

激光直接加热自背光法辐射不透明度测量方法探索*

张继彦^{1)†} 杨家敏¹⁾ 杨国洪¹⁾ 丁耀南¹⁾ 李军¹⁾ 颜君²⁾
吴泽清²⁾ 丁永坤¹⁾ 张保汉¹⁾ 郑志坚¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2013年2月1日收到; 2013年6月16日收到修改稿)

本文提出一种基于单束激光直接加热多层平面靶开展稠密等离子体辐射不透明度特性研究的靶物理设计并对其进行了实验验证. 在 XG-II 激光装置上, 采用三倍频束匀滑激光辐照 Au/CH/Al/CH 多层平面靶产生背光源和 Al 样品等离子体, 通过观测背光源经样品等离子体衰减后的透过谱得到样品等离子体的辐射吸收性质. 采用 Multi-1D 程序对激光加热多层靶进行了辐射流体力学数值模拟, 给出了样品等离子体状态及其时间演化过程. 利用细致谱项模型 (DTA) 对实验测量的 Al 等离子体吸收谱进行理论分析, 表明等离子体温度在 20—70 eV 之间, 该结果与辐射流体力学模拟结果基本一致.

关键词: 吸收光谱, 自背光, 激光等离子体

PACS: 52.25.Os, 52.50.Jm, 61.05.Cj

DOI: 10.7498/aps.62.195201

1 引言

辐射不透明度是最基本的物态参数之一, 对高温物质的辐射能量输运起支配作用, 在惯性约束聚变、天体物理等研究领域具有重要应用背景^[1]. 美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室 (LLNL)、洛斯-阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 和桑地亚国家实验室 (SNL) 等研究机构将辐射不透明度与高压状态方程、辐射流体力学不稳定性等一起作为高能量密度物理领域的重要研究方向.

目前, 辐射不透明度实验研究中的最主要方法是吸收光谱法, 也即通过测量样品等离子体的辐射透过率和面密度, 再根据 Beer 定律给出样品辐射不透明度参数的一种实验测量方法. 吸收光谱法主要采用两条技术路线, 一是激光直接加热法, 另一种是辐射加热法. 基于辐射加热的吸收光谱法是目前辐射不透明度研究中最为重要的一种实验方法, 其优点是易于获得均匀和接近局域热动平衡状态的等离子体样品, 其难点是不易屏蔽作为辐射加热

源的黑腔靶内部复杂的激光和等离子体环境对实验测量的干扰. 为此, LLNL 设计了一种内部带挡板的柱腔靶, 成功解决了腔内散射激光及填充等离子体的屏蔽问题, 获得了很好的结果^[2-6]. 与辐射加热法相比, 激光直接加热法的主要优点是加热效率高, 缺点是存在复杂的激光等离子体相互作用, 样品状态不易控制^[7], 因此在目前的大型激光装置上一般很少采用. 最近, 随着实验技术的发展, 基于自背光技术的辐射不透明度研究方法开始受到重视, 例如, SNL 提出了基于 Z-pinch 装置的辐射加热自背光法, 它利用电磁内爆 W 等离子体产生高温辐射场, 并将其作为辐射加热源与背光源, 成功测量了温度约 160 eV 的 Fe 等离子体辐射不透明度^[8]. 另外, 近期 Hoarty 等人提出了采用激光直接加热多层薄膜靶开展高密度等离子体辐射不透明度研究的实验方案并报道了一些初步的实验结果^[7]. 本研究小组在 LLNL 不透明度靶结构的基础上, 采用泡沫塑料代替重金属挡板, 获得了在较小激光驱动能量条件下产生较高样品等离子体温度

* 国家自然科学基金 (批准号: 10875109) 和激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (批准号: SKLLIM0903) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangjiyanzy@sina.com

的实验结果 [9–11].

本工作拟采用自背光技术和激光直接加热方法, 在辐射流体力学数值模拟基础上, 设计了用于辐射不透明度实验研究的多层平面靶, 并通过实验和理论对比分析探讨了激光直接加热自背光法开展辐射不透明度实验研究的可能性. 首先, 采用一维辐射流体力学数值模拟程序 Multi-1D 对样品等离子体的温度密度空间分布及其时间演化情况进行理论预估, 并在此基础上确定了靶结构参数. 然后, 采用该靶型在 XG-II 高功率激光装置上开展吸收谱测量实验并将实验结果与基于细致组态模型 (DTA) 的理论计算进行对比分析. 最后, 探讨在较低激光驱动能量条件下采用激光直接加热自背光法开展辐射不透明度实验测量的可行性及条件需求.

2 数值模拟

激光直接加热自背光法的基本思路是利用激光直接加热高 Z (如 Au, W 等) 薄膜材料产生高温等离子体, 该高温等离子体一方面将吸收的激光能量通过电子热传导向靶内输运并加热样品, 另一方面还将产生强 X 射线辐射; 当这部分 X 射线透过样品时, 会受到样品等离子体的吸收; 测量背光源经样品衰减后的透过谱, 并结合背光源谱以及样品自发辐射测量结果, 可得到样品材料的辐射不透明度性质. 由于该方案中激光直接加热高 Z 材料产生的高温等离子体同时具有背光源和加热源的功能, 故通常将这种方法称之为自背光源法. 需要指出, 在激光与等离子体非线性相互作用过程中会产生超热电子, 这些超热电子由于自由程较长, 对样品层的加热具有非局域特征, 也就是可以对样品进行体加热, 这一点对提高样品均匀性是有利的. 并且, 由于体加热样品的高密度, 其局域热动平衡状态容易通过原子碰撞过程达到. 图 1 是一种基于激光直接加热方式测量辐射不透明度的典型实验靶结构, 其基本组成包括一层高 Z 转换材料, 一层样品材料, 以及包覆样品材料的塑料层. 高 Z 转换层的功能是吸收激光能量并将其转换成 X 射线和内能, 用于加热样品层并对样品吸收谱进行测量. 低 Z 塑料包覆层的功能是在高 Z 加热源和样品之间形成缓冲区并对样品进行箍缩, 确保产生接近理想一维平板结构的等离子体样品. 由于在这种靶型中加热源与样品紧贴, 样品相对加热源的立体角很大 (接近 2π), 因而该方法中激光对样品材料的加热效率较高.

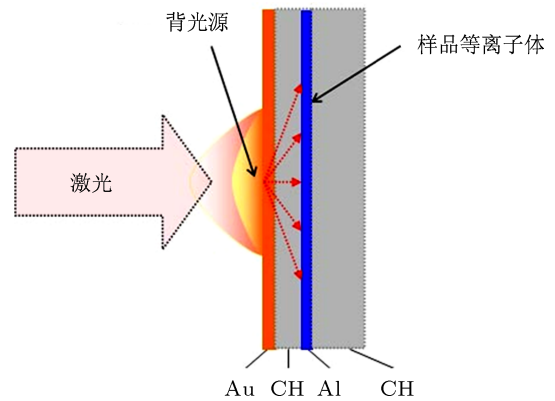


图 1 激光直接加热自背光法实验所用的辐射不透明度靶结构示意图

尽管激光直接加热自背光法辐射不透明度测量方案在原理上并不复杂, 不过, 要将这种方法应用于实际测量尚需解决以下问题: 1) 如何控制样品加热状态 (包括样品的均匀性、平衡性等)? 2) 背光源亮度是否足以确保获得高质量吸收谱? 为此, 首先采用辐射流体力学程序 Multi-1D 对实验靶的激光加热过程进行了数值模拟, 对实验样品的温度密度状态及其时间演化进行了理论预估, 然后, 利用理论预估结果对靶结构参数进行优化.

数值模拟采用图 1 所示的 Au/CH/Al/CH 多层平面薄膜靶. 激光波形为准方波, 脉冲宽度约为 0.75 ns, 峰值功率密度在 10^{14} — 10^{15} W/cm² 之间. Au/CH/Al/CH 多层靶各层厚度分别为 0.25 μm , 0.5 μm , 0.2 μm , 5.0 μm , 密度采用常态固体密度. 在数值模拟计算时, 对各层材料采用均匀网格进行划分, 其中 Al 材料位于第 71 个网格到第 80 个网格之间, Au 材料位于第 91 网格到第 99 网格之间, 第 1 到第 70 个网格以及第 81 到第 90 个网格之间是 CH 材料. 图 2 给出了 1.0 ns 时刻 5 种不同功率密度条件下激光加热 Au/CH/Al/CH 多层膜靶的靶物质温度密度分布情况, 图中横坐标是网格编号. 从结果可以看出, 当激光功率密度大于 4×10^{14} W/cm² 时, Al 等离子体温度可以达到数十电子伏, 且分布较为均匀. 靶表面的 Au 等离子体温度则达到千电子伏以上, 该温度使 Au 等离子体能够产生足够强的 1.0—2.0 keV 能区 X 射线辐射以满足实验测量需求. 同样, 当激光功率密度大于 4×10^{14} W/cm² 时, Al 样品等离子体的密度分布也较为均匀, 密度在 0.1—1.0 g/cm³ 之间, 明显高于相应的辐射加热不透明度实验中样品的密度.

从数值计算结果可知, 对于本文确定的多层平面靶参数, 当激光功率密度在 4×10^{14} W/cm² 以上

时,可以保证样品达到比较高的温度和密度状态,并且温度、密度分布较为均匀.而在该功率密度以下,则温度相对较低,且温度、密度梯度较大.对于更低的激光功率密度,要使样品达到同样的温度密度条件,还须对靶参数进行进一步优化,可能需要采用更薄的 Au 层和 CH 缓冲层以减少激光能量损耗.不过,这将使得样品状态更难控制.图 3 是将激光功率密度减小到 $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,同时将多层靶中各层材料厚度依次调整为 $0.05 \mu\text{m}$ (Au), $0.1 \mu\text{m}$ (CH), $0.1 \mu\text{m}$ (Al), $5.0 \mu\text{m}$ (CH) 后的数值模拟结果.从图中可以看出,经过上述调整,可以获得样品温度最高接近 25 eV,密度大约为十分之一固体密度,具有较强耦合特性的低温稠密等离子体.

3 吸收谱测量实验

在 XG-II 激光装置上,采用波长 $0.351 \mu\text{m}$ 的 Nb 玻璃三倍频激光直接加热 Au/CH/Al/CH 平面靶,对 Al 等离子体的辐射吸收谱进行了实验测量.实验中,聚焦于靶面的激光功率密度约为 $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$.激光直接作用面的 Au 层厚度为 $0.25 \mu\text{m}$,Al 样品层的厚度为 $0.2 \mu\text{m}$ (等效面密度为 $54 \mu\text{g/cm}^2$),两层 CH 的厚度分别是 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $5.0 \mu\text{m}$.当激光作用于 Au 层产生高温等离子体,该等离子体一方面通过电子热传导加热 Al 样品层,另一方面产生强 X 射线辐射源.采用 PET 晶体谱仪从实验靶的背侧对该辐射源经 Al 等离子体样品衰减后的光谱进行实验测量,测量结果用 TJ-III X

射线胶片记录.

图 4 是在两发打靶实验中分别采用 Au/CH/Al/CH 和 Au/CH/CH 两种靶结构的实验结果.其中图 4(a) 是 Au/CH/Al/CH 多层靶打靶实验获得的背光源谱经 Al 样品层和 CH 包覆层衰减后的透过谱图

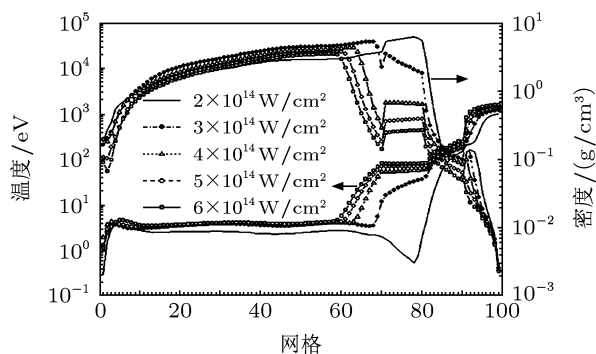


图 2 激光加热 Au/CH/Al/CH 多层膜靶的样品温度密度分布的数值模拟结果

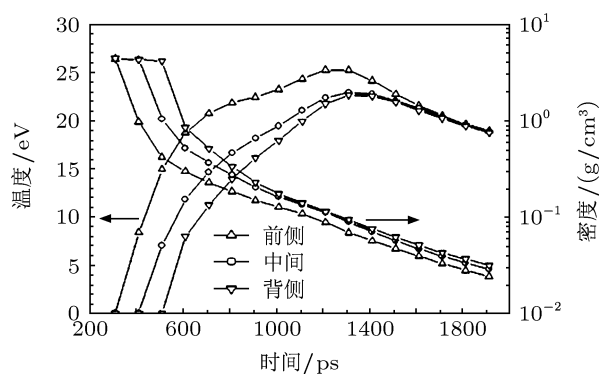


图 3 激光加热 Au/CH/Al/CH 多层平面靶过程中 Al 样品层的温度密度分布及其时间演化

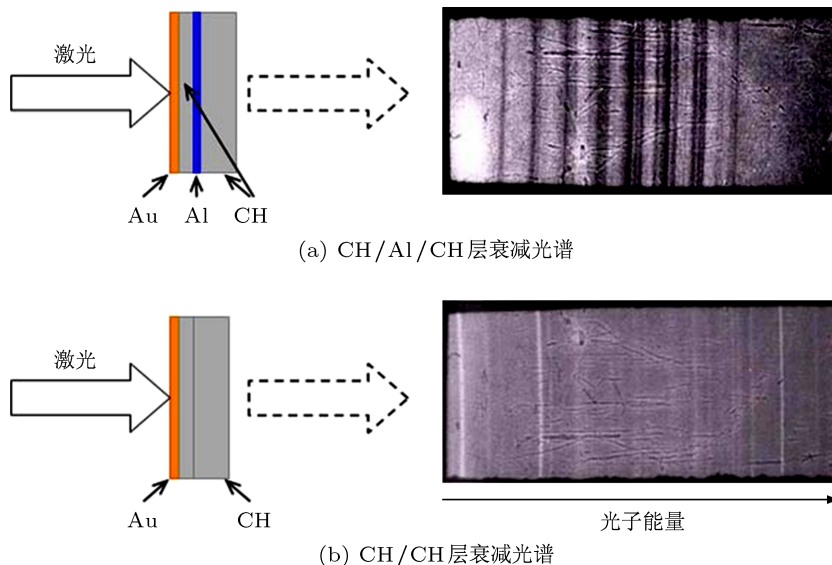


图 4 在两发打靶实验中采用两种靶型测量得到的辐射透过谱图像

像,其中主要包含背光源经样品等离子体吸收后的光谱信息;图4(b)是 Au/CH/CH 多层靶打靶实验获得的背光源谱经 CH 包覆层衰减后的透过谱图像,其中主要包含背光源的光谱信息.采用胶片扫描仪将实验图像转换为空间位置与胶片光密度关系的数值文件,并利用胶片标定结果将胶片光密度转换为 X 射线曝光强度.然后,通过波长标定、扣本底等数据后处理工作,将由图4(a)得到的 Al 和 CH 的透过谱与图4(b)中得到的 CH 透过谱相比,可以得到 Al 样品的辐射透过率

$$T(\nu) = e^{-\tau_{Al}(\nu)} = \frac{I_0(\nu) \cdot e^{-\tau_{Al}(\nu)} \cdot e^{-\tau_{CH}(\nu)}}{I_0(\nu) \cdot e^{-\tau_{CH}(\nu)}} \quad (1)$$

上式中 $I_0(\nu)$ 是背光源强度, $\tau_{Al}(\nu)$ 和 $\tau_{CH}(\nu)$ 分别是 Al 样品层和 CH 包覆层的光学厚度.光学厚度 $\tau(\nu)$ 与辐射不透明度 $\mu(\nu)$ 之间具有如下关系:

$$\tau(\nu) = \int_0^L \rho(x) \cdot \mu(\nu, x) dx \quad (2)$$

当样品等离子体具有理想一维结构时(即均匀状态),样品状态(温度 T , 密度 ρ)以及样品辐射不透明度 $\mu(\nu)$ 性质均与空间位置无关,这时可得如下关系式:

$$\tau(\nu) = \int_0^L \rho \cdot \mu(\nu) dx = \rho \cdot \mu(\nu) \cdot L \quad (3)$$

其中 $\rho \cdot L$ 是样品的面密度.对于激光与平面薄膜靶相互作用的情形,可以近似认为靶只在其厚度方向作一维膨胀,而横向膨胀可以忽略,这样,样品加热之后的面密度就与初始面密度相同.于是可以通过对样品的初始面密度测量近似给出热样品的面密度.在面密度已知的情况下,根据(1)式和(3)式就能够得到样品的频率相关辐射不透明度参数 $\mu(\nu)$.

4 理论计算及其与实验测量的比较

采用 LTE 近似并根据辐射流体力学数值模拟给出的等离子体温度密度参数,对铝等离子体的 1s—2p 跃迁吸收谱进行了理论计算.计算中,对于束缚-束缚吸收采用 COWAN 程序计算的原子(离子)能级和振子强度,包含从类 He 离子到类 Ne 离子的主量子数 $n \leq 6$ 、轨道量子数 $l \leq 3$ 的所有原子组态;对于束缚-自由跃迁吸收,采用平均原子模型进行计算;同时,不考虑自由-自由跃迁对吸收的贡献,因为在实验测量的波长范围内,其对总吸收的贡献非常小.于是,总的吸收系数可表示成如下

形式:

$$\mu(\nu) = \frac{1}{\rho} \sum_i \left(\sum_{ll'} N_{il} \sigma_{ill'}(\nu) + \sum_l N_{il} \sigma'_{il}(\nu) \right) \quad (4)$$

其中 $\sigma_{ill'}(\nu)$ 表示第 i 离化态离子从能级 l 到 l' 的线吸收截面, $\sigma'_{il}(\nu)$ 表示第 i 离化态离子能级 l 的光离化截面. N_{il} 表示处于能级 l 的离子密度.图5是理论计算的六个温度密度点 Al 等离子体的 1s—2p 跃迁辐射透过率.从图中可以看到,随着温度的升高,吸收特征从低温时的主要来自低离化度离子逐渐转变到高温时的高离化度离子,即从图中标示的类 F (F-like) 离子到类 He (He-like) 离子,反映出对温度密度状态的敏感特征,尤其是受温度的影响较大,而密度的影响相对较小.正是由于这种特性,Al 元素的 1s—2p 跃迁吸收谱常被用于等离子体温度诊断.此外,需要说明,在本计算中,虽然在吸收谱线的处理上采用 DTA 模型,但在等离子体的能级布居数分布计算时采用的是 UTA 模型,因此本计算模型实际上是 UTA 与 DTA 相结合的一种混合模型(离化态分布和能级布居数计算采用 UTA 模型,光谱计算采用 DTA 模型).由于能级布居数计算通常在吸收谱总计算时间中占有很大份额,因此这种混合模型在计算速度接近 UTA 模型,同时在很大程度上保留了 DTA 模型在吸收谱结构精确性方面的优点.

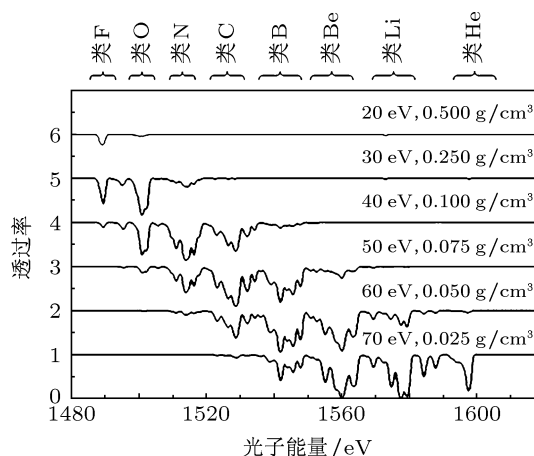


图5 采用 DTA 与 UTA 混合模型计算的 Al 等离子体辐射透过率

由于实验测量为时间积分方式,为了便于分析,采用加权平均方法^[12],对理论计算结果进行了时间积分处理.实验测量及其与理论计算结果的比较如图6所示.通过比较可以看出,计算的吸收谱与实验测量符合很好,在总体上比较准确地反映了 Al 样品等离子体中的时间平均离化分布情况.这表明,在激光功率密度 $\sim 10^{14}$ W/cm² 的条件下用激光直

接加热多层靶的方式将样品加热到较高温度并通过自背光法对其辐射吸收性质进行实验测量是可行的。

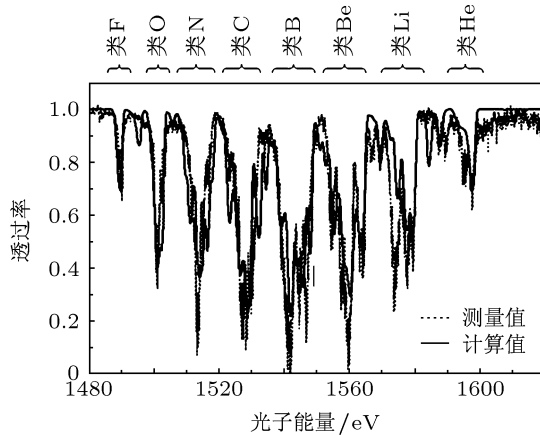


图6 激光加热 Au/CH/Al/CH 多层膜靶中铝等离子体的辐射吸收谱(辐射透过率)

从实验结果可以看出, 由于采用时间积分测量方式, Al 样品等离子体加热过程中出现的多种离化度离子(从类 F 离子到类 He 离子)的吸收特征都包含在实验测量的时间积分吸收谱中. 该测量结果可以反映样品等离子体在一定温度密度状态范围内的平均吸收特性, 对于验证基于激光直接吸收自背光法这一辐射不透明度实验技术也提供了强有力的实验证据, 不过, 这种时间积分测量方式尚不能精确给出确定温度密度状态下等离子体的辐射不透明度参数. 要获得一套精确的辐射不透明度数据,

须采用时间分辨测量方式, 并在吸收谱测量的同时诊断样品的温度和密度参数, 得到确定温度和密度状态下样品的辐射不透明度. 具体方法可参见文献 [7] 对 Z-pinch 装置辐射不透明度实验的介绍.

5 结论

本工作提出了激光直接加热自背光法开展稠密等离子体辐射不透明度测量的实验靶构型, 并通过数值模拟对激光与靶相互作用过程进行了辐射流体力学模拟, 确定了基本的靶参数. 在星光 II 激光装置上利用激光直接加热 Au/CH/Al/CH 多层平面靶和自背光法测量了 Al 等离子体的 k 壳层吸收谱, 并通过与理论计算结果进行比对, 成功解释了吸收谱测量结果. 研究表明, 通过靶结构优化设计, 利用激光直接加热自背光法在较小规模的单路激光装置上(功率密度 $\sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$) 开展稠密等离子体辐射不透明度特性研究是可能的.

对于诸如 KrF (XeCl) 等目前发展中的功率密度较小的激光装置, 为了加热样品, 必须减小 Au 层与 CH 缓冲层的厚度以减少激光能量损耗, 这时, 自背光靶中背光源和样品之间的流体力学相互作用将会增强, 使得样品状态更难控制; 同时, Au 层变薄之后其总体辐射强度也会随之降低, 使实验测量更为困难. 因此, 对于低功率装置而言, 要开展不透明度实验, 还须在靶结构优化设计以及提高探测器灵敏度方面开展进一步的探索.

- [1] Rogers F J, Iglesias C A 1994 *Science* **263** 50
- [2] Perry T S, Davison S J, Serduke F J D, Back D R, Smith C C, Foster J M, Doyas R J, Ward R A, Iglesias C A, Rogers F J, Abdallah J Jr, Stewart R E, Kilkenny J D, Lee R W 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3784
- [3] Perry T S, Springer P T, Fields D F 1996 *Phys. Rev. E* **54** 5617
- [4] Perry T S, Springer P T, Fields D F, Bach D R, Serduke F J D, Iglesias C A, Rogers F J, Nash J K, Chen M H, Wilson B G, Goldstein W H, Rozsynai B, Ward R A, Kilkenny J D, Doyas R, DaSilva L B, Back C A, Cauble R, Davidson S J, Foster J M, Smith C C, Bar-Shalom A, Lee R W 1998 *Phys. Rev. E* **58** 3739
- [5] Springer P T, Fields D J, Wilson B G, Nash J K, Goldstein W H, Iglesias C A, Rogers F J, Swenson J K, Chen M H, Bar-Shalom A, Stewart R E 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 3735
- [6] Springer P T, Wong K L, Iglesias C A, Hammer J H, Porter J L, Toor A, Goldstein W H 1997 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **58** 927
- [7] Kilcrease D P 2005 *Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-05-7470*
- [8] Bailey J E, Rochau G A, Iglesias C A, Abdallah J Jr, MacFarlane J J, Golovkin I, Wang P, Mancini R C, Lake P W, Moore T C, Bump M, Garcia O, Mazevet S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 265002
- [9] Zhang J Y, Yang J M, Xu Y, Yang G H, Ding Y N, Yan J, Yuan J M, Ding Y K, Zheng Z J, Zhao Y, Hu Z M 2009 *Phys. Rev. E* **79** 016401
- [10] Xu Y, Zhang J Y, Yang J M, Pei W B, Ding Y K, Lai D X, Meng G W, Luo Z 2007 *Physics of Plasmas* **14** 052701
- [11] Zhang J Y, Yang J M, Xu Y, Yang G H, Yan J, Meng G W, Ding Y N, Wang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 985 (in Chinese) [张继彦, 杨家敏, 许琰, 杨国洪, 颜君, 孟广为, 丁耀南, 汪艳 2008 物理学报 **57** 985]
- [12] Zhang J Y, Yang G H, Yang J M, Ding Y N, Zhang B H, Zheng Z J, Yan J 2007 *Physics of Plasmas* **14** 103301

Investigations on radiative opacity measurement by the method of direct laser-heating and self-backlighting*

Zhang Ji-Yan^{1)†} Yang Jia-Min¹⁾ Yang Guo-Hong¹⁾ Ding Yao-Nan¹⁾ Li Jun¹⁾
Yan Jun²⁾ Wu Ze-Qing²⁾ Ding Yong-Kun¹⁾ Zhang Bao-Han¹⁾ Zheng Zhi-Jian¹⁾

1) (*Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China*)

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

(Received 1 February 2013; revised manuscript received 16 June 2013)

Abstract

A target designed for opacity studies of dense plasmas by laser direct heating and self-backlighting technique was presented and tested. The backlight source and sample plasma were generated by directing a frequency-tripled Nb-glass laser onto an Au/CH/Al/CH multilayer target on the XG-II laser facility, and the absorption of the sample plasma was obtained by measuring the attenuated backlight spectrum of the sample plasma. One-dimensional radiative hydrodynamic code Multi-1D was used to simulate the laser heating of the multilayer target, and the temperature and density profiles in the target were given. Experimental data were compared with the theoretically calculated spectra using the detailed-term-accounting model, which showed a temperature range from 20 eV to 70 eV in the sample plasma, a result in quite good agreement with the Multi-1D simulations.

Keywords: absorption spectroscopy, self-backlight, laser-produced plasma

PACS: 52.25.Os, 52.50.Jm, 61.05.Cj

DOI: 10.7498/aps.62.195201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China Grant No. 10875109), and the Fund of State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter (Grant No. SKLLIM0903).

† Corresponding author. E-mail: zhangjiyanzjy@sina.com