

专题: 原子分子和材料物性数据

基于神光 III 原型装置的辐射加热碳等离子体 辐射不透明度实验研究*

赵阳 青波 熊刚 张志宇 孙奥 杨国洪 赵妍 张玉雪
黄成武 朱托 宋天明 李丽灵 李晋 车兴森
詹夏宇 张继彦[†] 董云松 杨家敏

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理全国重点实验室, 绵阳 621900)

(2025 年 5 月 7 日收到; 2025 年 6 月 2 日收到修改稿)

辐射不透明度实验数据用于评估不透明度理论模型及其计算精度. 针对惯性约束聚变点火靶壳层材料碳的辐射不透明度数据研究需求, 本工作在神光 III 原型大型激光装置上开展了辐射加热碳等离子体的辐射不透明度实验研究. 实验中采用 8 路纳秒激光注入锥柱型金黑腔产生高温 X 光辐射场, 通过辐射场加热黑腔中心的 CH 薄膜产生高温等离子体, 并利用 multi-1D 程序模拟了等离子体的温度和密度时间演化过程. 采用空间分辨门控平焦场光栅谱仪结合第 9 路束匀滑面背光技术, 在同一发次中对背光经过 CH 半样品的吸收光谱和背光源谱进行测量. 最后, 将实验获得的碳离子 (温度 65 eV, 密度 0.003 g/cm^3) 在 300—500 eV 能区的透过率谱与 DCA/UTA 光谱理论计算结果进行比较. 本文数据集可在 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00153> 中访问获取.

关键词: 辐射不透明度, 惯性约束聚变, 吸收光谱**PACS:** 52.70.La, 52.50.Jm, 32.30.Rj**DOI:** 10.7498/aps.74.20250600**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250600

1 引言

辐射不透明度 (radiative opacity) 是描述等离子体对光子吸收能力的物理参数, 在高温等离子体中对辐射能量的运输起支配作用, 在惯性约束聚变、天体物理等高能量密度物理研究领域具有基础科学意义^[1-6]. 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) 和桑迪亚国家实验室 (SNL) 等研究机构将辐射不透明度实验研究作为强激光和 Z-pinch 等大科学装置上的重要研究内容之一.

在惯性约束聚变研究的点火靶设计中, 碳基材料如辉光放电聚合物 (glow discharge polymer, GDP) 和高密度碳 (high density carbon, HDC) 是靶丸外壳的主要烧蚀材料^[7], 其辐射性质对黑腔辐射到内爆流体的耦合效率以及后续的内爆过程都具有关键作用^[8]. 在现有实验典型黑腔辐射温度下, 由于高温碳等离子体的 K 壳层辐射跃迁能量与黑腔 Planck 辐射场的峰值辐射光子能量相当, 其 X 光吸收特性或辐射不透明度参数在能量分配方面扮演重要角色. 因此, 作为影响点火靶理论设计可靠性的关键变量, 有必要建立碳基烧蚀材料的辐射不透明度实验测量能力, 以用于对点火靶烧蚀行

* 国防基础科研核科学挑战专题 (批准号: TZ2018005, TZ2018001) 和国家自然科学基金 (批准号: 12374261, 12335015, 12375238, U2430206) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhangjiyanzjy@163.com

为的精确理论模拟与预测.

针对低 Z 材料碳, 目前主要开展了基于辐射烧蚀的平均辐射不透明度综合检验实验^[9], 通过烧穿辐射流的变化来考察包含所有光子能量的平均辐射不透明度, 但针对不同 X 射线光子能量的细致分频辐射不透明度测量的实验较少. 由于高温辐射不透明度实验对驱动器能力与诊断精度的要求非常苛刻, 目前国内主要有中国工程物理研究院激光聚变研究中心开展了基于激光装置的高温等离子体的产生与分频辐射不透明度实验的综合测量工作. 通过发展晶体谱仪定量测谱技术^[10], 点背光时间分辨^[11]与门控时间分辨测量技术^[12,13], 掌握了强度、波长定量和时间分辨的光谱测量方法, 获得了中低 Z 材料的 X 射线吸收光谱和辐射不透明度实验数据^[14-18]. Yang 等^[19]在星光 II 装置上利用单路纳秒激光的实验条件开展了初步的 CHO 材料的 K 壳层辐射吸收谱测量, 实验中采用平焦场光栅配 X 光胶片进行了初步的吸收光谱测量, 但由于无法测量背光源谱未得到透过率谱. 后来, Zhang 等^[20]在神光 II 装置上利用黑腔辐射驱动产生了热平衡的样品, 通过在不同发次中分别测量 CH 全样品的吸收谱和背光源谱, 得到了初步的透过率光谱. 针对全样品吸收谱测量发次中的背光源强度与背光源测量发次中的背光源强度差异, 本工作在神光 III 原型装置上进一步开展基于 CH 半样品的吸收光谱和背光源谱同时测量, 通过在同一发次中同时获得 CH 的吸收谱与背光源谱, 避免了不同发次背光源强度差异的影响, 获得了可靠的透过率光谱, 实验数据可以为辐射不透明度理论模型校验提供参考.

2 实验方法及排布

实验在神光 III 原型激光装置上开展, 实验排布如图 1 所示. 采用 8 路束匀滑 (焦斑直径 $\Phi 500 \mu\text{m}$) 纳秒激光 (每路能量 300 J, 脉宽 1 ns, 三倍频) 注入长度为 3000 μm 、激光注入直径 $\Phi 800 \mu\text{m}$ 的锥柱型黑腔. 8 路激光通过与金腔壁相互作用产生高温等离子体以及 X 射线发射, 最终在黑腔内形成高温 X 光辐射场^[21]. 本实验采用锥柱型黑腔构型可以避免激光打靶点的散射激光对黑腔中心样品的非均匀加热, 以及光子能量在 2—4 keV 能区的金 M 带发射对样品的预热, 因此黑腔中心样

品感受到的是近似黑体的 Plank 辐射场. 厚度为 0.5 μm 的 CH 膜样品 (密度 1.0 g/cm^3) 位于黑腔中心, 辐射将加热 CH 样品至高温平衡状态. 实验中采用平响应 X 光探测器 (flat-response X-ray detector, FXRD)^[22] 测量黑腔注入口的辐射温度.

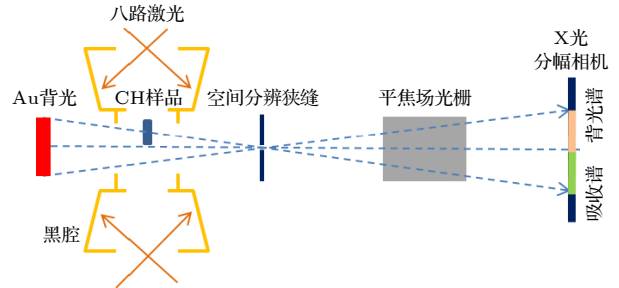


图 1 实验排布示意图

Fig. 1. Schematic of the experimental setup.

第 9 路束匀滑激光 (600 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 脉宽 1 ns, 能量 1000 J, 三倍频) 烧蚀 Au 平面靶产生亚 keV 能区准连续的 600 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的 X 射线面背光源, 第 9 路激光与 8 路激光时间同步. 如图 1 所示, 600 μm 宽的面背光穿过黑腔中心的 300 μm 宽 CH 样品, 经过 50 μm 宽的空间分辨狭缝进行空间成像, 再通过 2400 line/mm 的变栅距平场光栅进行色散, 最后由门控 X 射线分幅相机 (时间分辨 150 ps) 进行时间分辨记录. 由于我们采用的是半样品, 600 μm 宽的面背光通过空间分辨狭缝可以在记录面上同时获得经过 CH 样品的吸收谱区域, 以及不经过 CH 样品的背光源谱区域. 通过上述实验设计, 可以在同一发次中测量时间分辨 (150 ps)、空间分辨 (50 μm) 和谱分辨 ($E/\Delta E > 100$) 的吸收光谱与背光源谱.

3 流体力学模拟

由于注入口测量的辐射温度不能直接表征黑腔中心的辐射温度, 前期我们通过视角因子结合再发射辐射流方法, 已经研究了锥柱腔注入口辐射温度与黑腔中心辐射温度的关系^[23]. 因此, 本实验中通过 FXRD 测量的注入口辐射温度可以得到黑腔中心样品位置感受到的辐射温度, 如图 2(a) 所示. 采用 Multi-1D 辐射流体力学模拟程序^[24] 计算了在峰值辐射温度约 80 eV 的辐射场加热条件下, 0.5 μm CH 样品的平均温度和密度演化时间过程, 如图 2(b) 所示. 与图 2 中辐射温度时间波形类似,

在 0.4 ns 之后样品的温度进入平缓演化区. 实验中采用 X 射线分幅相机进行约 150 ps 时间分辨的 X 光谱记录, 在 0.65 ns 时刻附近, 样品的温度为 (65 ± 5) eV, 密度为 (0.003 ± 0.002) g/cm³, 选取该时刻进行 X 射线光谱诊断测量. 图 3 给出了 0.65 ns 时刻的样品温度密度空间分布, 由于辐射加热的 CH 样品会发生膨胀稀疏, 空间上的温度和密度状态存在不均匀分布, 中心温度和密度略高而两侧略低.

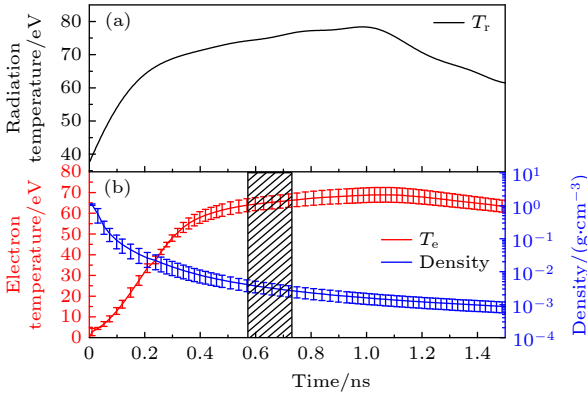


图 2 CH 样品的辐射流体力学模拟 (a) 辐射温度时间演化; (b) 温度和密度时间演化
Fig. 2. Hydrodynamic simulation of the CH sample: (a) The temporal evolution of radiation temperature at the sample; (b) the temporal evolutions of temperature and density.

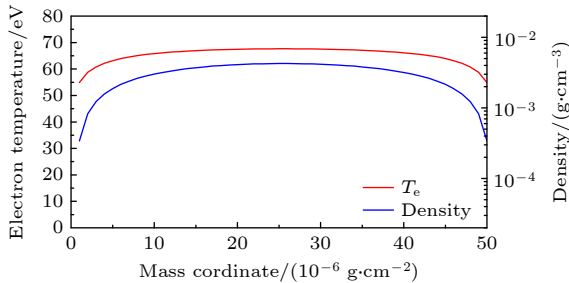


图 3 0.65 ns 时刻 CH 样品的温度密度空间分布
Fig. 3. Temperature and density profile of the CH sample at 0.65 ns.

4 光谱实验结果

实验中采用第 9 路长脉冲激光 (脉宽 1 ns, 三倍频能量 1000 J) 烧蚀 Au 平面靶获得了同样脉宽为 1 ns 的亚 keV 能区 X 射线背光源. 由于第 9 路激光与 8 路激光时间同步, 为了获得 0.65 ns 时刻的 X 光谱数据, 将门控 X 光分幅相机的测量窗口中心时刻设置在 0.65 ns. 在平焦场光栅谱仪的谱分辨与运行状态检测实验中, 已通过测量碳的

K 壳层发射光谱线作为参考谱线, 并结合平焦场光栅谱仪的定标公式进行波长定标, 通过测量发射光谱线的半高宽确定在 300—500 eV 能区的谱分辨 $(E/\Delta E)$ 约为 150.

实验在同一打靶发次中测量得到了空间与时间分辨光谱图像, 如图 4 所示. 空间方向分为背光源区和吸收谱区, 在吸收谱区存在较明显的 C⁴⁺和 C⁵⁺离子吸收线.

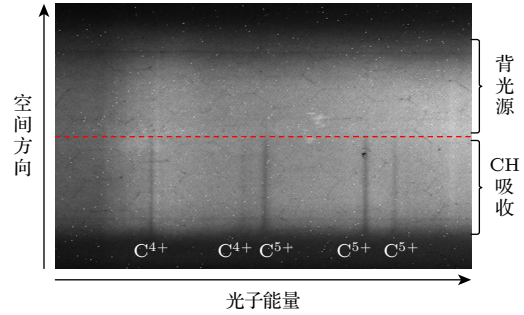


图 4 空间分辨的 X 光吸收与背光源谱图像
Fig. 4. Space-resolved X-ray absorption and backlighter spectra.

为了获得能够与理论模拟直接比较的透过率光谱, 在实验中需要获得 X 射线背光源谱强度, 该背光源经过 CH 样品吸收后的吸收谱强度, 以及吸收谱中包含的 CH 样品自发射谱, 最后通过背光源谱、吸收谱和自发射谱可以处理得到透光率光谱:

$$T(v) = e^{-\mu(v) \cdot \rho l} = \frac{I_{\text{absorption}} - I_{\text{emission}}}{I_{\text{backlighter}}}, \quad (1)$$

其中 $\mu(v)$ 为分频辐射不透明度; ρl 为样品的面密度; $I_{\text{absorption}}$, I_{emission} 和 $I_{\text{backlighter}}$ 分别为吸收谱强度、自发射谱强度和背光源谱强度. 实验在不同的发次中, 测量了样品的自发射光谱, 发现自发射的强度远小于背光源和吸收谱的强度, 因此在数据处理中忽略自发射的影响. 本实验中认为样品在加热过程中是一维膨胀, 所以在 0.65 ns 时刻的面密度为样品的初始面密度 ($50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$).

实验得到 300—500 eV 区间的背光源谱和吸收谱, 以及处理得到的透过率光谱, 如图 5 所示. 图 5(b) 给出了温度 65 eV、密度 0.003 g/cm³、面密度 $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 条件下的 DCA/UTA 光谱理论模拟^[25], 以及与实验透过率光谱的比较. 理论模拟显示 C⁴⁺离子占比为 10%, C⁵⁺离子占比为 55%, 平均离化度为 5.2. 理论实验光谱对比结果显示, 在 308 eV 和 355 eV 的两条谱线分别为 C⁴⁺离子的

1s-2p 和 1s-3p 吸收线, 理论模拟结果相对于实验测量结果存在 8 eV 的蓝移. 367 eV, 436 eV, 460 eV 和 470 eV 的 4 条谱线分别为 C⁵⁺ 离子的 1s-2p, 1s-3p, 1s-4p 和 1s-5p 吸收线, 且理论和实验谱线基本符合. 总体来说, 实验与理论模拟谱线整体比较一致, 谱线强度分布的偏差主要来源于在 150ps 时间窗口内样品状态的时间演化以及厚度方向上的空间不均匀.

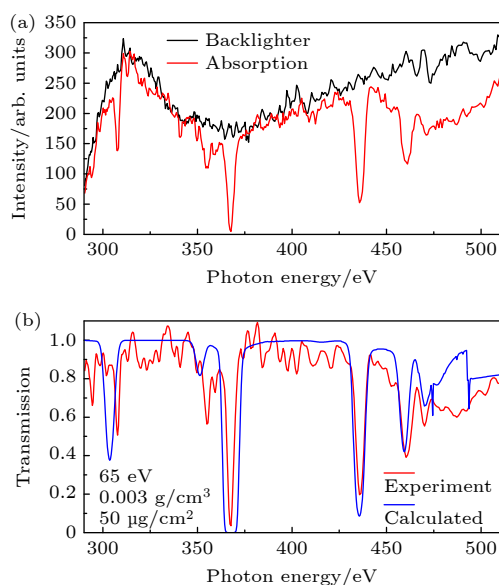


图 5 (a) 实验背光源谱与吸收谱; (b) 实验与理论透过率光谱的比较

Fig. 5. (a) Experimental backlighter and absorption spectra; (b) the comparison of the measured transmission spectrum with the calculated result.

5 结 论

在神光 III 原型装置上, 开展了高温碳等离子体的辐射不透明度实验测量. 实验采用 CH 半样品, 结合 2400 line/mm 平焦场光栅配空间分辨狭缝, 以及 X 光分幅相机记录, 实现了在同一发次同一时刻中背光源谱和吸收谱的同时测量, 避免了以前自背光实验无法测量背光源, 以及全样品实验中不同发次背光源强度差异的影响, 获得了可靠的透过率光谱. 采用 Multi-1D 辐射流体力学模拟得到 0.65 ns 延迟时刻样品的温度为 (65 ± 5) eV, 密度为 (0.003 ± 0.002) g/cm³. 将实验得到的透过率光谱与 DCA/UTA 光谱模拟进行比较, 理论与实验光谱整体符合较好. 本项实验得到的样品温度为 65 eV、平均离化度为 5.2, 与惯性约束聚变靶丸预

脉冲烧蚀阶段的状态相当, 对相关理论模型具有借鉴意义. 通过本工作的亚 keV 能区碳等离子体辐射不透明度实验的成功测量, 可以为高能密度物理和天体物理研究中更多低 Z 元素 (如氧、氮等) 的辐射不透明度与光谱特性研究奠定实验基础, 并促进理论模型发展.

数据可用性声明

支撑本研究成果的数据集可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00153> 中访问获取.

参考文献

- [1] Rogers F J, Iglesias C A, 1994 *Science* **263** 50
- [2] Perry T S, Davidson S J, Serduke F J D, Bach D R, Smith C C, Foster J M, Doyas R J, Ward R A, Iglesias C A, Rogers F J, Abdallah J, Stewart R E, Kilkenny J D, Lee R W 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3784
- [3] 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
- [4] Bailey J E, Nagayama T, Loisel G P, Rochau G A, Blancard C, Colgan J, Cosse P, Faussurier G, Fontes C J, Gilleron F, Golovkin I, Hansen S B, Iglesias C A, Kilcrease D P, MacFarlane J J, Mancini R C, Nahar S N, Orban C, Pain J C, Pradhan A K, Sherrill M, Wilson B G 2015 *Nature* **517** 56
- [5] Nagayama T, Bailey J E, Loisel G P, Dunham G S, Rochau G A, Blancard C, Colgan J, Cosse P, Faussurier G, Fontes C J, Gilleron F, Hansen S B, Iglesias C A, Golovkin I E, Kilcrease D P, MacFarlane J J, Mancini R C, More R M, Orban C, Pain J C, Sherrill M E, Wilson B G 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 235001
- [6] Gao C, Liu Y P, Yan G P, Yan J, Chen X Q, Hou Y, Jin F T, Wu J H, Zeng J L, Yuan J M 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 183101 (in Chinese) [高城, 刘彦鹏, 严冠鹏, 闫杰, 陈小棋, 侯永, 靳奉涛, 吴建华, 曾交龙, 袁建民 2023 *物理学报* **72** 183101]
- [7] MacKinnon A J, Meezan N B, Ross J S, Pape S L, Hopkins L B, Divol L, Ho D, Milovich J, Pak A, Ralph J, Döppner T, Patel P K, Thomas C, Tommasini R, Haan S, MacPhee A G, McNaney J, Caggiano J, Hatarik R, Bionta R, Ma T, Spears B, Rygg J R, Benedetti L R, Town R P J, Bradley D K, Dewald E L, Fittinghoff D, Jones O S, Robey H R, Moody J D, Khan S, Callahan D A, Hamza A, Biener J, Celliers P M, Braun D G, Erskine D J, Prsbrey S T, Wallace R J, Kozioziemski B, Dylla-Spears R, Sater J, Collins G, Storm E, Hsing W, Landen O, Atherton J L, Lindl J D, Edwards M J, Frenje J A, Gatu-Johnson M, Li C K, Petrasso R, Rinderknecht H, Rosenberg M, Séguin F H, Zylstra A, Knauer J P, Grim G, Guler N, Merrill F, Olson R, Kyrala G A, Kilkenny J D, Nikroo A, Moreno K, Hoover D E, Wild C, Werner E 2014 *Phys. Plasmas* **21** 056318
- [8] Zylstra A B, Kritcher A L, Hurricane O A, Callahan D A, Baker K, Braun T, Casey D T, Clark D, Clark K, Döppner T, Divol L, Hinkel D E, Hohenberger M, Kong C, Landen O L, Nikroo A, Pak A, Patel P, Ralph J E, Rice N, Tommasini R, Schoff M, Stadermann M, Strozzi D, Weber C, Young C,

- Wild C, Town R P J, Edward M J 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 025001
- [9] Olson R E, Rochau G A, Landen O L, Leeper R J 2011 *Phys. Plasmas* **18** 032706
- [10] Zhao Y, Wei M X, Deng B, Zhu T, Hu Z M, Xiong G, Shang W L, Kuang L Y, Yang G H, Zhang J Y, Yang J M 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 060701
- [11] Zhao Y, Zhang J Y, Liu J S, Yuan X, Jin F T 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 043505.
- [12] Xiong G, Yang G H, Li H, Zhang J Y, Zhao Y, Hu Z M, Wei M X, Qing B, Yang J M, Liu S Y, Jiang S N 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 43104
- [13] Qing B, Wei M X, Yang G H, Zhang Z Y, Zhao Y, Xiong G, Lv M, Hu Z M, Zhang J Y, Liu S Y, Yang J M 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 083108
- [14] 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
- [15] Zhao Y, Shang W L, Xiong G, Jin F T, Hu Z M, Wei M X, Yang G H, Zhang J Y, Yang J M 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 113202
- [16] Xiong G, Yang J M, Zhang J Y, Hu Z M, Zhao Y, Qing B, Yang G H, Wei M X, Yi R Q, Song T M, Li H, Yuan Z, Lv M, Meng X J, Xu Y, Wu Z Q, Yan J 2016 *Astrophys. J.* **816** 36
- [17] Qing B, Zhang Z Y, Wei M X, Yang Y M, Yang Z W, Yang G H, Zhao Y, Lv M, Xiong G, Hu Z M, Zhang J Y, Yang J M, Yan J 2018 *Phys. Plasma* **25** 023301
- [18] Xiong G, Qing B, Zhang Z Y, Jing L F, Zhao Y, Wei M X, Yang Y M, Hou L F, Huang C W, Zhu T, Song T M, Lv M, Zhao Y, Zhang Y X, Yang G H, Wu Z Q, Yan J, Zou Y M, Zhang J Y, Yang J M 2024 *Matter Radiat. Extremes* **9** 047801
- [19] Yang J M, Ding Y N, Yan J, Li J M, Zhang B H, Yang G H, Zhang W H, Wang Y M 2002 *Phys. Plasmas* **9** 678
- [20] Zhang J Y, Yang J M, Xiong G, Meng X J, Yang G H, Zhao Y, Qing B, Li H, Yuan Z, Yang Y M, Wu Z Q, Yan J, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2015 *Science and Technology of High Energy Density* **1** 1
- [21] Zhao Y, Yang J M, Zhang J Y, Yang G H, Wei M X, Xiong G, Song T M, Zhang Z Y, Bao L H, Deng B, Li Y K, He X A, Li C G, Mei Y, Yu R Z, Jiang S E, Liu S Y, Ding Y K Zhang B H 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 155003
- [22] Li Z C, Jiang X H, Liu S Y, Huang T X, Zheng J, Yang J M, Li S W, Guo L, Zhao X F, Du H B, Song T M, Yi R Q, Liu Y G, Jiang S E, Ding Y K 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 073504
- [23] Zhang Z Y, Zhao Y, Zhang J Y, Hu Z M, Jing L F, Qing B, Xiong G, Lv M, Du H B, Yang Y M, Zhan X Y, Yu R Z, Mei Y, Yang J M 2019 *Phys. Plasmas* **26** 072704
- [24] Ramis R, Schmalz R, Meyer-Ter-Vehn J 1988 *Comput. Phys. Commun.* **49** 475
- [25] Yan J, Qiu Y B 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056401

SPECIAL TOPIC—Atomic, molecular and materials properties data

Experimental study on radiative opacity of radiatively heated carbon plasma at SGIII prototype laser facility*

ZHAO Yang QING Bo XIONG Gang ZHANG Zhiyu SUN Ao
YANG Guohong ZHAO Yan ZHANG Yuxue HUANG Chengwu
ZHU Tuo SONG Tianming LI Liling LI Jin CHE Xingsen
ZHAN Xiayu ZHANG Jiyan[†] DONG Yunsong YANG Jiamin

(National Key Laboratory of Plasma Physics, Research Center of Laser Fusion,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 7 May 2025; revised manuscript received 2 June 2025)

Abstract

Experimental opacity data are used to evaluate the opacity models and their accuracy of the calculated results. In order to study the opacity of carbon material in the shell of the inertial confinement fusion ignition target, the experimental study of the spectrally-resolved opacity of radiatively heated carbon plasma is carried out on the Shenguang III prototype laser facility. Eight nanosecond lasers are injected into a conical-cylindrical gold hohlraum and converted into intense X-ray radiation, the high-temperature plasma is obtained by radiatively heating the CH film in the center of the hohlraum. Temporal evolutions of temperature and density of carbon plasma are simulated with the Multi-1D code. By using a spatially-resolved flat-field grating spectrometer combined with the ninth beam smoothing surface backlight technology, the absorption spectra of CH sample and the backlighter spectra are measured in one shot. Finally, the experimental transmission spectra of carbon plasma (with a temperature of 65 eV and density of 0.003 g/cm³) in a range of 300–500 eV are obtained and compared with the calculated results of a DCA/UTA opacity code. The datasets presented in this paper are openly available at <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00153>.

Keywords: radiative opacity, inertial confinement fusion, absorption spectra

PACS: 52.70.La, 52.50.Jm, 32.30.Rj

DOI: [10.7498/aps.74.20250600](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250600)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250600](https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00153)

* Project supported by the Science Challenge Project (Grant Nos. TZ2018005, TZ2018001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12374261, 12335015, 12375238, U2430206).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangjiyanzjy@163.com

基于神光III原型装置的辐射加热碳等离子体辐射不透明度实验研究

赵阳 青波 熊刚 张志宇 孙奥 杨国洪 赵妍 张玉雪 黄成武 朱托 宋天明 李丽灵 李晋 车兴森 詹夏宇
张继彦 董云松 杨家敏

Experimental study on radiative opacity of radiatively heated carbon plasma at SGIII prototype laser facility

ZHAO Yang QING Bo XIONG Gang ZHANG Zhiyu SUN Ao YANG Guohong ZHAO Yan
ZHANG Yuxue HUANG Chengwu ZHU Tuo SONG Tianming LI Liling LI Jin CHE Xingsen
ZHAN Xiayu ZHANG Jiyan DONG Yunsong YANG Jiamin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 155203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250600

CSTR: 32037.14.aps.74.20250600

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250600>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低密度铝铁金等离子体辐射不透明度数据库

Database of radiation opacity of low-density aluminum, iron and gold plasmas

物理学报. 2025, 74(12): 125202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250301>

局域热平衡Sn等离子体极紫外辐射不透明度和发射谱的理论研究

Theoretical investigation on extreme ultraviolet radiative opacity and emissivity of Sn plasmas at local-thermodynamic equilibrium

物理学报. 2023, 72(18): 183101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230455>

CO⁺分子离子X²Σ⁺, A²Π和B²Σ⁺态的不透明度

Opacities of X²Σ⁺, A²Π, and B²Σ⁺ states of CO⁺ molecule ion

物理学报. 2025, 74(12): 123101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250380>

氮气分子电子态的不透明度

Opacities of electronic states for nitrogen molecule

物理学报. 2022, 71(14): 143102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220043>

高能离子在稠密等离子体中的能量沉积和电子离子能量分配

Energy deposition and electron-ion energy partition of high-energy ions in dense plasmas

物理学报. 2025, 74(9): 093401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241763>

分子离子, 和态的不透明度

Molecular opacities of , A²Π_u and states of nitrogen cation

物理学报. 2022, 71(19): 193101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220734>