

# 软X射线激光探针诊断高Z材料等离子体\*

王琛<sup>†</sup> 安红海 贾果 方智恒 王伟 孟祥富 谢志勇 王世绩

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2014年4月1日收到; 2014年6月16日收到修改稿)

激光辐照靶产生的等离子体电子密度的诊断对于惯性约束聚变、高能量密度物理等相关领域的研究具有重要意义, 特别是高Z材料等离子体临界界面附近的电子密度分布信息的测量. 利用软X射线激光作为探针是诊断等离子体电子密度分布的一种重要方法, 但在诊断激光辐照高Z材料产生的等离子体研究中, 遇到了高Z材料等离子体自发辐射过大的问题, 难以开展. 为此, 针对软X射线激光的特点, 发展了多种具体的实验技术. 通过综合利用这些技术, 大大的抑制了待测等离子体自发辐射对信号的影响, 使得软X射线激光探针诊断高Z材料等离子体成为可能. 作为典型例子, 实验诊断了激光辐照金平面靶的等离子体, 获得了清晰的实验图像, 表明相关的技术是有效和可行的.

**关键词:** 等离子体诊断, 激光探针技术, 软X射线激光, 高Z材料等离子体

**PACS:** 52.70.-m, 52.70.La, 07.60.Ly, 42.55.Vc

**DOI:** 10.7498/aps.63.215203

## 1 引言

在惯性约束聚变(ICF)、高能量密度物理、激光等离子体相互作用、天体物理模拟等领域的研究中, 高温稠密等离子体状态演化是重中之重的重要内容<sup>[1-14]</sup>. 目前的主要研究方法是计算机模拟, 但由于物理过程异常复杂, 需要进行相关的实验来进行对比校验.

利用软X射线激光作为探针诊断激光辐照靶产生的等离子体<sup>[1-10]</sup>是一种可供选择的实验, 结构相对简单, 但能够反映相应的物理过程. 基于软X射线激光波长合适、方向性好、单色性好以及具有相干性等特点, 这类实验能够给理论模型和计算程序提供很好的可供校验的实验样本. 从1994年开始, 包括美国利弗莫尔实验室(LLNL)在内的研究单位就开始开展这方面的研究工作. 十几年来, 逐步发展了阴影成像法<sup>[1]</sup>、偏折法<sup>[2]</sup>、散射法<sup>[3,4]</sup>、干涉法<sup>[5-10]</sup>等多种诊断技术, 并在等离子体诊断方面获得了很好的应用. 这些实验获得的结果, 与

相应理论模拟结果对比, 存在较大的偏差. 通过对这些偏差的研究, 为调整理论模拟参数, 理解相关物理过程起到了很好的作用.

然而这些研究还是远远不够的, 主要表现在待诊断等离子体主要是低Z材料, 如CH, Al等. 低Z材料原子结构、能级相对简单、等离子体自发辐射小、实验容易实施; 同时由于原子参数明确, 理论模拟计算也比较方便. 但是高Z材料与低Z材料有明显的不同, 仅依靠低Z材料的实验结果标定校准的参数是否对原子结构和物理过程更加复杂的高Z材料等离子体适用, 存在疑问. 另一方面, 在诸如ICF间接驱动等研究中, 高Z材料等离子体的特性尤为重要, 因此开展利用软X射线激光诊断高Z材料等离子体状态的研究是非常必要的.

本文对利用软X射线激光探针诊断高Z材料等离子体中的关键问题, 即等离子体自发辐射噪声过大的问题进行了比较深入的研究, 提出了一些具体措施, 并用于软X射线激光双频光栅干涉方法<sup>[10]</sup>诊断典型的高Z材料Au等离子体的研究, 取得了很好的效果.

\* 国家自然科学基金(批准号: 11075146)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: wangch@mail.shcnc.ac.cn

## 2 高 Z 材料等离子体的诊断难点

相比于诊断低 Z 材料的等离子体, 利用软 X 射线激光探针诊断高 Z 材料等离子体难度更大, 主要体现在待诊断等离子体的自发辐射噪声对信号的影响方面. 我们都知道, 探针诊断技术能够实施的先决条件是探针信号强度大于噪声. 如果想获得信噪比较好的诊断结果, 作为探针的软 X 射线激光信号强度必须要比噪声高得多. 软 X 射线激光的获得本身就不容易, 期望强度大幅度提升也难以实现; 再加上测量光路中诸多反射效率 30%—40% 的多层膜反射镜, 使得作为探针的软 X 射线激光的强度更加捉襟见肘. 在这种条件下, 可行的途径就是尽可能的减小噪声.

对于待测的高温稠密等离子体, 自发辐射是主要的噪声来源. 等离子体的自发辐射主要包括表现为分离谱的线辐射和表现为连续谱的轫致辐射等. 对于线辐射来说, 只要谱线的波长与作为探针的软 X 射线波长不同, 通过特定的滤片和窄带的多层膜反射元件就能够消除影响, 因此能够形成噪声的主要因素是连续的轫致辐射. 轫致辐射是电子的自由—自由跃迁, 即电子的初态和终态都是自由的, 在单位时间、单位体积发射到单位能量  $\hbar\omega$  附近的轫致辐射能量为 [15]

$$P(\hbar\omega)d(\hbar\omega) = \frac{32}{3} \left(\frac{\pi}{3}\right)^{1/2} r_0^2 c \left(\frac{E_H}{T_e}\right)^{1/2} \bar{Z}^2 n_i n_e \times \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T_e}\right) d(\hbar\omega), \quad (1)$$

其中  $r_0$  为电子经典半径,  $c$  为光速,  $E_H$  为氢原子基态束缚能,  $\bar{Z}$  为平均离子电荷数,  $n_i$ ,  $n_e$  分别为离子和电子密度,  $T_e$  为电子温度. 可以看出, 辐射强度与平均离子电荷数  $\bar{Z}$  紧密相关. 对于高 Z 材料, 电离度通常比低 Z 材料要大的多, 因此辐射强度大大增加. 另一方面, 为了在诊断中获得高空间分辨, 需要对待测的高温稠密等离子体进行放大成像. 成像过程客观上增加了待测等离子体自发辐射的收集角, 造成在接收面上自发辐射也就是噪声的增加. 正是这些因素使得高 Z 材料等离子体的诊断难度较高, 这也是先前诊断等离子体的实验基本上以低 Z 材料为主的主要原因.

在文献 [6] 中, 利用基于波长 13.9 nm 的类镍银软 X 射线激光探针、多层膜分束的马赫-贞德尔 (M-Z) 干涉诊断技术, 开展了对激光辐照  $C_8H_8$  靶

产生的等离子体 (以 C 为主,  $Z = 6$ ) 的实验诊断, 结果如图 1 (a) 所示. 图中可以看到清晰的靶面以及附近清晰的干涉条纹. 图 1 (b) 给出的则是采用同样的方法测量高 Z 材料 Ta ( $Z = 73$ ) 等离子体的结果. 可以明显看出, 在靶面附近, 存在很强的噪声, 淹没了干涉条纹. 事实上, 实验时已经有意降低了辐照靶的激光强度, 对应的靶面功率密度仅为  $C_8H_8$  实验中的一半 (约  $3 \times 10^{13} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), 但由于 Z 比较大, 自发辐射的影响仍是非常巨大.

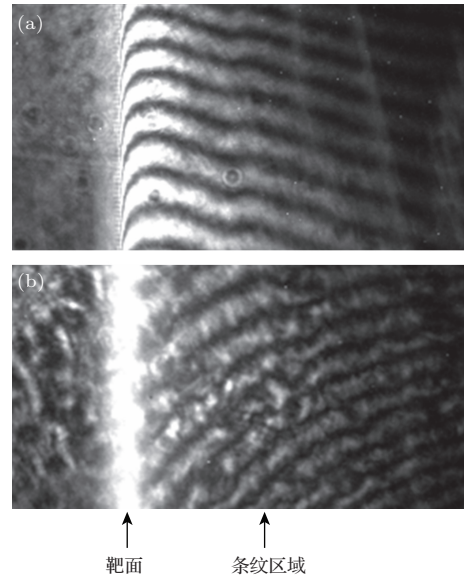


图 1 利用软 X 射线激光多层膜分束 M-Z 干涉方法诊断等离子体记录图像 (a)  $C_8H_8$ ; (b) Ta

## 3 高 Z 材料等离子体的实验诊断

基于软 X 射线激光方向性好、单色性好的特点, 经过研究, 发展了多种具体措施来尝试减小高 Z 材料等离子体自发辐射的影响, 并在此基础上, 开展了典型高 Z 材料 Au ( $Z = 79$ ) 等离子体的实验诊断.

实验在“神光 II”高功率激光装置上进行, 采用双频光栅剪切干涉诊断技术作为测量方案 [10]. 双拼光栅剪切干涉系统的核心元件是双频光栅 (DFG). DFG 拥有频率非常接近的两个周期, 如实验中选用的 1000 线和 1003 线. 当入射光入射到 DFG 时发生衍射, 0 级光类似镜面反射; 但对于其他级次的衍射光, 如 -1 级, 同时受到两个不同的光栅周期作用, 从而产生两束角度略有差别的光束. 在探测器上两束光重叠的区域就会发生剪切干涉. 实验方案如图 2 所示, 软 X 射线激光探针穿过待测等离子体 T, 经多层膜成像镜成像后, 以  $84^\circ$  入射

角掠入射进入DFG, 产生角度略有差别的-1级和-1'级衍射光束, 经过多层膜平面镜中继和滤片后, 被软X射线CCD接收. 多层膜成像镜对待测等离子体T进行成像, 像面为CCD, 放大约10倍, 配合CCD的像素尺寸( $13.5\ \mu\text{m} \times 13.5\ \mu\text{m}$ ), 诊断的空间分辨率约 $2\ \mu\text{m}$ . 作为探针的软X射线激光是利用两路预-主脉冲基频激光(波长 $1.053\ \mu\text{m}$ , 脉冲宽度约70 ps, 能量约70 J, 预-主脉冲的强度比约1%, 时间间隔约3 ns)线聚焦辐照两块对接的镀银玻璃平板靶产生的波长为13.9 nm的类镍银软X射线激光. 在待测等离子体位置软X射线激光光束截面尺寸约 $2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ , 远大于待测等离子体的尺寸, 因此能够测量到感兴趣的全部区域. 同时软X射线激光的脉冲宽度约30 ps, 能够很好的冻结等离子体的演化, 获得等离子体的瞬时图像. 实验中选用

的DFG周期分别为每毫米1000线和1003线, 对于波长13.9 nm的探针来说, 入射角度 $84^\circ$ 时, 两束-1级衍射光束角度差约为 $0.012^\circ$ , 根据光路排布, 干涉条纹宽度估计约 $124\ \mu\text{m}$ .

待测等离子体是利用9#驱动激光(脉冲宽度约2.4 ns, 波长527 nm, 能量约500 J)以 $450\ \mu\text{m} \times 450\ \mu\text{m}$ 的均匀焦斑辐照待测Au平面靶(厚度约 $6\ \mu\text{m}$ , 宽度约 $180\ \mu\text{m}$ )产生的, 靶面功率密度约 $1.0 \times 10^{14}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . 等离子体的产生及靶结构如图3所示, (a)是光路示意, 9#驱动激光辐照平面薄片靶, 作为探针的软X射线激光沿靶面侧向穿越等离子体进行测量, 穿越距离即靶的宽度. 焦斑区域大于靶宽度, 从而保证产生的等离子体在诊断方向是近似一维的. 图3(b), (c)分别是靶的实物照片(正视和侧视).

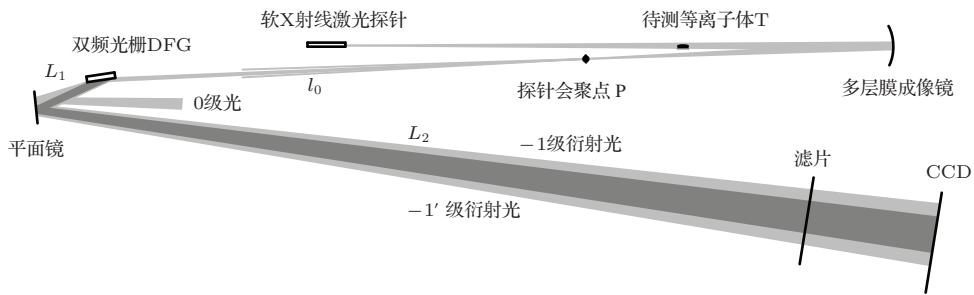


图2 软X射线激光探针双频光栅剪切干涉技术诊断等离子体方案示意图

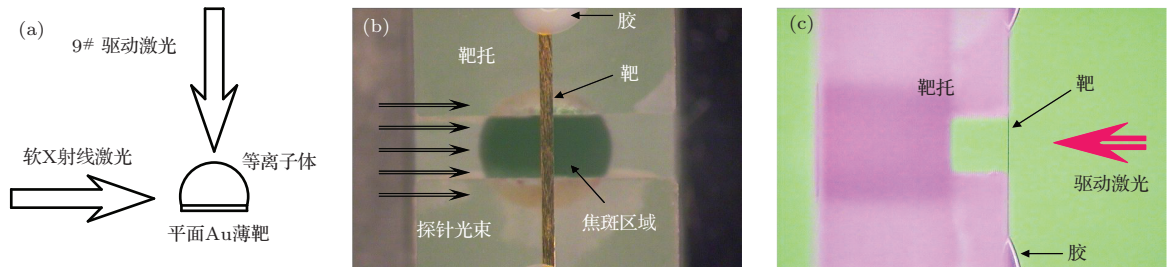


图3 (网刊彩色) 等离子体产生及靶结构 (a) 光路示意; (b) 待测靶实物正视图; (c) 待测靶实物侧视图

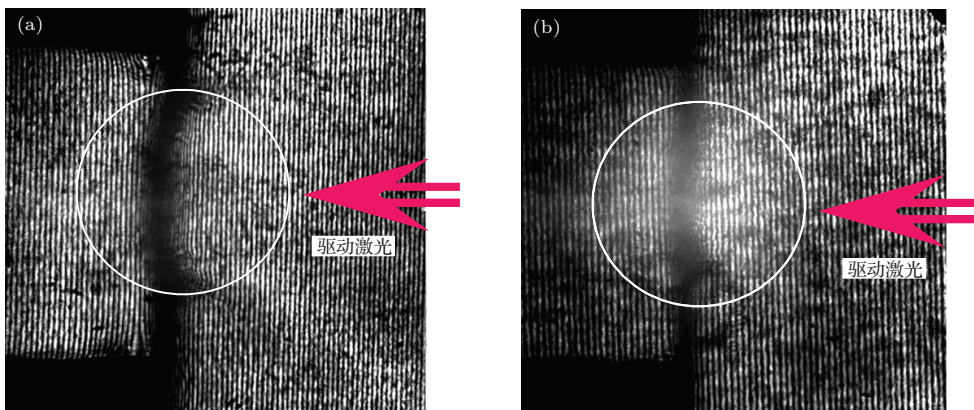


图4 双频光栅剪切干涉法诊断金平面靶等离子体结果 (a) 时刻:  $-300\ \text{ps}$ ; (b) 时刻:  $-800\ \text{ps}$

图4是利用双频光栅剪切干涉技术诊断Au平面靶等离子体的两发不同演化时刻的实验结果. 从图中可以看出在靶面附近条纹明显弯曲、变密, 而靶背面的区域干涉条纹则比较平直, 间距也没有明显变化. 这些干涉条纹的疏密变化以及弯曲包含了丰富的Au等离子体状态的信息. 静态条纹宽度约135  $\mu\text{m}$ , 与根据光路计算的124  $\mu\text{m}$ 比较一致, 差别主要来源于实际光路的入射角与设计的84°略有偏差. 值得注意的是两幅图在靶面附近, 即等离子体的位置(图中白色圆圈表示)有明显的区别, 图4(a)中很干净, 而(b)中明显存在噪声本底, 但是比起图1(b)的图像也已经有了本质的改善. 两者的差别, 主要原因就是采用了不同的抑制自发辐射的措施.

#### 4 对抑制自发辐射措施的讨论

针对高Z材料等离子体自发辐射过大的问题, 通过对软X射线激光的特性(单色性好、方向性好等)进行深入分析, 发展了几种切实可行的措施来抑制自发辐射的影响, 从而实现了对高Z材料等离子体的实验诊断.

第一种有效的措施是光栅衍射法, 即在光路中通过光栅衍射来减小自发辐射噪声的方法, 基本原理如图5所示. 在实验光束中, 包含单色的软X射线激光探针信号和作为连续谱分布的自发辐射噪声信号. 经过光栅-1级衍射后, 单色的软X射线激光探针信号几乎不受影响, 而自发辐射连续谱噪声信号则会按波长分谱. 对于特定的探测器, 只有与探针波长非常相近的自发辐射噪声才能被接收, 大部分的自发辐射噪声信号被衍射到其他方向, 信噪比会获得大大改善. 在实验中, 直接采用了双频光栅干涉的测量方案, 自然而然的包含了光栅衍射抑制自发辐射的措施, 事实也证明该措施是相当有效的.

第二种抑制自发辐射噪声的措施是成像镜光阑法, 基本原理如图6所示. 等离子体的自发辐射是 $4\pi$ 立体角发散的, 在成像镜收集范围内的自发辐射(以点画线表示)都会通过成像到达接收面上的等离子体位置形成噪声; 如果在之前增加一个光阑, 就能够大大减小自发辐射的收集角(以实线表示). 另一方面, 软X射线激光探针的方向性很好, 选择合适的光阑尺寸, 可以保证软X射线激光

探针全部通过(以虚线表示). 实验中, 成像镜尺寸 $\Phi 30\text{ mm}$ , 距离软X射线激光出光点S的距离约800 mm. 软X射线激光的发散角一般为几个mrad, 考虑一定余量, 选择 $\Phi 10\text{ mm}$ 的光阑足够保证探针通过, 同时自发辐射的收集角将减小到11%, 也就是说自发辐射噪声将下降约一个量级.

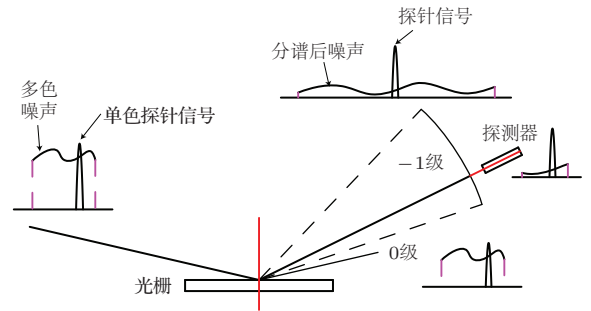


图5 光栅衍射提高信噪比原理示意图

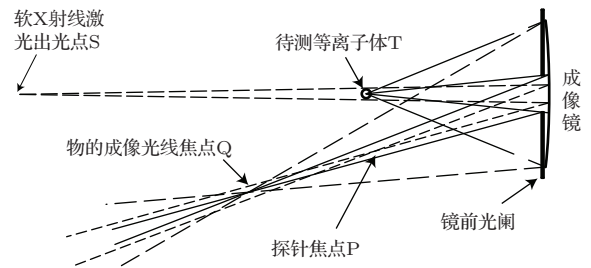


图6 成像镜光阑法示意图

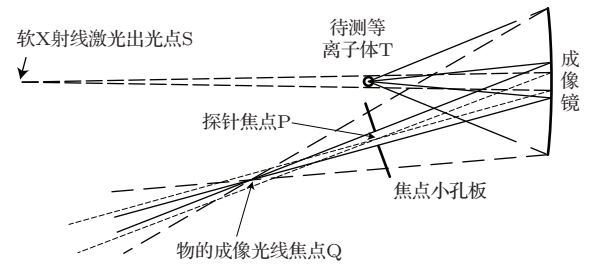


图7 焦点小孔法示意图

第三种抑制自发辐射噪声的措施是焦点小孔法, 基本原理如图7所示. 光束经过成像镜后, 首先会聚于一点, 然后发散进入接收面. 软X射线激光出光点S与待测等离子体的位置T距离差别较大, 经过成像镜后, 两个焦点P和Q的位置也不同. 如果在探针光束的焦点P处放置一个小孔, 能够保证软X射线激光探针全部通过(以虚线表示), 同时对待测等离子体的成像光线起到阻挡作用(以实线表示), 客观上减小了自发辐射噪声的收集角, 从而起到抑制自发辐射噪声的作用. 小孔尺寸越小效果

越好,但这个焦点P是空间上的一个点,没有标示,加上软X射线激光本身的出光漂移等因素,精确放置小孔有一定的难度,因此在实验中选择使用约2 mm的小孔,初步估计会抑制到自发辐射的五分之一左右。

第四种方法是多层膜反射元件中心波长偏离法.在软X射线波段,光学元件通常只能采用比较成熟的多层膜反射元件.对于作为探针的类镍银13.9 nm的软X射线激光,Mo:Si多层膜是很好的选择,它能够提供反射率约40%,带宽(半高全宽)约0.5 nm的反射元件<sup>[16,17]</sup>(参见图8中的M<sub>1</sub>).在软X射线激光探针诊断等离子体的研究中,大量的使用了这种窄带宽的多层膜反射元件,大大减小了待测等离子体的自发辐射.但对于高Z材料,这一带宽仍嫌过大,在此基础上发展了中心波长偏离技术.当光路中同时使用多块多层膜反射元件时(如图2方案中的成像镜和平面镜),制作时故意使得两块元件的中心波长有所偏离.配合使用时,总的反射率曲线的带宽将会更窄.如图8所示,两块多层膜反射镜M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>的带宽(半高全宽)约0.52 nm,中心波长与需要的探针波长13.9 nm分别偏离±0.15 nm,配合使用,尽管在总的反射效率方面有所降低,但综合带宽减少到0.28 nm,这将会进一步的抑制待测等离子体的自发辐射噪声。

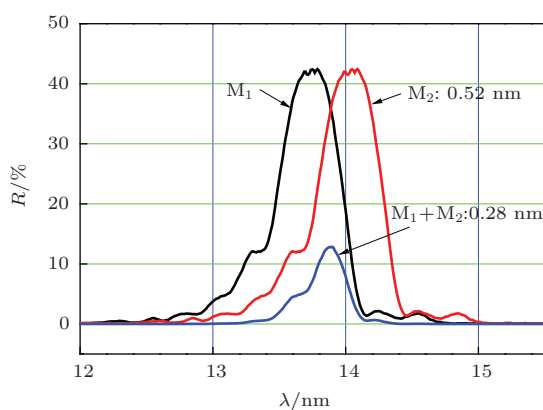


图8 (网刊彩色) 多层膜反射元件中心波长偏离能够有效减小带宽

在具体的实验中,综合使用了上述措施.在图4(a)的实验中,所有的四种抑制措施全都使用,效果非常好,在等离子体区域(圆圈内),几乎看不到任何的自发辐射噪声的痕迹;而在图4(b)的实验中,采用了三种措施,未采用焦点小孔法,在等离子体区域(圆圈内),还可以明显观察到一定强度

的等离子体自发辐射噪声,表明自发辐射噪声的抑制不充分.图4比起图2(b)来说,图像质量有了本质的改善.尽管原子序数Z从73增加到79,同时靶面功率密度从 $3.0 \times 10^{13} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增加到 $1.0 \times 10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,但图4的测量结果明显好转,充分证明了多种抑制自发辐射噪声的措施是有效,同时也表明这些措施是诊断高Z材料等离子体并不可少的。

## 5 结 论

针对利用软X射线激光探针诊断高Z材料等离子体研究中存在的自发辐射噪声过大的问题,发展了多种具体的实验技术进行噪声抑制.综合使用这些技术,能够很好的实现抑制高Z材料自发辐射噪声的作用,提高诊断系统信号的信噪比.在这些技术的基础上,开展了利用波长13.9 nm的类镍银软X射线激光探针双频光栅干涉诊断典型的高Z材料Au等离子体的尝试,获得了很好的实验图像,表明这些抑制自发辐射噪声的措施是相当有效的,为进一步开展多种高Z材料等离子体的诊断研究打下了良好的基础。

感谢同济大学张众等提供多层膜反射镜、靶及滤片等元件;感谢中国科学技术大学刘正坤等提供双频光栅等元件;感谢“神光II”高功率激光装置的高效运行。

## 参考文献

- [1] Cauble R, Da Silva L B, Barbee Jr T W, Celliers P, Moreno J C, Wan A S 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3816
- [2] Röss D, DaSilva L B, London R A, Trebes J E, Mrowka S, Procassini R J, Barbee Jr T W, Lehr D E 1994 *Science* **265** 514
- [3] Baidis H A, Dunn J, Foord M E, Rozmus W 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 4223
- [4] Wang C, An H H, Qiao X M, Fang Z H, Xiong J, Wang W, Sun J R, Zheng W D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 135203 (in Chinese) [王琛, 安红海, 乔秀梅, 方智恒, 熊俊, 王伟, 孙今人, 郑无敌 2013 物理学报 **62** 135203]
- [5] DaSilva L B, Barbee T W, Cauble R, Celliers P, Ciarrillo D, Libby S, London R A, Matthews D, Mrowka S, Moreno J C, Röss D, Trebes J E, Wan A S and Weber F 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991
- [6] Wang C, Wang W, Sun J R, Fang Z H, Wu J, Fu S Z, Ma W X, Gu Y, Wang S J, Zhang G P, Zheng W D, Zhang T X, Peng H M, Shao P, Yi K, Lin Z Q, Wang Z S, Wang H C, Zhou B, Chen L Y and Jin C S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 202 (in Chinese) [王琛, 王伟, 孙今人, 方智恒, 吴江, 傅思祖, 马伟新, 顾援, 王世绩, 张国平, 郑无敌,

- 张覃鑫, 彭惠民, 邵平, 易葵, 林尊琪, 王占山, 王宏昌, 周斌, 陈玲燕, 金春水 2005 物理学报 **54** 202]
- [7] Filevich J, Kanizay K, Marconi M C, Chilla J L, Rocca J J 2000 *Opt. Lett.* **25** 356
- [8] Le Déroff L, Salières P, Carré, Joyeux D, Phalippou D 2000 *Phys. Rev. A* **61** 043802
- [9] Rocca J J, Moreno C H, Marconi M C, Kanizay K 1999 *Opt. Lett.* **24** 420
- [10] Wang C, An H H, Wang W, Fang Z H, Jia G, Meng X F, Sun J R, Liu Z K, Fu S J, Qiao X M, Zheng W D, Wang S J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 125210 (in Chinese) [王琛, 安红海, 王伟, 方智恒, 贾果, 孟祥富, 孙今人, 刘正坤, 付绍军, 乔秀梅, 郑无敌, 王世绩 2014 物理学报 **63** 125210]
- [11] Liu L, Li L M, Xu Q F, Chang L, Wen J C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3367
- [12] Wang R R, Chen W M, Wang W, Dong J Q, Xiao S L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075202
- [13] Xiong J, Dong J Q, Jia G, Wang R R, Wang W, Fu S Z, Zheng W D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 065201
- [14] Zhang L, He F, Li S C, Ouyang J T 2013 *Chin. Phys. B* **22** 125202
- [15] Peng H M 2008 *Radiation Transport and Radiation Hydrodynamics in plasma* (Beijing: National Defence of Industry Press) p178 (in Chinese) [彭惠民 2008 等离子体中辐射输运和辐射流体力学 (北京: 国防工业出版社) 第 178 页]
- [16] Wang W, Ni Y L, Wang B G, Sun J R, Wu J, Wang C, Sun Y Q, Zhou G L, Gu Y, Wang S J 2001 *High Power Laser and Particle Beams* **13** 525 (in Chinese) [王伟, 倪元龙, 万炳根, 孙今人, 吴江, 王琛, 孙玉琴, 周关林, 顾援, 王世绩 2001 强激光与粒子束 **13** 525]
- [17] Wang Z S, Zhang Z, Wang F L, Wu W J, Wang H C, Qin S J, Cheng L Y 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 1089 (in Chinese) [王占山, 张众, 王凤丽, 吴文娟, 王洪昌, 秦树基, 陈玲燕 2004 强激光与粒子束 **16** 1089]

## Diagnosis of high- $Z$ plasma with soft X-ray laser probe\*

Wang Chen<sup>†</sup> An Hong-Hai Jia Guo Fang Zhi-Heng Wang Wei Meng Xiang-Fu  
Xie Zhi-Yong Wang Shi-Ji

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

( Received 1 April 2014; revised manuscript received 16 June 2014 )

### Abstract

It is important to diagnose electron density of a plasma irradiated by lasers for inertial confinement fusion, in high energy density physics and related fields, especially for measuring high- $Z$  plasma near the interface. Use of soft X-ray laser as a probe is an important method in diagnosis of plasma electron density distribution. However, it is difficult to carry out the research in high- $Z$  laser plasma, because of the problem of excessive plasma spontaneous radiation. In view of the characteristics of soft X-ray laser, several specific experimental techniques have been developed. By using these techniques, which can greatly suppress effects of spontaneous radiation, diagnosis of high- $Z$  plasma with soft X-ray laser probe method becomes possible. As a typical example, an experiment of diagnosing gold plasma is performed and clear images are obtained, indicating that the techniques are effective and feasible.

**Keywords:** diagnoses of plasma, laser probe technique, soft X-ray laser, high- $Z$  plasma

**PACS:** 52.70.-m, 52.70.La, 07.60.Ly, 42.55.Vc

**DOI:** 10.7498/aps.63.215203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11075146).

† Corresponding author. E-mail: wangch@mail.shcnc.ac.cn