

利用软X射线双频光栅剪切干涉技术 诊断金等离子体*

王琛^{1)†} 安红海¹⁾ 王伟¹⁾ 方智恒¹⁾ 贾果¹⁾ 孟祥富¹⁾ 孙今人¹⁾
刘正坤²⁾ 付绍军²⁾ 乔秀梅³⁾ 郑无敌³⁾ 王世绩¹⁾

1)(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

2)(中国科学技术大学, 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

3)(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2013年12月12日收到; 2014年2月13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、等离子体物理、高能量密度物理等相关领域的研究具有重要意义, 特别是中、高Z材料等离子体临界面附近的电子密度分布信息的测量. 采用波长13.9 nm的类镍银软X射线激光作为探针, 利用双频光栅剪切干涉技术尝试诊断了激光辐照金平面靶产生的等离子体的电子密度分布. 实验获得了清晰的干涉条纹图像, 通过对条纹的初步处理, 测量到的最高密度达到了约1.4倍临界密度. 通过与相关理论程序模拟结果对比, 发现实验与模拟存在一定的偏差, 为进一步优化模拟程序提供了有益的参考. 通过实验, 充分表明了软X射线激光双频光栅干涉技术在诊断中、高Z材料临界密度附近区域等离子体方面的实用性.

关键词: 等离子体诊断, 软X射线激光, 双频光栅干涉技术

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

DOI: 10.7498/aps.63.125210

1 引言

激光辐照靶产生的等离子体状态的诊断, 特别是中、高Z材料等离子体临界面附近的等离子体状态信息的测量, 对于惯性约束聚变(ICF)、等离子体物理、高能量密度物理等相关领域的研究具有重要意义. 诊断等离子体信息比较常规的方法包括光谱测量法^[1-3]、汤姆孙散射^[4-7]、探针技术^[8-18]等. 其中探针技术是一种主动诊断技术, 原理简单, 结果清晰, 因此受到了广泛的重视. 特别是基于软X射线激光的软X射线波段的探针技术^[8-16]在诊断高温稠密等离子体临界面附近等离子体方面更是具有难以替代的作用.

软X射线激光^[19-25]作为探针诊断高温稠密等离子体的技术具有显著的特点. 首先是波长合

适, 在10—30 nm的软X射线波段, 正适合进行驱动激光对应的临界面附近等离子体的实验诊断; 其次光源是激光, 不但可以利用干涉技术直接诊断等离子体的电子密度, 而且良好的单色性、方向性使得数据处理和反演要简单得多. 十几年来, 逐步发展了阴影成像法^[8]、偏折法^[9]、干涉法^[10-16]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^[8-16]. 在所有的的方法中, 干涉法由于能够直接诊断等离子体临界面附近的电子密度分布, 因此对激光ICF、等离子体物理等领域的研究工作具有很好的应用价值. 在软X射线波段, 由于材料强烈的吸收, 通常只能用反射元件, 并且系统对光学元件的面形、粗糙度等提出了极高的要求. 正因为如此, 在可见光波段广泛采用的各种干涉方法中, 只有很少的几种能够推广到软X射线波段, 包括多层

* 国家自然科学基金(批准号: 10975135, 11075146)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2010AA8041014)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangch@mail.shnc.ac.cn

膜分束马赫-曾德尔 (M-Z) 干涉法^[10,11]、光栅分束 M-Z 干涉法^[12]、反射式菲涅尔双镜法^[13]、劳埃德镜法^[14]等, 而其中能够用来诊断高温稠密等离子体的方法则更少. 在所有这些干涉方法中, 利用多层膜分束镜分束 M-Z 干涉诊断方法是诊断高温稠密等离子体的有效方法, 具有光路清晰、测量视场大、数据处理简单明了等多方面的优点, 因此受到很大关注, 并逐渐成为一种比较成熟的方法^[10,11]. 然而, 多层膜分束镜是一层厚度仅百纳米量级的薄膜, 由于应力等因素, 面形比较差, 这会影响诊断应用实验, 对结果造成巨大的误差^[15]. 但多层膜分束镜面形差是内在因素, 解决起来技术难度极大. 其后, 又发展了光栅分束的 M-Z 干涉方法^[12], 很好地解决了分束镜面形影响的问题, 但光路调节复杂、探针光源要求高的问题仍然存在.

近年来, 通过对可能用于软 X 射线波段的各种干涉方法进行的系列研究, 发现了一种可能用于软 X 射线波段干涉诊断高温稠密等离子体的全新方法, 即双频光栅剪切干涉方法^[16]. 文献^[16]对此方法进行了比较详细的描述, 本文则尝试利用此诊断技术, 开展金等高 Z 材料等离子体的实验诊断.

2 软 X 射线双频光栅剪切干涉法简介

文献^[16]中对于软 X 射线双频光栅剪切干涉法进行了比较详细的描述, 在此仅做简单的描述. 双频光栅剪切干涉, 核心元件是双频光栅 (DFG), 基本原理如图 1 (a) 所示. 双频光栅拥有频率非常接近的两个周期, 如 1000 线和 1003 线. 当入射光束掠入射双频光栅时发生衍射, 0 级光类似镜面反射, 不受双频光栅的影响; 但对于其他的衍射光, 如 -1 级, 由于存在两个不同的光栅周期, 每一束光都会产生两束角度不同的光束. 光栅线对差很小, 两束光之间的角度差也很小, 在探测器上两束光会有很大的部分发生重叠, 在重叠区域就会发生剪切干涉. 对于入射光束中的物, 每束衍射光都会产生一个像, 如图中的像 1 和像 2, 两个像错位重叠并发生干涉, 最终的干涉条纹包含的是同一物中不同位置错位干涉的结果, 参见图 1 (b), 需要进行精密的数据反演得到物的具体信息.

激光探针诊断等离子体的研究, 就是通过实验记录的干涉条纹图像最终反演给出等离子体电子密度的信息. 激光探针在等离子体中传播, 对应的

折射率 η 为

$$\eta = \left(1 - \frac{n_e}{n_c}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中 n_c 为激光对应的临界电子密度, n_e 为对应位置的电子密度. 在激光探针干涉诊断等离子体的研究中, 光程差 ΔS 对应的是等离子体的电子密度:

$$\Delta S = \int (1 - \eta) ds \approx \int \frac{n_e}{2n_c} ds \approx \frac{n_e}{2n_c} L, \quad (2)$$

其中 L 为积分路径长度. (2) 式最后一步考虑了一维等离子体近似, 也就是在激光探针穿越路径上电子密度近似不变.

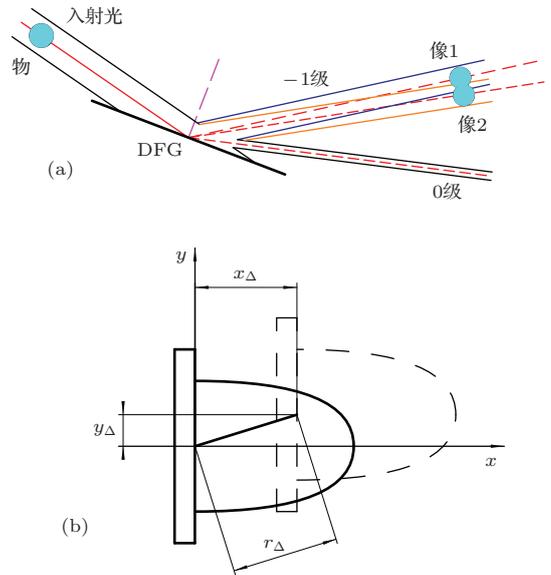


图 1 双频光栅剪切干涉原理 (a) 分束干涉原理示意; (b) 接收面上像偏移示意

如图 1 (b) 所示, 双频光栅剪切干涉方法中产生的两个像略微偏离错位, 光程差是两束光不同位置光程相减而成的. 因此直接采用 (2) 式, 即通常的干涉条纹反演方法并不能直接获得特定位置 (x, y) 处的等离子体电子密度 $n_e(x, y)$, 得到的是经过错位相减后的电子密度差值 $\Delta n_e(x, y)$. 根据光程差与电子密度的近似线性关系, 参考图 1 (b), 容易得到

$$n_e(x, y) - n_e(x + x_\Delta, y + y_\Delta) = \Delta n_e(x, y), \quad (3)$$

其中 x_Δ 和 y_Δ 分别是两个像在 x 和 y 方向上的偏离量, 这可以通过测量实验中靶上特定点的偏移量得到. 单靠 (3) 式是不能得到电子密度分布 $n_e(x, y)$ 的, 但在远离靶面的区域, $\Delta n_e(x, y)$ 接近零, 因此可以假设初始电子密度数值 n_{e0} , 使得

$$n_e(x, y) \approx n_e(x + x_\Delta, y + y_\Delta) \equiv n_{e0}.$$

由此, 可以反演得到整个空间的电子密度分布 $n_e(x, y)$.

软 X 射线激光波长合适、方向性、单色性、相干性好等特点, 以及双频光栅干涉的便利性, 软 X 射线双频光栅干涉诊断技术在诊断等离子体方面具有显著的优点, 最突出的两点就是适合诊断中、高 Z 材料等离子体和临界面附近的等离子体. 这两点正是相关理论研究最感兴趣的地方, 因此更加具有应用价值.

3 实验方案

实验在高功率激光物理联合实验室的“神光 II”高功率激光装置上进行, 利用装置两路激光驱动产生的类镍银 13.9 nm 的软 X 射线激光作为探针, 对装置 9# 纳秒倍频激光辐照金平面薄片靶产生的等离子体进行诊断. 方案示意图如图 2. 作为探

针的软 X 射线激光, 穿过待测等离子体 T 后, 经多层膜成像镜 S 成像后, 掠入射进入双频光栅 DFG, 其 -1 级光束然后经多层膜成像镜 M 中继, 经过滤片后用软 X 射线 CCD 接收. 多层膜成像镜 S 对待测等离子体 T 进行成像, 像面为 CCD, 放大约 10 倍. CCD 是 PI 公司型号为 PIXIS-XO:2048B 的软 X 射线 CCD, 像素数为 2048×2048 , 每个像素的尺寸为 $13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$, 配合 10 倍的放大倍数, 对应的由于系统放大的空间分辨率约为 $1.4 \mu\text{m}$.

待测靶为金平面薄片, 厚度约 $6 \mu\text{m}$, 宽度约 $180 \mu\text{m}$. 装置的 9# 激光 (二倍频, 波长 527 nm , 脉冲宽度约 2.4 ns , 能量约 500 J) 以 $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ 的均匀焦斑正入射辐照金薄片靶, 软 X 射线激光探针从侧面穿越等离子体进行诊断. 9# 激光焦斑区域大于金薄片靶宽度, 能够保证在探针穿越的路径上等离子体状态基本一致, 如图 3 所示.

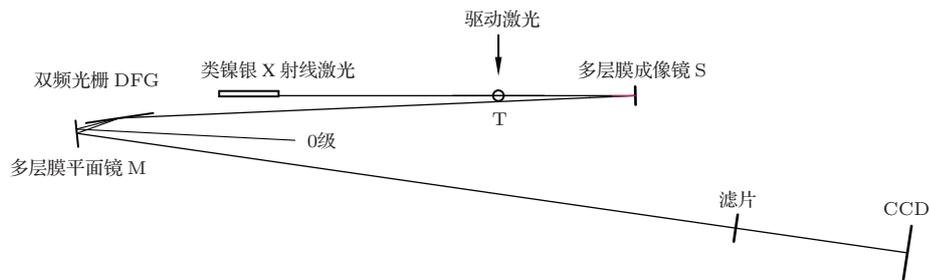


图 2 双频光栅剪切干涉法诊断等离子体方案示意图

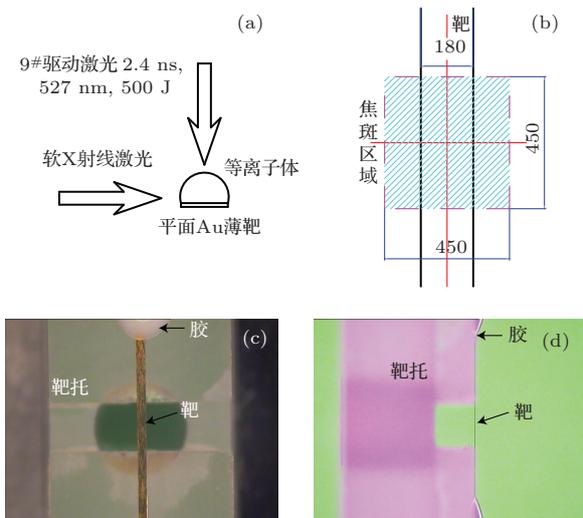


图 3 等离子体产生及诊断方式 (a) 光路示意; (b) 焦斑与靶关系图 (单位为 μm); (c) 待测靶实物正面图; (d) 待测靶实物侧面图

作为探针的软 X 射线激光是利用“神光”高功率激光装置八路中的两路预-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 射线激光光束截面的空间尺寸约 $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 远大于待测等离子体区域, 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 , 能够很好地冻结等离子体的演化, 获得等离子体的瞬时图像.

双频光栅如图 4 所示, 分为工作光栅和调试光栅两部分. 工作光栅即双频光栅, 周期 p_1, p_2 分别为每毫米 1000 线和 1003 线, 对于 13.9 nm 的类镍银软 X 射线激光探针来说, 在入射角度 84° 时, 两个周期的光栅衍射角度差约为 0.012° . 调试光栅周期 p_3 为每毫米 22 线, 这种光栅对波长为 630 nm 的光束产生的衍射角与工作光栅对 13.9 nm 的探针产生的衍射角基本一样, 因此可以通过波长 630 nm

的激光和调试光栅来辅助调整双频光栅的姿态.

4 实验结果与分析

图5是利用双频光栅剪切干涉技术诊断金薄片靶等离子体的实验记录图像, 对应的诊断时刻为9# 驱动激光下降沿半高位置 (时间零点) 前约0.3 ns, 见图6. 从图5可以明显看到靶面附近条纹变密, 而靶背面的区域干涉条纹比较平直, 间距没有明显变化. 这些干涉条纹的疏密变化以及弯曲包含了丰富的金等离子体状态的信息.

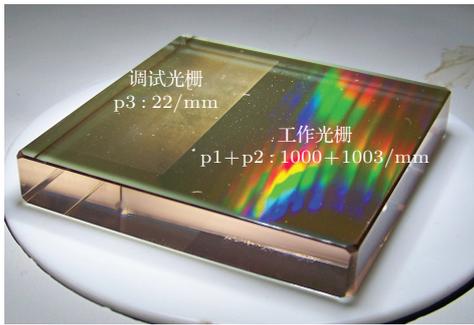


图4 双频光栅示意图

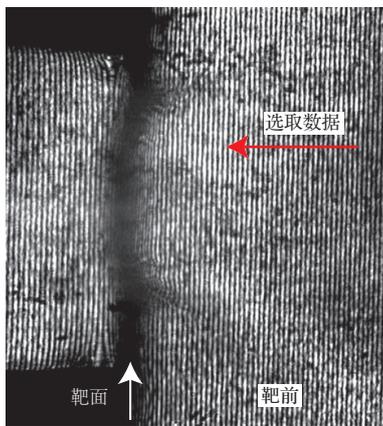


图5 双频光栅干涉技术诊断金平面薄片靶的记录图像

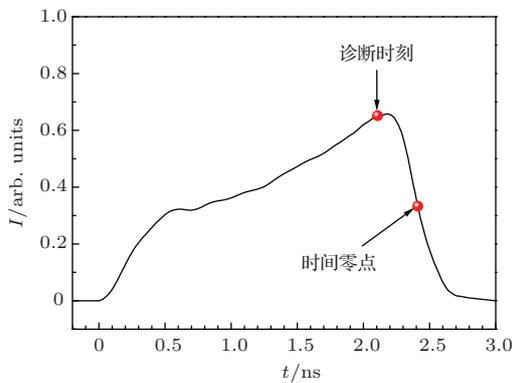


图6 9# 驱动激光脉冲波形和诊断时刻

针对图5进行了初步的数据处理, 选择提取某一条垂直于靶面的一维数据作为研究对象, 如图5中水平箭头所示. 干涉条纹平行于靶面, 可得 $y_{\Delta} = 0$, 根据图像可以估计 $x_{\Delta} \approx 40 \mu\text{m}$. 在距离靶面 $1000 \mu\text{m}$ 的区域, 干涉条纹的移动已经不可分辨, 可以作为电子密度初值的位置, 设定此处零点 $n_{e0} = 0$, 便可根据(2), (3)式依次计算出这一条法线上的电子密度 $n_e(x)$, 结果如图7所示. 测量得到的最高电子密度约 $5.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 达到了二倍频驱动激光对应的临界密度的约1.4倍.

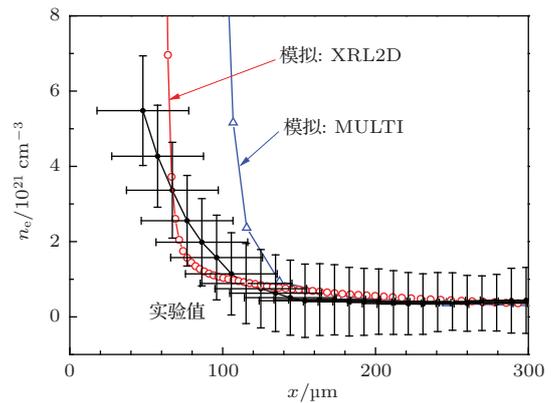


图7 电子密度沿靶面法向的分布实验结果与理论模拟结果的对比

图7同时给出了实验数据的误差棒, 其中横轴(即靶面距离)方向的误差主要在于靶面模糊带来的不确定性. 从图5可以看出, 由于水平方向上靶的两个像错位叠加, 造成靶面边界较为模糊, 这对靶面的确定带来一定的不确定性. 根据图像上模糊的区域, 可以估计靶面最大的不确定度不超过 $\pm 25 \mu\text{m}$. 纵轴(即电子密度)的主要误差来源于测量中可能引入误差的一些因素.

1) 静态条纹宽度: 理想状态下, 静态干涉条纹的宽度应该是一样的, 但由于光栅制作工艺、元件面形等多方面的因素, 实际获得的干涉条纹在不同的区域宽度存在一定偏差, 这将会带来实验误差.

2) 重叠尺寸的取值: 即在记录图像上靶的两个像重叠的区域尺寸, 这个数值对于电子密度的反演结果影响较大, 越靠近靶面, 影响越显著.

3) 穿越等离子体的长度: 实验采用了大光斑小靶的方式, 由于等离子体的侧向膨胀等原因, 实际的穿越距离可能有所差别.

4) 折射影响: 由于软X射线激光波长比较短, 一般计算中, 忽略了软X射线激光探针在等离子体中的折射. 而事实上, 软X射线激光的折射效应会

对结果产生不小的影响. 对于折射效应, 处理起来比较困难, 需要利用多次迭代进行计算.

考虑到上述因素, 可以估计在最高电子密度处的测量误差约为26%, 对应最高电子密度即 $(5.5 \pm 1.4) \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. 图7中还可以看出, 在 $x > 80 \mu\text{m}$ 的区域, 实际测量数值已经低于误差水平, 但在靠近靶面的区域, 数据还是具有一定可信度的.

图7还同时给出了分别利用MULTI程序^[26]和XRL2D程序^[27]模拟计算的结果, 模拟条件与实验条件一致, 限流因子均取值0.1. 可以看出, 实验结果与模拟结果在形状上有些相似, 但在随着靶面距离增加电子密度下降的斜率等方面还存在明显的差异, 实验测量结果下降明显缓慢. 事实上, 两个模拟的结果也存在较大的差别, 表明相应程序采用的模型和参数需要进一步优化, 这也正是开展实验诊断等离子体研究的意义所在.

5 结 论

利用波长13.9 nm的类镍银软X射线激光作为探针, 诊断了纳秒二倍频激光辐照金平面薄片靶产生的等离子体. 根据初步的处理, 测量得到最高电子密度数值为 $(5.5 \pm 1.4) \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 达到了驱动激光对应临界密度的1.4倍, 这是利用探针方法获得的最高电子密度, 充分表明了双频光栅干涉诊断技术在诊断等离子体临界面附近电子密度分布的能力. 通过对比实验结果与理论模拟结果, 发现其中明显的差异, 对于优化理论模型和模拟程序的相关参数具有很好的参考价值.

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“神光”高功率激光装置的高效运行.

参考文献

- [1] Xiang Z L, Yu C X 1982 *Diagnoses Techniques for High Temperature Plasma* (Vol. 1) (Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing house) pp86–92 (in Chinese) [项志遯, 俞昌旋 1982 高温等离子体诊断技术 (上册) (上海: 上海科学技术出版社) 第86—92页]
- [2] Liu L, Li L M, Xu Q F, Chang L, Wen J C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3367
- [3] Pu Y D, Zhang J Y, Yang J M, Huang T X, Ding Y K 2011 *Chin. Phys. B* **20** 015202
- [4] Landen O L, Winfield R J 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 1660

- [5] Glenzer S H, Gregori G, Lee R W, Rogers F J, Pollaine S W, Landen O L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 175002
- [6] Visco A J, Drake R P, Glenzer S H, Döppner T, Gregori G, Froula D H, Grosskopf M J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 145001
- [7] 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]
- [8] Cauble R, DaSilva L B, Barbee Jr T W, Celliers P, Moreno J C, Wan A S 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3816
- [9] Ressler 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
- [10] DaSilva L B, Barbee T W, Cauble R, Celliers P, Ciarrillo D, Libby S, London R A, Matthews D, Mrowka S, Moreno J C, Ressler D, Trebes J E, Wan A S, Weber F 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991
- [11] 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, 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]
- [12] Filevich J, Kanizay K, Marconi M C, Chilla J L, Rocca J J 2000 *Opt. Lett.* **25** 356
- [13] Le Déroff L, Salières P, Carré B, Joyeux D, Phalippou D 2000 *Phys. Rev. A* **61** 043802
- [14] Rocca J J, Moreno C H, Marconi M C, Kanizay K 1999 *Opt. Lett.* **24** 420
- [15] 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]
- [16] Liu Z K, Qiu K Q, Chen H Y, Liu Y, Xu X D, Fu S J, Wang C, An H H, Fang Z H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 070703 (in Chinese) [刘正坤, 邱克强, 陈火耀, 刘颖, 徐向东, 付绍军, 王琛, 安红海, 方智恒 2013 物理学报 **62** 070703]
- [17] Wang R R, Chen W M, Wang W, Dong J Q, Xiao S L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075202
- [18] Xiong J, Dong J Q, Jia G, Wang R R, Wang W, Fu S Z, Zheng W D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 065201
- [19] Matthews D L, Hagelstein P L, Rosen M D, Eckart M J, Ceglio N M, Hazi A U, Medeck H, MacGowan B J, Trebes J E, Whitten B L, Campbell E M, Hatcher C W, Hawryluk A M, Kauffman R L, Pleasance L D, Rambach G, Scofield J H, Stone G, Weaver T A 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110
- [20] Wang S J, Gu Y, Zhou G L, Yu S Y, Fu S Z, Ni Y L, Wu J, Zhou Z L, Han G Q, Tao Z C, Lin Z Q, Wang S S, Chen W N, Fan D Y, Zhang G P, Sheng J T, Peng H M, Zhang T X, Shao Y F 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 360

- [21] Carillon A, Chen H Z, Dhez P, Dwivedi L, Jacoby J, Jaegle P, Jamelot G, Zhang J, Key M H, Kidd A, Klisnick A, Kodama R, Krishnan J, Lewis C L S, Neely D, Norreys P, O'Neill D, Pert G J, Ramsden S A, Raucourt J P, Tallents G J, U homoibhi J 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 2917
- [22] Koch J A, MacGowan B J, DaSilva L B, Matthews D L, Underwood J H, Batson P J, Mrowka S 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3291
- [23] Rocca J J, Clark D P, Chilla L A, Shlyaptsev V N 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1476
- [24] Zhang J, MacPhee A G, Lin J, Wolfrum E, Smith R, Danson C, Key M H, Lewis C L S, Neely D, Nilsen J, Pert G J, Tallents G J, Wark J S 1997 *Science* **276** 1097
- [25] Wang C, Zhang G P, Zheng W D, Qiao X M, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6264 (in Chinese) [王琛, 张和平, 郑无敌, 乔秀梅, 方智恒, 孙今人, 王伟, 熊俊, 傅思祖, 顾援, 王世绩 2009 物理学报 **58** 6264]
- [26] Ramis R, Schmalz R, Meyer-Ter-Vehn J 1988 *Comp. Phys. Comm.* **49** 475
- [27] Zheng W D, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2439

Diagnoses of Au plasma with soft X-ray double frequency grating interference technique*

Wang Chen^{1)†} An Hong-Hai¹⁾ Wang Wei¹⁾ Fang Zhi-Heng¹⁾ Jia Guo¹⁾
 Meng Xiang-Fu¹⁾ Sun Jin-Ren¹⁾ Liu Zheng-Kun²⁾ Fu Shao-Jun²⁾
 Qiao Xiu-Mei³⁾ Zheng Wu-Di³⁾ Wang Shi-Ji¹⁾

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

2) (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

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

(Received 12 December 2013; revised manuscript received 13 February 2014)

Abstract

The diagnoses of laser-produced plasma electron density have important significance for inertial confinement fusion, plasma physics, high energy density physics and other relevant fields, especially for measuring electron density distribution information of medium and high-Z material plasma near the critical density surface. With 13.9 nm Ni-like Ag X-ray laser serving as a probe, using double frequency grating shearing interference technique, the electron density distribution of plasma produced by laser irradiating a gold planar target is measured. Clear interference fringe image is obtained. Preliminary deduction of the fringe shows that the maximum density measured is about 1.4 times the critical density. It is found that there are some discrepancies between experimental results and simulation results, which provides a useful reference to the further optimization of the simulation program. The experimental results fully demonstrate that the soft X-ray double frequency grating shearing interference technique is practical to diagnose near-critical-density plasma of medium and high-Z materials, which will have a good application value.

Keywords: diagnoses of plasma, soft X-ray laser, double frequency grating interference technique

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

DOI: 10.7498/aps.63.125210

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10975135, 11075146) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2010AA8041014).

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