

CNIC-01444
CAEP-0048

自背光法辐射不透明度实验研究

**EXPERIMENTAL STUDY OF SELF-
BACKLIGHTING METHOD FOR OPACITY**

(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01444
CAEP-0048

自背光法辐射不透明度实验研究

丁耀南 杨家敏 李三伟 曹磊峰 王耀梅
张文海 陈波 于艳宁 王红斌
(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

针对星光 II 装置的实际条件, 提出了以金箔背侧 X 光辐射作为样品加热源兼作背光源的特色自背光法, 研究了辐射不透明度 (自由程) 实验方法。以波长为 $0.35 \mu\text{m}$, 能量约 80 J, 脉宽约 700 ps 的强激光注入特色自背光靶, 用空间分辨透射光栅配 X 光 CCD 由同一发打靶测得了半样品靶的源区、透射区和自发射区三区能谱分布图象, 又由不同发次打靶分别测得了源谱、透射谱。样品材料为厚度 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$, 密度为 2.7 g/cm^3 的铝膜, 以及密度为 0.042 g/cm^3 , 厚度为 $42 \mu\text{m}$ 的碳氢发泡材料。实验由不同打靶发次测得的源谱和透射谱, 初步获得了样品的谱分辨质量吸收系数, 进而用空间分辨透射光栅谱仪、由同一发打靶获得了样品考虑自发射的谱分辨质量吸收系数。对样品温度、密度条件进行了相应的实验与理论研究。初步讨论了热碳元素辐射不透明度 (Opacity)。

Experimental Study of Self-Backlighting Method for Opacity

(In Chinese)

DING Yaonan YANG Jiamin LI Sanwei CAO Leifeng
WANG Yaomei ZHANG Wenhai CHEN Bo
YU Yanning WANG Hongbin
(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

Self-backlighting method for opacity measurement has been suggested and studied, based on the actual condition of Xingguang II laser facility. An 80 J and 350 nm laser, which has a duration of about 700 ps, irradiates on a newly designed target and creates intense X-ray radiation acting as both heating source and backlighter source. The heated sample has been spatially imaged to obtain X-ray spectra from X-ray source region, transmission region and self-emission region of the sample at the same shot by spatially resolved transmission grating spectrometer in which dispersed X-ray is recorded by X-ray CCD. The samples are low-Z CH foam with density of 0.042 g/cm^3 , thickness of $42 \text{ }\mu\text{m}$ and mid-Z Al with density of 2.7 g/cm^3 , thickness of $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ or $1.0 \text{ }\mu\text{m}$. Mass absorption coefficients of the heated sample as function of the photon energy have been obtained experimentally in the same shot. The spectra line emitted from the heated CH foam has also been measured by OHM crystal spectrometer, which has been used to determine the temperature of the sample. The experimental results for opacity of carbon have been discussed.

引言

辐射不透明度（自由程）表征热物质对于 X 光辐射的吸收、衰减特性和高温物态系统的辐射能量传输起支配作用，具有物理学的基础意义，在天体物理、惯性约束聚变和核爆等高温物态系统的研究中都具有重要的应用需求背景。

辐射不透明度（自由程）的理论研究起始于古老的天体物理，由于辐射不透明度实验研究的困难性，长期以来缺乏实验研究。强激光技术和激光等离子体、惯性约束聚变（ICF）研究的发展，为辐射不透明度的研究提供了一种实验室研究手段。近二十年来，世界上开展 ICF 研究的各实验室都根据各自的条件不断进行探索和研究^[1~9]。

近十年，尤其是近几年以来，我们逐步对辐射不透明度研究的实验方法和诊断技术进行了探索研究^[10~15]。在以往研究的基础上，针对星光 II 装置的实际条件，提出了以金箔背侧 X 光辐射作为加热样品源并兼作背光源的特色自背光法，以铝和碳氢发泡材料为样品，研究了辐射不透明度（自由程）实验方法，采用半样品靶由同一发打靶获得样品源区、透射区和自发区的三区谱分布图象，得到了谱分辨的质量吸收系数。同时由不同发次打靶测得的源谱和样品的透射谱，初步得到了样品的谱分辨质量吸收系数，进而界定以温度、密度，初步给出了碳元素谱分辨的不透明度曲线。

1 实验方法的物理思想

辐射不透明度的研究大致有背光法和辐射热波法两大类。辐射热波法的实验主要测量辐射热波、冲击波和辐射温度，由相应的理论研究给出罗斯兰特平均辐射自由程。我们曾经观察到了铝样品的辐射热波、冲击波^[11]。该方法对理论的依赖性比较强，不能由实验直接给出不透明度数据。背光法通常除了一束激光加热样品之外，需要另外一束激光作为背光源穿透样品材料，研究热样品对背光源的吸收、衰减特性，采用谱分辨探测器，直接给出谱分辨的质量吸收系数。只要界定以样品温度、密度条件，质量吸收系数即为辐射不透明度，相应可以得到辐射自由程。自发辐射的影响是辐射不透明度研究的难点之一，针对星光 II 装置只有一束激光和靶室的实际条件，在近年探索研究的基础上，我们提出以金箔背侧 X 光辐射作为样品加热源兼作背光源研究辐射不透明度实验方法。特色自背光法物理思想如图 1 所示，由强激光辐照金箔，以金箔背侧 X 光辐射烧蚀加热样品，设计特定的束、靶、探测器几何，采用空间分辨谱仪，我们就可以由同一发打靶同时获取源谱

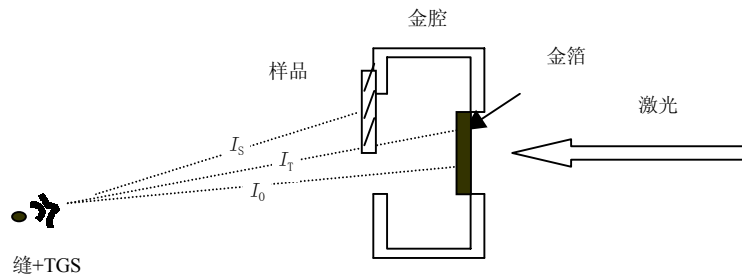


图1 特色自背光法物理思想

$I_0(\nu)$, 透射谱 $I_T(\nu)$ 和自发射谱 $I_S(\nu)$ 。根据辐射吸收、衰减指数规律, 并考虑自发射的影响, 即可由关系式: $(I_T(\nu) - I_S(\nu))/I_0(\nu) = e^{-k(\nu)d}$ 得到样品谱分辨的质量吸收系数 $k(\nu)$, 单位为 cm^2/g , 式中 d 为质量厚度, 单位为 g/cm^2 。另外, 为了考虑由不同发次打靶分别测得的有无样品的能谱以获取初步的质量吸收系数和研究弱的线谱发射, 我们还有全样品靶结构(样品覆盖靶端全部窄缝)的考虑。

2 靶设计与实验安排

新型特色自背光靶的结构如图 2 所示, 其特点是: 金箔背侧 X 光自背光均匀化, 辐射约束与增强, 源与样品几何限定(减小辐射源不均匀性影响), 源与样品隔离(避免力学效应影响), 严格的锥形屏蔽结构(避免注入信号的影响)等。

样品分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 的铝, 以及密度为 $0.042 \text{ g}/\text{cm}^3$, 厚度为 $42 \mu\text{m}$ 的碳氢发泡材料。选择低密度发泡材料的物理思想是基于辐射加热低密度样品时将产生超声速的辐射热波, 而密度几乎不变^[6], 可以把样品初始密度近似作为热样品密度。对于不透明度的研究可以初步给出样品密度数据。

探测器布置如图 3 所示, 图中, TGS 为空间分辨透射光栅谱仪, TG+XSC 为透射光栅 X 光扫描相机, CS 为大晶格晶体谱仪, LC 为激光能量卡计, PH1 和 PH2 为两台 X 光针孔相机, DANTE 为滤片 X 射线二极管亚千能谱仪。F-XRDA 为平响应 XRD 阵列。激光束正入射斜口腔, 以 45° 辐照金箔, 金箔实际厚度为 $0.18 \mu\text{m}$ 。空间分辨透射光栅谱仪, 在与激光束成 112.5° 的方向测量源谱、透射谱和自发射谱, 谱仪采用 $1050 \text{ 线}/\text{mm}$ 的透射光栅, 用 X 光 CCD 记录, 谱分辨为 0.25 nm 。在靶后用大晶格 OHM 晶体谱仪测量全样品自发射线谱, 晶体的晶格常数为 $2d = 6.354 \text{ nm}$, 衍射角为 $24^\circ \sim 41^\circ$, 测谱范围为 $0.3 \sim 0.5 \text{ keV}$, 记录介质采用已标定过的 5F 胶片。用 X 光针孔相机侧向观测样品膨胀等离子体 X 光辐射空间尺度。滤片 X 射线二极管亚千能谱仪和平响应 XRD 等探测器观测辐射源特性。打靶激光波长为 $0.35 \mu\text{m}$, 能量约 $60 \sim 80 \text{ J}$, 脉宽约 $700 \sim 800 \text{ ps}$ 。

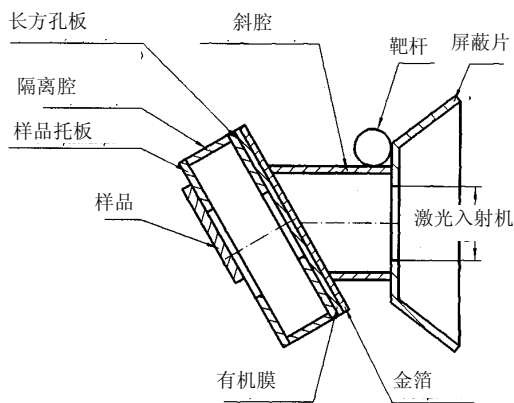


图 2 特色自背光靶结构图

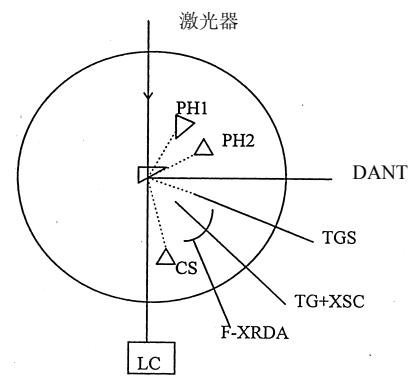


图 3 束、靶、探测器布置图

3 主要实验结果

3.1 半样品靶获得的谱分辨质量吸收系数

实验用空间分辨透射光栅谱仪测得了铝和碳氢发泡材料半样品靶的源区、透射区和自发射区的空间分辨分区辐射谱图象。在入射激光能量为 67.9 J，脉宽 800 ps 的条件下，测得厚度为 42 μm 的半样品碳氢发泡材料靶的分区谱分布图象如图 4 所示，图中照片的水平方向为空间（三区空间分布），与之垂直的方向为以波长色散表示的谱分布，中间为零级。图中同时给出了特定波长的源区、透射区和自发射区的强度分布，最强的对应于源区，其次为透射区，最弱的对应于自发射区。进而根据三区能谱的原始谱，对经过刻度的透射光栅及 X 光 CCD 的谱响应进行解谱处理，得到源区、透射区、自发射区三区能谱如图 5 所示。

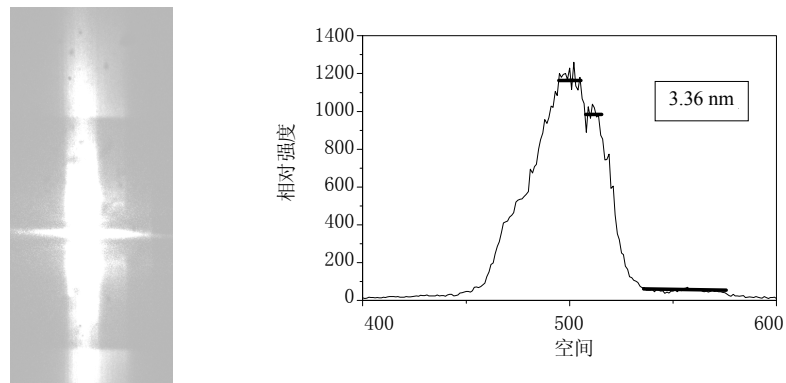


图 4 碳氢发泡材料样品靶的分区辐射谱图象

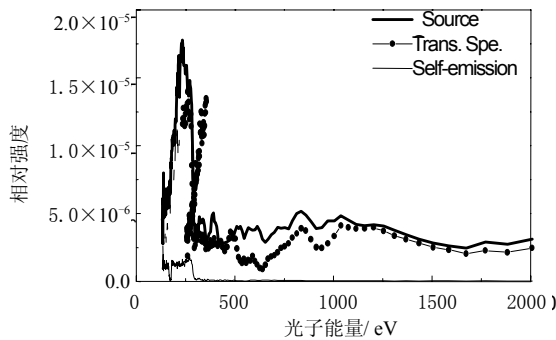


图 5 碳氢发泡样品三区能谱

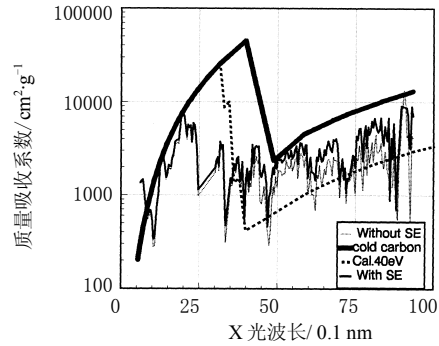


图 6 碳元素质量吸收系数

由同一发打靶获得源谱、透射谱和自发射谱分布得到样品的谱分辨质量吸收系数如图 6 所示。为了考察结果的可信性，图 6 中还给出了冷碳元素的质量吸收系数，以及不考虑

自发射的结果。此外，还给出了简化模型计算得到的温度为 40 eV 的碳元素的光电吸收系数。由图 6 可见，高能区（波长约小于 1.5 nm）冷材料的热样品质量吸收系数比较接近，表明高能区热样品材料的质量吸收系数主要来源于光电吸收过程。其余能区热样品吸收系数低于冷材料，表明热样品材料发生离化，外层电子数目减少，致使热样品光电吸收系数降低。对于热样品，在低能区考虑自发射的吸收系数高于不考虑自发射的吸收系数，表明测量热样品的不透明度中，考虑自发辐射的影响是必要的。图中给出的样品温度在 40 eV 条件下，计算结果可作为样品温度的一个参考，由于计算中只考虑光电吸收过程，给出的质量吸收系数偏低。

为进一步考察结果的可信性，我们还根据 X 光 CCD 记录，并考虑自发射得到的质量吸收系数与以往用 X 光胶片记录方式，不考虑自发射影响由全样品靶得到的结果作了比较（见图 7）。为了考察其合理性，图中还给出了冷碳元素的质量吸收系数和简化模型计算得到的温度为 40 eV 的碳元素的质量吸收系数。图中“·”表示胶片记录得到的结果。

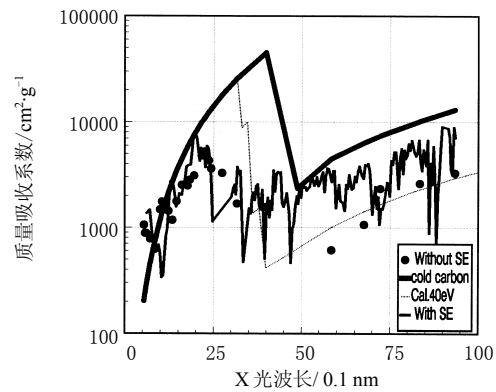


图 7 不同记录方式获得的碳元素质量吸收系数对照

为探索特色自背光法对中等原子序数材料样品的适用性，我们做了铝样品实验。在能量为 74.6 J，脉宽为 772 ps 的条件下，测得厚度为 1 μm 的半样品铝靶的源区、透射区、自发射区三区能谱图象如图 8 所示，照片曲线所示的意义同图 4。

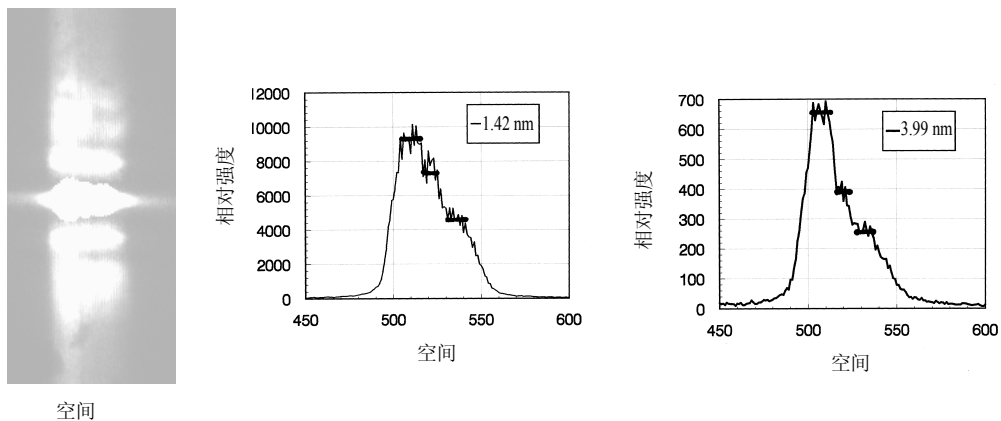


图 8 铝样品靶的分区辐射谱图象

3.2 全样品靶获得的谱分辨质量吸收系数

通过不同打靶发次实验测量，获得铝和碳氢发泡材料全样品靶的辐射透过谱与源辐射能谱的比较分别如图 9 (a)和图 9 (b) 所示，铝和碳氢发泡样品透过谱分别是在激光能量为

67.9 J 和 60.3 J，脉宽分别为 755 ps 和 680 ps 条件下获得的，源 X 光辐射谱是在打靶激光能量为 75.6 J，脉宽为 704 ps 条件下测得的。

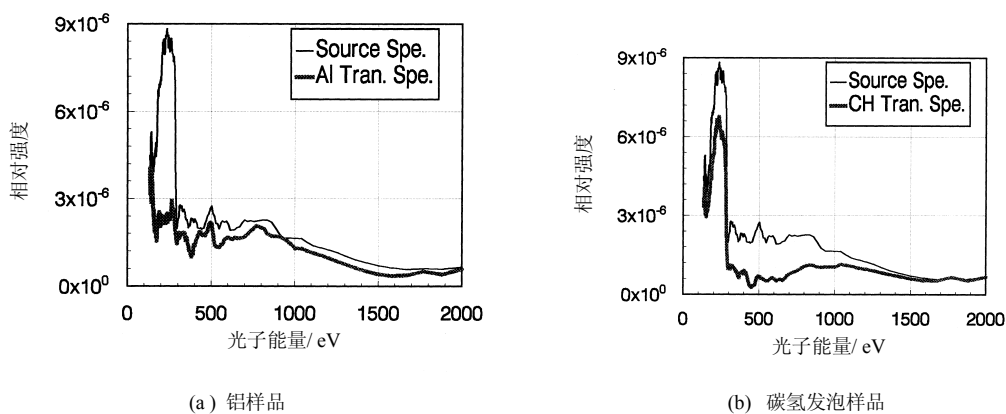


图 9 全样品辐射透过谱与源辐射能谱的比较

由图 9 中不同发次测得的源谱和碳氢发泡材料与铝材料的透过谱，经过处理，得到两种样品材料的谱分辨质量吸收系数曲线，测量结果如图 10 (a) 和图 10 (b) 所示，并与相应冷材料的吸收系数曲线进行了比较。

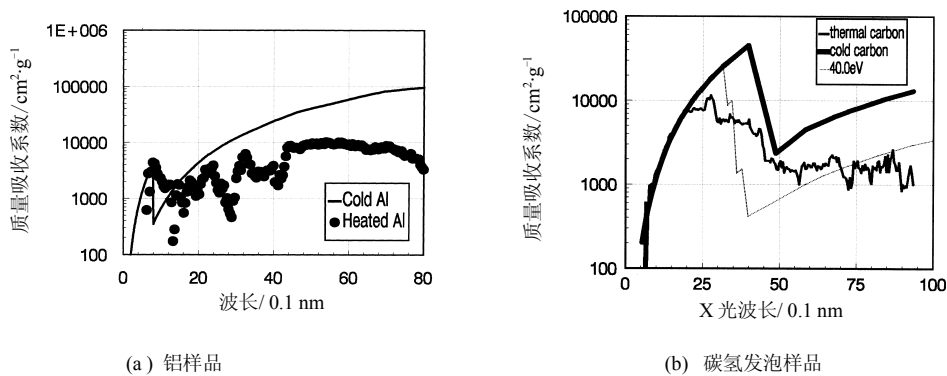


图 10 全样品靶获得的谱分辨质量吸收系数曲线

4 结论和讨论

鉴于辐射不透明度的重要性，针对星光 II 装置的实际条件，提出了具有自己特色的新型金箔背侧 X 光自背光法辐射不透明度（自由程）研究实验方法。实验获得了碳氢发泡材料样品的三区空间、能谱分辨图象，给出了考虑自发射的质量吸收系数，并与不考虑自发射的实验结果，冷碳元素的吸收系数，以及碳元素 40 eV 温度下的理论计算光电吸收曲

线进行了比较，结果是合理的。

高温物态材料的不透明度（自由程）不仅与样品材料原子序数有关，还与其温度、密度有关。只要界定了样品温度、密度条件，高温材料的质量吸收系数即为辐射不透明度。温度、密度往往由理论计算或实验与理论结合给出，由于选用了低密度碳氢发泡材料样品，辐射加热过程密度几乎不变，可以近似以其初始密度作为样品的密度。实验还初步测得了热碳氢样品的线发射（如图 11 所示）。采用局域热动平衡模型，利用实验测得的碳 He- α 和 He- β 给出的强度比^[16~18]，给出样品温度为 46 eV。这样，合理地忽略氢元素的影响，我们可初步得到热碳元素的谱分辨不透明度曲线（如图 12 所示）。



图 11 碳氢发泡材料线辐射

样品材料温度、密度的估算也可以考虑其它方法。如国外有人采用由热样品等离子体 X 光发射空间尺度推断样品密度的方法。我们用针孔相机侧向监测热样品膨胀尺度，粗估铝样品密度约为 $0.01 \sim 0.005 \text{ g/cm}^3$ 。另外，在完全热动平衡假设的近似下，能以 X 光发射总量推断辐射温度，作为样品温度。由样品材料吸收边的移动，也可推断温度。我们相应地对它们做了初步研究。

辐射不透明度研究的精密化和深入研究有待各方面实验条件的优化和理论与实验研究的切实结合。

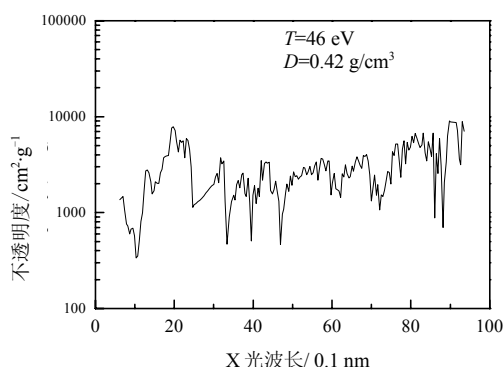


图 12 热碳元素的谱分辨不透明度曲线

参考文献

- 1 Springer R T, et al. Phys. Rev., 1992, 69(26): 3735
- 2 Velarde G, et al. Laser Interaction with Matter and Inertial Fusion. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1997
- 3 Smith C C, Quant J. Spectrosc. Radiat. Transfer., 1998, 59: 109
- 4 Fosten J M, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 67: 3255
- 5 Springer P T, et al. Phys. Rev. Lett, 1992, 69: 3735

- 6 Perry T S, et al. Phys. Rev. E., 1996, 54: 5617
- 7 Merdji H, et al. Phys. Rev. E., 1998, 57: 1042
- 8 Sigel R, et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 65: 587
- 9 Qrzechowski T F, et al. Phys. Rev. Lett., 1996, 77:3545
- 10 Ding Yaonan, et al. Nuclear Science and Techniques, 1998, 9(1): 14
- 11 Ding Yaonan, et al. Nuclear Science and Techniques, 1997, 8(1): 43
- 12 杨家敏等. 光学学报, 1997, 17(5): 599
- 13 杨家敏等. 强激光与粒子束, 1996, 8(2): 269
- 14 杨家敏等. 物理学报, 1998, 47(4)
- 15 杨家敏. 低 Z 材料辐射烧蚀特性研究: 中国工程物理研究院, 1998
- 16 Kanffman R L, Lee R W, Estabrook K. Phys. Rev., 1987, A35: 4286
- 17 W.Lochte-Holtgreven. Plasma Diagnostics, North-Holland, Amsterdam, 1968
- 18 Harilal S S, et al. J. Appl. Phys., 1997, 82: 2140



丁耀南：中国工程物理研究院研究员，1964年毕业于复旦大学。在 ICF 领域从事激光等离子体研究工作。

DING Yaonan: Professor. Graduated from Fudan University in 1964. Majoring in the experimental study of laser plasma in the ICF field.