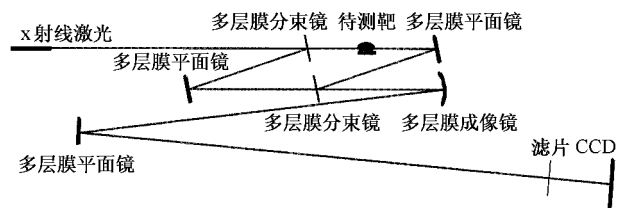


图 1 以 x 射线激光作为探针的 M-Z 干涉法诊断等离子体实验方案示意图

用于产生干涉的 M-Z 干涉仪由一对多层膜分束镜和一对多层膜平面镜组成 ,如图 1 所示 .入射的 x 射线激光经第一块分束镜分成物光(透过部分)和参考光(反射部分) .物光穿越待测等离子体 ,经平面镜反射后 ,由第二块分束镜反射 ,与经第一块分束镜和第一块平面镜反射后透过第二块分束镜的参考光汇合 .汇合后的光束再经多层膜成像镜和平面镜反射 ,在 CCD 上成像 ,形成包含着等离子体电子密度信息的干涉条纹 .系统对待测等离子体成像 ,放大倍数 3.5 ,因此对待测等离子体的空间分辨约为 5.7 μ m .实验中探针是持续时间不超过 30ps 的 x 射线激光 ,在此段时间内等离子体临界面的位置是相对“静止”的 ,因此等离子体电子密度分布的变化对干涉条纹的模糊效应基本上是可以忽略的 .

高品质的光学元件 ,特别是干涉仪中使用的分束元件是实验成功的关键 ,也是此类实验最困难的地方 .经过多年的努力 ,成功制作了相应的高品质元件 ,为实验的顺利实施创造了必要的条件 .通过激光等离子体 x 射线源和同步辐射 x 射线源的标定 ,在探针光 ,即类镍银 x 射线激光的波长 13.9nm 处 ,分束镜的透过率和反射率都分别接近 20% ,多层膜反射镜的反射率约为 30%—40% ,满足了目前诊断实验的要求 .

3. 实验结果与简单讨论

图 2 是实验中获得激光辐照 C₈H₈ 靶产生等离

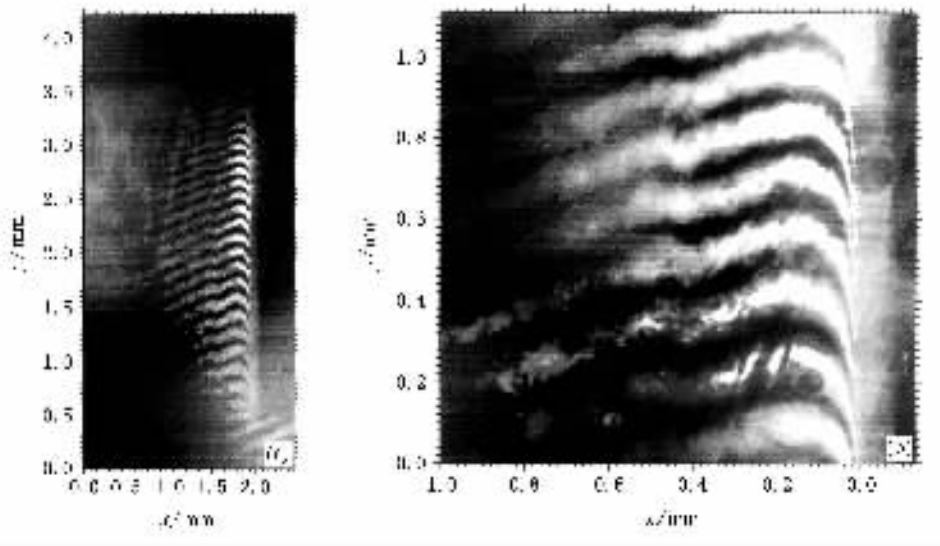


图 2 x 射线激光产生的 C₈H₈ 等离子体 M-Z 动态干涉条纹图像 ,右图是局部放大结果 (两图中坐标只表示相对位置 ,没有具体对应关系)



子体的 M-Z 动态干涉条纹图像,其中清晰的条纹弯曲包含了待测等离子体的电子密度信息.由于采用垂直于激光探针前进方向的均匀线聚焦辐照待测靶产生等离子体,在很长的一段范围内,等离子体的状态比较一致,反映在干涉条纹图像上,就是一系列形状非常相似的条纹.条纹周期的宽度大约 $128\mu\text{m}$,结合系统的空间分辨率,可以估算出图 2 中干涉条纹图像对电子密度的探测灵敏度约为 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$.

选取其中若干条形状相似的条纹进行平均后处理,得到了 CH 等离子体沿靶面法线方向的电子密度分布,如图 3 所示.其中靠近靶面的位置,电子密度分布非常陡峭,测量到的最大电子密度达到 $9.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$,已经非常接近于基频驱动激光对应的临界密度($n_c = 1.0 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$).

实验获得的干涉条纹图像中一个明显的特点是条纹中段突然的“打折”现象,即距离靶面 $450\mu\text{m}$ 附近电子密度的剧变(从图 2,3 中均可看出).在实验观测范围内,所有条纹都在离靶面约 $450\mu\text{m}$ 附近发生这种“打折”,因此,这应该是物理因素引起的.初步的分析认为这一现象与预-主脉冲的驱动方式有关.实验中待测等离子体是采用和驱动 x 射线激光相同的激光产生的,即都是宽度约 90ps 的基频预-主脉冲,预-主脉冲强度比约 5% ,时间间隔约 3ns .主激光与预脉冲激光产生的预等离子体相互作用,在界面处会形成一个向外传播的激波,干涉条纹的“打折”可能正是由于这个激波的波头位置的密度间断面引起的.对此,还需要作进一步的数值模拟和

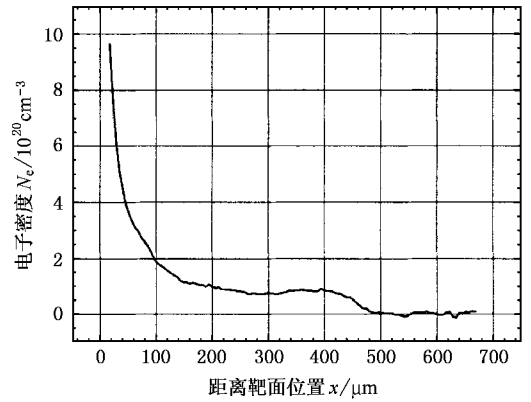


图 3 根据 M-Z 动态干涉条纹(图 2)计算出来的 C_8H_8 等离子体沿靶面法线方向的电子密度分布(图中给出的是多条相似条纹平均的结果)

理论分析.但无论如何,这些折断结果都为认识相应的物理规律,校验相关的模拟程序,提供了宝贵的实验资料.

4. 结 论

在神光 II 激光装置上,利用类镍-银 x 射线激光作为探针,采用马赫-曾德尔干涉方法拍摄到了包含待测等离子体电子密度信息的清晰动态干涉条纹图像,并由此给出了待测 C_8H_8 等离子体临界面附近的电子密度空间分布,探测的最高电子密度达到 $9.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$,已经非常接近于驱动激光对应的等离子体临界密度.

[1] Matthews D L et al 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110

[2] Cauble R et al 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3816

[3] Ress D et al 1994 *Science* **265** 514

[4] Wang C et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 847 [in Chinese] 王琛等 2002 物理学报 **51** 847

[5] Kodama R et al 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 543

[6] DaSilva L B et al 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991

[7] Filevich J et al 2000 *Opt. Lett.* **25** 356

[8] Filevich J et al 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056409

[9] Rocca J J et al 1999 *Opt. Lett.* **24** 420

[10] LeDéroff L et al 2000 *Phys. Rev. A* **61** 043802

Experimental diagnoses of plasma electron density by interferometry using an x-ray laser as probe *

Wang Chen¹⁾ Wang Wei¹⁾ Sun Jin-Ren¹⁾ Fang Zhi-Heng¹⁾ Wu Jiang¹⁾ Fu Si-Zu¹⁾
Ma Wei-Xin¹⁾ Gu Yuan¹⁾ Wang Shi-Ji¹⁾ Zhang Guo-Ping²⁾ Zheng Wu-Di²⁾
Zhang Tan-Xin²⁾ Peng Hui-Min²⁾ Shao Ping³⁾ Yi Kui³⁾ Lin Zun-Qi³⁾
Wang Zhan-Shan⁴⁾ Wang Hong-Chang⁴⁾ Zhou Bin⁴⁾ Chen Ling-Yan⁴⁾ Jin Chun-Shui⁵⁾

¹⁾ (Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

²⁾ (Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

³⁾ (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China)

⁴⁾ (Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

⁵⁾ (Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022, China)

(Received 4 March 2004; revised manuscript received 15 May 2004)

Abstract

The interferometry with an x-ray laser as probe is an important tool of diagnosing the electron density of a high temperature and dense plasma. A successful experiment of diagnosing the density of a CH plasma was demonstrated by using a Ni-like Ag x-ray laser as a probe and a Mach-Zehnder interferometer as instrument under the ShenguangII laser facility. The legible interferogram indicating the information of electron density was obtained.

Keywords : diagnoses of plasma electron density, x-ray laser, Mach-Zehnder interferometer

PACC : 5270, 4255V, 5270L

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69989801), and the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China (Grant No. 863-804-7-3).