

# 强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

## 激光惯性约束聚变中光学汤姆逊散射研究进展

李志超 赵航 龚韬 李欣 杨冬 蒋小华 郑坚 刘永刚 刘耀远 陈朝鑫 李三伟 李琦 潘凯强 郭亮 理玉龙  
徐涛 彭晓世 吴畅书 张桦森 郝亮 蓝可 陈耀桦 郑春阳 古培俊 王峰 蔡洪波 郑无敌 邹士阳 杨家敏  
江少恩 张保汉 朱少平 丁永坤

## Recent research progress of optical Thomson scattering in laser-driven inertial confinement fusion

Li Zhichao, Zhao Hang, Gong Tao, Li Xin, Yang Dong, Jiang Xiaohua, Zheng Jian, Liu Yonggang, Liu Yaoyuan, Chen Chaoxin, Li Sanwei, Li Qi, Pan Kaiqiang, Guo Liang, Li Yulong, Xu Tao, Peng Xiaoshi, Wu Changshu, Zhang Huasen, Hao Liang, Lan Ke, Chen Yaohua, Zheng Chunyang, Gu Peijun, Wang Feng, Cai Hongbo, Zheng Wudi, Zou Shiyang, Yang Jiamin, Jiang Shaoen, Zhang Baohan, Zhu Shaoping, Ding Yongkun

引用本文:

李志超, 赵航, 龚韬, 李欣, 杨冬, 蒋小华, 郑坚, 刘永刚, 刘耀远, 陈朝鑫, 李三伟, 李琦, 潘凯强, 郭亮, 理玉龙, 徐涛, 彭晓世, 吴畅书, 张桦森, 郝亮, 蓝可, 陈耀桦, 郑春阳, 古培俊, 王峰, 蔡洪波, 郑无敌, 邹士阳, 杨家敏, 江少恩, 张保汉, 朱少平, 丁永坤. 激光惯性约束聚变中光学汤姆逊散射研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 092004. doi: 10.11884/HPLPB202032.200130

Li Zhichao, Zhao Hang, Gong Tao, Li Xin, Yang Dong, Jiang Xiaohua, Zheng Jian, Liu Yonggang, Liu Yaoyuan, Chen Chaoxin, Li Sanwei, Li Qi, Pan Kaiqiang, Guo Liang, Li Yulong, Xu Tao, Peng Xiaoshi, Wu Changshu, Zhang Huasen, Hao Liang, Lan Ke, Chen Yaohua, Zheng Chunyang, Gu Peijun, Wang Feng, Cai Hongbo, Zheng Wudi, Zou Shiyang, Yang Jiamin, Jiang Shaoen, Zhang Baohan, Zhu Shaoping, Ding Yongkun. Recent research progress of optical Thomson scattering in laser-driven inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 092004. doi: 10.11884/HPLPB202032.200130

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200130>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 激光惯性约束聚变靶制备技术研究进展

Research progress of fabrication techniques for laser inertial confinement fusion target

强激光与粒子束. 2020, 32: 032001-1-032001-10 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200039>

#### kJ级宽带低相干激光驱动装置

kJ low-coherence broadband Nd:glass laser driver facility

强激光与粒子束. 2020, 32: 011004-1-011004-2 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190427>

#### 圆柱形等离子体对微波散射的数值模拟与实验研究

Microwave scattering by inhomogeneous plasma column

强激光与粒子束. 2017, 29: 053001 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.170043>

#### 磁化套筒惯性聚变研究进展

Research progress of Magnetized Liner Inertial Fusion

强激光与粒子束. 2020, 32: 052001-1-052001-13 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190357>

#### 激光等离子体诊断用Wolter型X射线显微镜的设计

Optical design of Wolter X-ray microscope for laser plasma diagnostics

强激光与粒子束. 2018, 30: 062002 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201830.170440>

神经网络在HL-2A装置汤姆逊散射数据处理中的应用

Artificial neural network approach applied to data processing of Thomson scattering on HL-2A

强激光与粒子束. 2019, 31: 022003 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180206>



·惯性约束聚变物理与技术·

## 激光惯性约束聚变中光学汤姆逊散射研究进展<sup>\*</sup>

李志超<sup>1</sup>, 赵 航<sup>1</sup>, 龚 韬<sup>1</sup>, 李 欣<sup>2</sup>, 杨 冬<sup>1</sup>, 蒋小华<sup>1</sup>, 郑 坚<sup>3</sup>, 刘永刚<sup>1</sup>,  
刘耀远<sup>3</sup>, 陈朝鑫<sup>1</sup>, 李三伟<sup>1</sup>, 李 琦<sup>1</sup>, 潘凯强<sup>1</sup>, 郭 亮<sup>1</sup>, 理玉龙<sup>1</sup>, 徐 涛<sup>1</sup>,  
彭晓世<sup>1</sup>, 吴畅书<sup>2</sup>, 张桦森<sup>2</sup>, 郝 亮<sup>2</sup>, 蓝 可<sup>2</sup>, 陈耀桦<sup>2</sup>, 郑春阳<sup>2</sup>,  
古培俊<sup>2</sup>, 王 峰<sup>1</sup>, 蔡洪波<sup>2</sup>, 郑无敌<sup>2</sup>, 邹士阳<sup>2</sup>, 杨家敏<sup>1</sup>,  
江少恩<sup>1</sup>, 张保汉<sup>1</sup>, 朱少平<sup>2</sup>, 丁永坤<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088;  
3. 中国科学技术大学 工程与应用物理系, 合肥 230026)

**摘 要:** 当前, 激光惯性约束聚变在越来越接近点火的极端能量密度条件下, 实验与模拟的偏离逐渐增大, 一个关键原因是缺乏对黑腔等离子体状态及其影响黑腔能量学和内爆对称性的细致研究和判断。光学汤姆逊散射主动式、诊断精确、参数完备的优点, 使之成为激光惯性约束聚变黑腔等离子体状态参数精密诊断的标准方法。中国面向激光惯性约束聚变研究的光学汤姆逊散射实验技术的发展与神光系列激光装置的建设和在其上开展的物理实验紧密相关。近年来, 四倍频汤姆逊散射实验技术在神光 III 原型和 100 kJ 激光装置上相继建立, 部分实验结果不仅加深了对激光惯性约束聚变靶物理的认识, 还反映了实验条件对汤姆逊散射诊断的影响, 促进了实验技术的精密化发展。在未来, 还需要进一步发展多支路汤姆逊散射、五倍频汤姆逊散射和超热相干汤姆逊散射等新技术, 面向点火黑腔条件, 大幅提升激光等离子体状态参数的诊断精度, 开展新物理机制的探索和研究, 在激光惯性约束聚变和其他高能量密度物理科学领域发挥更重要的作用。

**关键词:** 激光惯性约束聚变; 光学汤姆逊散射; 等离子体状态参数; 激光等离子体不稳定性

**中图分类号:** O571.44; O534<sup>+.2</sup>; O437

**文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.200130

## Recent research progress of optical Thomson scattering in laser-driven inertial confinement fusion

Li Zhichao<sup>1</sup>, Zhao Hang<sup>1</sup>, Gong Tao<sup>1</sup>, Li Xin<sup>2</sup>, Yang Dong<sup>1</sup>, Jiang Xiaohua<sup>1</sup>, Zheng Jian<sup>3</sup>, Liu Yonggang<sup>1</sup>,  
Liu Yaoyuan<sup>3</sup>, Chen Chaoxin<sup>1</sup>, Li Sanwei<sup>1</sup>, Li Qi<sup>1</sup>, Pan Kaiqiang<sup>1</sup>, Guo Liang<sup>1</sup>, Li Yulong<sup>1</sup>, Xu Tao<sup>1</sup>,  
Peng Xiaoshi<sup>1</sup>, Wu Changshu<sup>2</sup>, Zhang Huasen<sup>2</sup>, Hao Liang<sup>2</sup>, Lan Ke<sup>2</sup>, Chen Yaohua<sup>2</sup>, Zheng Chunyang<sup>2</sup>,  
Gu Peijun<sup>2</sup>, Wang Feng<sup>1</sup>, Cai Hongbo<sup>2</sup>, Zheng Wudi<sup>2</sup>, Zou Shiyang<sup>2</sup>, Yang Jiamin<sup>1</sup>,  
Jiang Shaoen<sup>1</sup>, Zhang Baohan<sup>1</sup>, Zhu Shaoping<sup>2</sup>, Ding Yongkun<sup>2</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

3. Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Currently, laboratory created energy density of laser-driven inertial confinement fusion (ICF) is extremely close to that for ignition, while the divergence between experiment and simulation is increasing. One of the key issues is the lack of advanced knowledge of laser-hohlraum coupling process, which has shown the complexity of hohlraum environment. Optical Thomson scattering (OTS) becomes the standard technique for diagnosing the ICF hohlraum plasma parameters, due to its capability of providing unperturbed, local and precise measurement. The development of OTS in China is closely related with the Shenguang series laser facilities, on which most of the ICF

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-05-17; 修订日期: 2020-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0403300); 科学挑战专题项目 (TZ2016005); 国家自然科学基金项目 (11975215, 11905204, 11875241, 11705180)

作者简介: 李志超 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 从事黑腔物理及激光等离子体相互作用研究; limatu@163.com。

通信作者: 丁永坤 (1965—), 男, 博士, 研究员, 从事激光惯性约束聚变实验物理、诊断与理论研究; ding-yk@vip.sina.com。

experiments are carried out. In recent years,  $4\omega$ (263 nm) Thomson scattering technique has been set up on Shenguang-III prototype and 100 kJ-level laser facility, the corresponding results help the understanding of ICF physics. In the near future, several novel methods will be developed, for high-precision diagnostics of ICF ignition hohlraum plasmas and the research of new physical phenomena.

**Key words:** laser-driven inertial confinement fusion; optical Thomson scattering; plasma parameter; laser plasma instability

激光驱动高原子序数材料构成的黑腔,能够产生极强的高温辐射源<sup>[1]</sup>。这种极端条件是当前实验室开展高能密度物理(HEDP)实验研究的一种重要方式,其应用的研究领域包括激光间接驱动核聚变(ICF)<sup>[2-3]</sup>、实验室天体物理、高马赫数辐射流体力学、高压状态方程、辐射不透明度等。黑腔内部的等离子体状态<sup>[4]</sup>是研究和构建黑腔辐射源的基础,它会影响激光的传输、散射、能量沉积位置,影响X射线转换和输运,影响黑腔辐射场的时、空及能谱特性,进而非常敏感地影响后续物理过程。特别在当前,激光聚变在越来越接近点火的极端能量密度条件下,实验与模拟的偏离逐渐增大,一个关键原因是缺乏对黑腔等离子体状态及其影响黑腔能量学和内爆对称性的细致研究和判断。以美国国家点火攻关计划(NIC)<sup>[5]</sup>为例,2009至2012三年间,NIC试图以1.8 MJ的激光能量实现点火,但没有成功。大量公开报道的实验结果和分析<sup>[6-7]</sup>表明,NIC对点火黑腔等离子体状态的预判出现了重大偏差,导致内环受激拉曼散射(SRS)的散射光份额远超预期,同时激光束间能量转移(CBET)不可控。因此,无论是黑腔建模校验<sup>[8]</sup>,还是激光等离子体参量不稳定性(LPI)<sup>[9]</sup>研究,都亟需物理实验提供完备、高精度的等离子体状态实验数据。

近年来,随着激光等离子体研究领域的不断拓展,光学汤姆逊散射(OTS)技术<sup>[10]</sup>得以快速发展,成为ICF黑腔等离子体状态参数精密诊断的标准方法。汤姆逊散射利用探针光,可以主动、精确的进行空间局域定点探测;通过光谱拟合,可获得包括电子温度、电子密度、等离子体流速在内的完备的等离子体状态参数,且诊断精度可达百分之几。

中国面向ICF的光学汤姆逊散射实验技术的发展与各时期大型激光装置的建设和实验运行紧密相关。20世纪90年代末,国内第一次在大型激光装置星光II上开展汤姆逊散射实验研究,该装置仅有一路能量输出约为120 J的三倍频激光束,采用分束倍频的方式,建成了二倍频( $2\omega$ , 527 nm)探针光束,首次获得了盘靶位型下的汤姆逊散射光谱实验数据<sup>[11-12]</sup>。2003年,神光II激光装置利用原有的常规八路光束,通过改造,使其中一路具备了四倍频( $4\omega$ , 263 nm)探针光能力;在该kJ级装置上开展了一系列靶型的汤姆逊散射实验技术验证<sup>[13]</sup>,获得了盘靶系列空间位置的汤姆逊散射实验数据,研究了电子热传导等基础物理问题<sup>[14]</sup>;进一步,建立了气袋靶大尺度激光等离子体实验平台<sup>[15]</sup>,利用四倍频汤姆逊散射技术表征了气袋靶的等离子体状态参数<sup>[16-17]</sup>。2014年,神光III原型装置利用第九路大能量激光束,改造成四倍频探针光;在该10 kJ级实验平台上<sup>[18]</sup>,首次开展了针对充气黑腔的汤姆逊散射实验技术研究,获得了黑腔系列空间位置的汤姆逊散射光谱和等离子体状态参数<sup>[19]</sup>,标志着该技术与ICF黑腔物理研究的直接对接。2017年开始,神光100 kJ激光装置正式具备极向四倍频探针光<sup>[20-21]</sup>,在首轮四倍频汤姆逊散射实验中,即获得了充气六孔球腔内部具有超高信噪比的汤姆逊散射光谱数据<sup>[22]</sup>,光谱拟合获得的等离子体电子温度演化反映了腔内的电子热传导可能是非局域的,对ICF黑腔物理建模具有重要意义。在上述神光系列激光装置上,研究团队一直致力于发展四倍频汤姆逊散射技术,研究ICF黑腔中等离子体的状态演化;通过多方面的技术攻关,近年来已突破了单支路离子特征谱技术,相关结果不仅加深了对黑腔物理的认识,也为未来点火黑腔等离子体状态参数的诊断提供了重要的技术储备。

本文从技术回顾的角度,首先介绍了光学汤姆逊散射的理论原理和特性,然后介绍了近年来汤姆逊散射实验技术发展的几个典型的实验应用案例,相关实验结果不仅加深了对ICF靶物理的认识,同时还反映了实验条件对汤姆逊散射诊断的影响,指导了实验设计的进一步优化,提升了技术的精密化程度,最后介绍了对未来光学汤姆逊散射技术发展的思考,包括面向等离子体状态参数诊断精度的进一步提升、面向未来点火黑腔的实验应用、以及面向基础物理过程和新物理机制的深化认识等。

## 1 光学汤姆逊散射原理

汤姆逊散射<sup>[10]</sup>是自由电子对低能光子(光子能量远小于电子静止质量)的弹性散射。在经典辐射理论中,电子在入射电磁波中振荡,将发射散射电磁波;若电子具有运动速度,则散射电磁波的频率将不同于入射电磁波的频

率,该散射电磁波携带了电子的运动信息。在等离子体中,由于自由电子具有集体效应,散射光由各电子散射电磁波相干叠加,包含了等离子体特征密度涨落的信息,这就是汤姆逊散射可以用来诊断等离子体的基本原因。

汤姆逊散射一般采用散射功率谱<sup>[10]</sup>来进行描述,如公式(1)所示。

$$P_{sc}(k_{sc}, \omega_{sc}) = \frac{1}{2\pi} P_{pr} e^{-\Delta} \sigma \left( \frac{V}{A} \right) n_e \left( 1 + \frac{2\omega}{\omega_{pr}} \right) |k_{sc} \times (k_{sc} \times e_{pr})|^2 S(k, \omega) \quad (1)$$

式中:下标pr, sc分别代表入射探针光和散射光;  $P_{pr}$  为入射探针光功率;  $e^{-\Delta}$  表示由于等离子体中逆韧致吸收等机制导致的探针光和散射光能量损失;  $\sigma$  为散射截面;  $V$  为探测区域体积;  $A$  为横截面;  $n_e$  为电子密度;  $\omega_{pr}$  为入射光频率;  $k_{sc}$  为散射波矢;  $e_{pr}$  为探针光偏振方向;  $S(k, \omega)$  为动力学形状因子,它描述了相位因子相干叠加的结果,决定了散射光谱的形状,而其他项只影响散射光的强度,因此,汤姆逊散射理论的核心就是计算动力学形状因子。一般情况下,单组分无碰撞麦氏分布的动力学形状因子<sup>[10]</sup>可表达为

$$S(k, \omega) = \frac{2\pi}{k} \left| 1 - \frac{\chi_e}{\epsilon} \right|^2 f_e \left( \frac{\omega}{k} \right) + \frac{2\pi Z}{k} \left| \frac{\chi_e}{\epsilon} \right|^2 f_i \left( \frac{\omega}{k} \right) \quad (2)$$

式中:  $\epsilon = 1 + \chi_e + \chi_i$  为介电函数,  $\chi_e, \chi_i$  分别为电子和离子的感应率;  $f_e \left( \frac{\omega}{k} \right), f_i \left( \frac{\omega}{k} \right)$  分别为电子和离子的速度分布函数;  $Z$  为平均离化度。式(2)等号右边第一项为电子项,第二项为离子项。电子项为高频项,简化求解色散关系得

$$\omega = \sqrt{\omega_{pe}^2 + 3k^2 T_e / m_e} = \omega_{epw} \quad (3)$$

式中:  $\omega_{pe}$  为等离子体振荡频率;  $T_e$  为电子温度;  $m_e$  为电子静止质量;  $\omega_{epw}$  为电子等离子体波频率。由公式(3)可见,在高频区域,共振峰的位置就是电子等离子体波的位置。

离子项为低频项,简化求解色散关系可得

$$\omega = k \sqrt{\frac{Z T_e}{A_a m_p} \left( \frac{1}{1 + \alpha^{-2}} + \frac{3 T_i}{Z T_e} \right)} = \omega_{iaw} \quad (4)$$

式中:  $A_a$  为离子的核子数;  $m_p$  为质子静止质量;  $\alpha = 1/k\lambda_d$  为汤姆逊散射参数;  $\omega_{iaw}$  为离子声波频率。由公式(4)可见,在低频区域,共振峰的位置就是离子声波的位置。

由此可见,正是由于动力学形状因子包含了等离子体各种本征波模的信息,汤姆逊散射才因此能够诊断等离子体的各种状态参数。图1展示了由动力学形状因子得到的光学汤姆逊散射的光谱形貌,可以看到,光学汤姆逊散射的光谱形貌与等离子体的状态参数密切相关,其中电子项(图1(a))对电子密度( $n_e$ )和电子温度( $T_e$ )极为敏感,离子项(图1(b))对等离子体流速( $v_i$ )、平均离化度与电子温度的乘积( $Z T_e$ )和离子温度( $T_i$ )等非常敏感。通过对实验获得的汤姆逊散射光谱进行谱型拟合,可获得等离子体的多种参数信息。

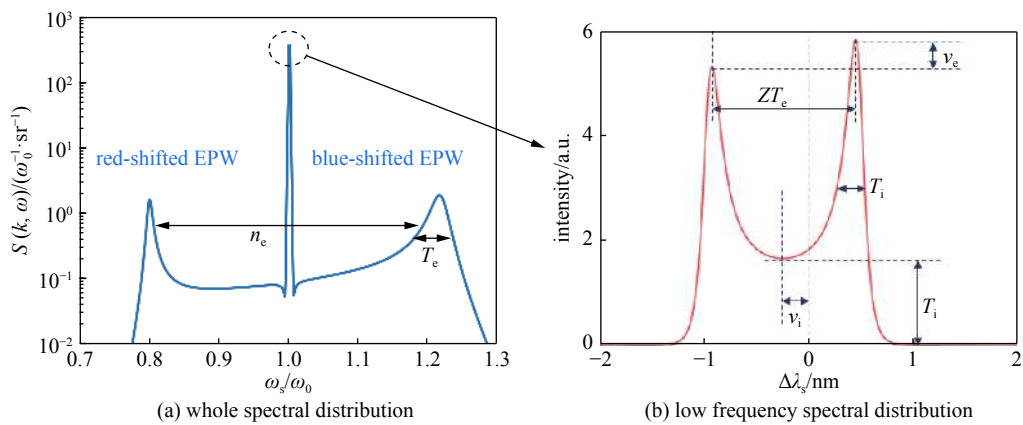


Fig. 1 Optical Thomson scattering (OTS) spectral distribution is closely related with plasma parameters

图1 光学汤姆逊散射的光谱形貌与等离子体状态参数密切相关

光学汤姆逊散射(OTS)的一个重要特性是信号很弱,这从它的散射截面约为 $10^{-25} \text{cm}^2$ 可以感受到。进一步,考察公式(1),对于典型的ICF黑腔,散射体积尺度 $V/A$ 约为 $100 \mu\text{m}$ ,电子密度 $n_e$ 约为 $10^{21} \text{cm}^{-3}$ ,收光立体角 $d\Omega$ 约为 $10^{-3}$ ,简单计算可知,实验中能够收集到的汤姆逊散射光能量大约仅为入射探针光的 $10^{-9}$ ,属于极弱信号测量。同时,



ICF 黑腔中存在各种波段的强干扰源, 特别在光学波段, 如三倍频( $3\omega$ , 351 nm)加热束激光产生的受激拉曼散射、受激布里渊散射和加热束激光产生的汤姆逊散射等, 这些都能够轻松湮灭目标汤姆逊散射信号。为了尽量避开上述强干扰, 探针光波长需要向深紫外延伸, 目前常用四倍频( $4\omega$ , 263 nm)。此外, 由于 ICF 超短(约 ns)超强(约  $10^{15} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )的实验特性, 使得黑腔中等离子体状态在时空两个维度剧烈变化, 汤姆逊散射信号可能被吸收、偏折, 甚至拦截, 进一步加剧了汤姆逊散射的诊断难度。因此, 在面向 ICF 黑腔的诊断应用中, 光学汤姆逊散射具有极高的技术壁垒, 目前全世界仅个别小组掌握了该项实验技术<sup>[4, 23]</sup>。

## 2 光学汤姆逊散射技术在神光系列激光装置实验中的几个典型应用

### 2.1 神光 III 原型长脉冲 Au 盘靶实验

神光 III 原型装置具备四倍频汤姆逊散射诊断能力<sup>[18-19]</sup>后, 开展的首个实验内容即为 Au 盘靶实验。该实验除了检验四倍频探针光和诊断系统的性能外, 还希望通过盘靶位型, 构造准一维的等离子体状态参数的空间分布, 通过汤姆逊散射获得更加细致的实验数据, 用于校验辐射流体程序。

图 2 展示了 Au 盘靶汤姆逊散射的实验排布示意图。Au 盘靶靶面竖直放置, 三路加热束瞄准靶面中心同步入射, 每路参数为  $3\omega/3 \text{ ns}$  方波/800 J。四倍频探针光沿靶面法线方向正入射, 参数为  $4\omega/3 \text{ ns}$  方波/80 J。收光系统从正下方进行诊断, 散射角为  $90^\circ$ , 诊断区域为靶面中心轴线上探针光与收光方向交汇的某特定位置。

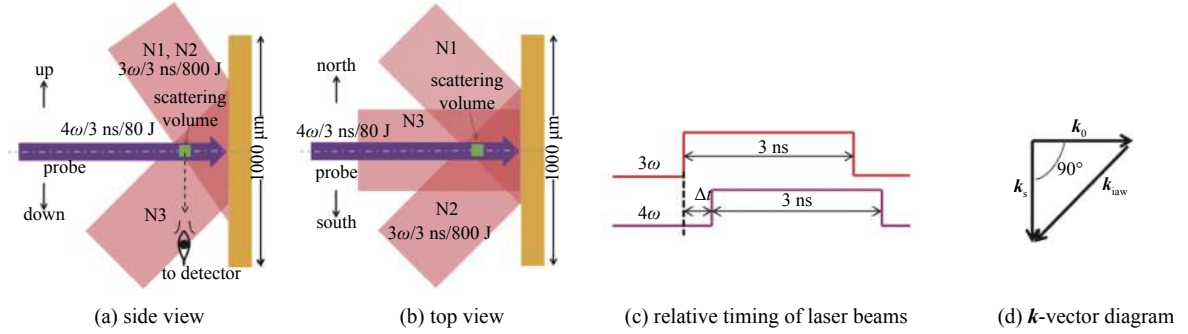


Fig. 2 Schematic of the Au disk experimental setup on Shenguang-III prototype

图 2 神光 III 原型 Au 盘靶实验排布示意图

诊断获得的不同区域的时间分辨汤姆逊散射离子谱信号如图 3 所示, 这些光谱均呈现出明显的双峰结构, 且在加热束存在的  $0 \sim 3 \text{ ns}$  时间内, 离子谱双峰间距均基本保持不变。图 4 展示了其中一个发次在特征时刻的光谱拟合结果, 其参数拟合精度约 15%。图 5 展示了通过光谱拟合获得的 Au 盘靶轴线上不同空间位置等离子体电子温度和流速的演化信息。可以看到, 主脉冲期间所有空间位置点的等离子体的电子温度保持恒定值, 表明由加热束烧蚀出来的 Au 等离子体达到了稳定状态, 类似于稳恒辐射源。长脉冲稳恒辐射源<sup>[24-25]</sup>在高能量密度物理领域有着多方面的应用, 一般需要对激光波形进行精细的整形设计才能实现。光学汤姆逊散射结果初步表明该 Au 盘靶实验通过方波即能实现稳恒状态; 此外, 利用平响应 XRD 阵列<sup>[26-27]</sup>, 给出的 X 光辐射流的时间行为也验证了该

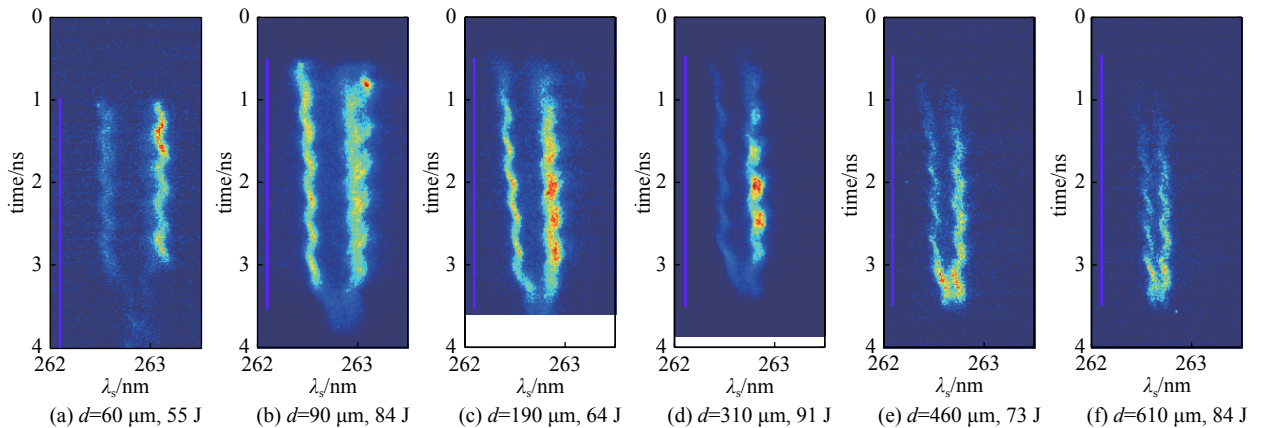


Fig. 3 Thomson scattering spectra of ions from the Au disk experiment carried out on Shenguang-III prototype

图 3 神光 III 原型 Au 盘靶轴线上不同空间位置的时间分辨汤姆逊散射离子谱信号

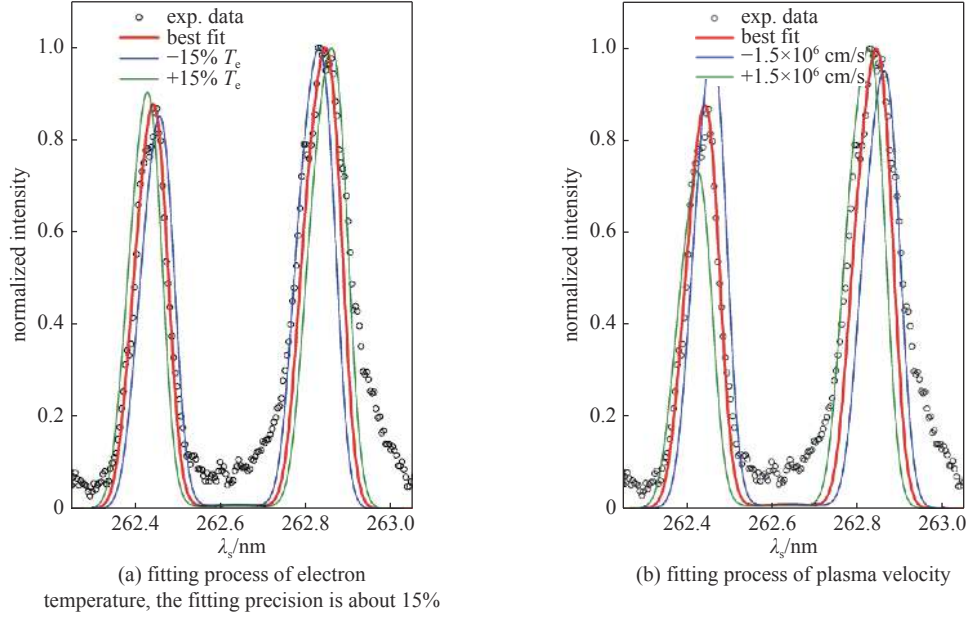


Fig. 4 Typical fitting results of Thomson scattering spectra from the Au disk experiment carried out on Shenguang-III prototype

图4 神光 III 原型 Au 盘靶典型光谱拟合结果

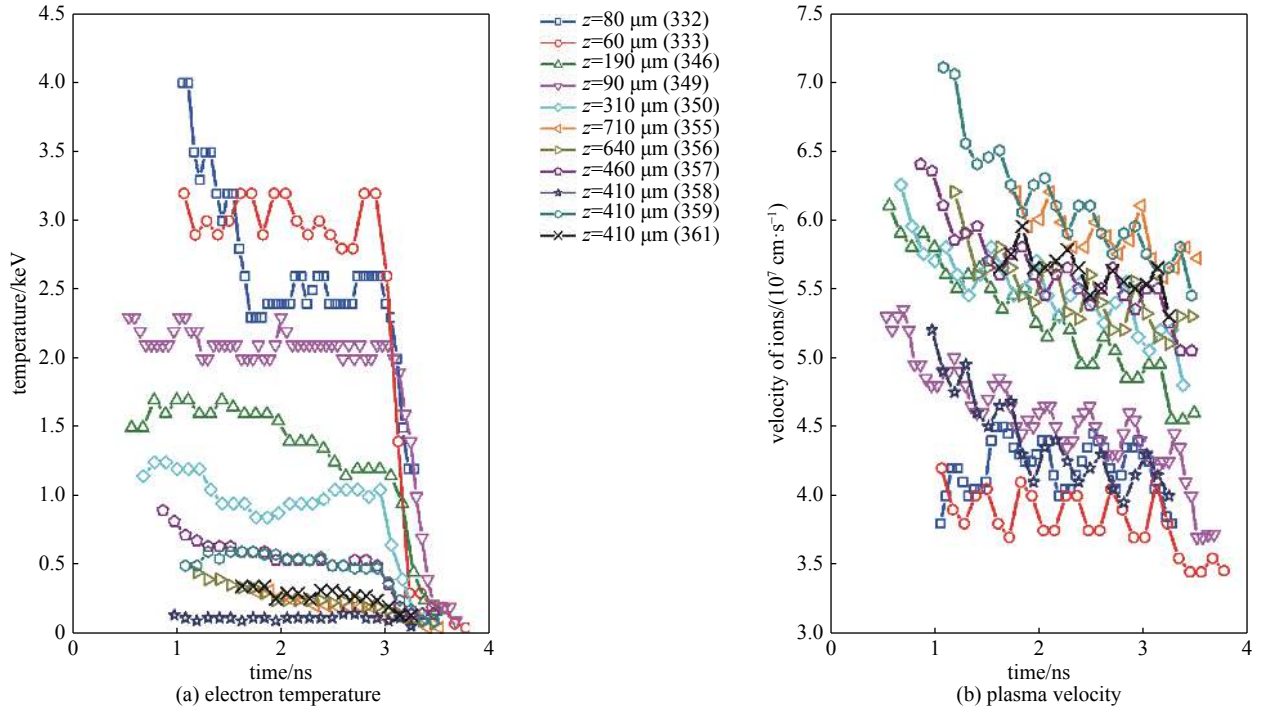


Fig. 5 Typical fitting results of electron temperature and plasma velocity in different location on the axis of the Au disk

图5 通过光谱拟合获得的 Au 盘靶轴线上不同空间位置等离子体电子温度和流速的演化信息

结论。在这种稳定状态下,我们给出了主脉冲的中间时刻的电子温度和等离子体流速的空间分布,如图6所示。随着诊断位置逐渐远离靶面,电子温度逐渐下降,等离子体流速逐渐增加,这表明 Au 盘靶等离子体的演化是一个膨胀过程,其趋势与辐射流体模拟一致。

值得注意的是,图3中所有汤姆逊散射光谱数据的波长和强度,都呈现出随时间周期振荡的特征。分析发现,该特征来源于四倍频探针光额外增加的 2 GHz 的小宽带频率调制(SSD)。这种振荡的特征一方面会降低信号的光谱分辨率,另一方面有可能导致信号在局部出现饱和,这些对汤姆逊散射的参数拟合都是不利的。因此,在后续所有汤姆逊散射实验中,均关闭了探针光的小宽带 SSD。

## 2.2 神光 III 原型单环充气黑腔实验

充气黑腔是间接驱动激光惯性约束聚变设计中的关键靶型,其内部的等离子体状态参数对于校验黑腔物理模型<sup>[8]</sup>有着重要意义。在实验设计上,希望创造一种准二维的黑腔环境,以更好地检验二维辐射流体模拟程序 LARED-JC<sup>[28]</sup>。为此,在神光 III 原型装置上,利用建立的光学汤姆逊散射实验能力,开展了简单充气黑腔的实验研究。

实验采用“直筒方腔”,即直径和长度相等,均为  $\phi 1400 \mu\text{m}$ ,如图 7 所示。用于激光注入的黑腔两端全开,即激光注入孔尺寸与直径相等。腔内填充 0.06 MPa 的辛戊烷 ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ),对应全电离电子密度为  $0.066n_c$ 。其中,  $n_c = 9.1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ ,为三倍频激光对应的临界密度。7 束三倍频激光加热束分别从上下两端瞄准黑腔腰部入射,在腔内壁上构成一个连续的环带。激光加热束总能量约为 5.6 kJ,采用 2 ns 方波,带  $\phi 500 \mu\text{m}$  CPP 束匀滑。四倍频探针光从水平方向入射,从下极点方向收光,探针光能量约为 80 J,采用 3 ns 方波,覆盖激光加热束全脉冲。为了使探针光顺利达到探测位置,黑腔侧壁一般需要开诊断孔。实验中散射角为  $90^\circ$ ,散射体积约为  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。

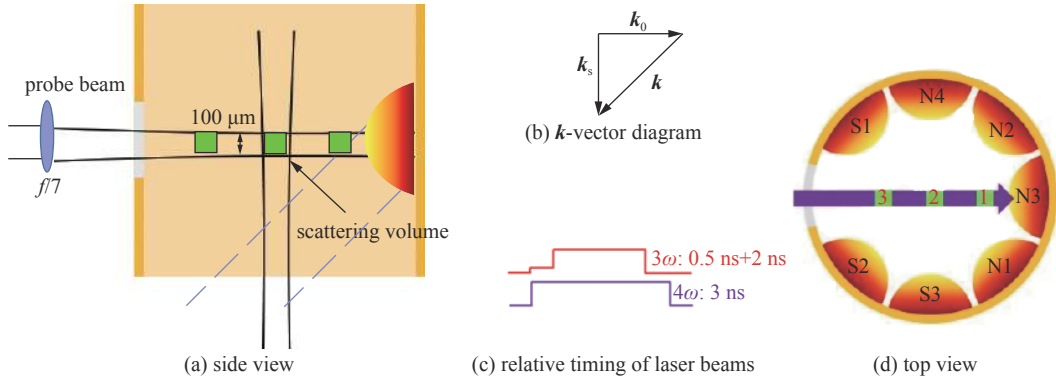


Fig. 7 Schematic of the gas-filled hohlraum experimental setup on Shenguang-III prototype

图 7 神光 III 原型单环充气腔靶汤姆逊散射实验排布示意图

该充气黑腔激光注入孔附近的等离子体状态演化特征比较显著,离子温度和流体速度的跳变时间存在明显的先后顺序<sup>[22]</sup>。正算光谱模拟发现了两种不同密度扰动的来源:激光辐照封口膜产生的激波和激光辐照腔壁产生的激波,这两种激波在不同时刻对激光注入孔的等离子体状态产生了重要影响,形成了实验所观测到的结果。

实验进一步探索了黑腔内部三个不同特征区域的等离子体状态演化。三个特征区域采用数字序号标识,如图 7(d)所示。对应的汤姆逊散射实验结果如图 8 所示,其特征呈现一定规律:距离 Au 泡越近,实验光谱的暗区(图中白色虚线方框)出现得越早。在对黑腔辐射流体模拟结果的后续分析中发现,除上述两种激波外,激光光路周围也会存在电子密度的强扰动。由于热压平衡,激光通道中央区域的等离子体会被排开,在光路周围形成电子密度堆积;当密度堆积到一定程度,将形成激波向外传播。在实验中,激光加热束有 7 束,探针光束有 1 束,这意味着黑腔中存在多种来源的数量众多的激波,这些激波相互碰撞,对黑腔内部的等离子体状态形成强烈影响,使其演化变得更为复杂。

黑腔密度扰动的多种来源可解释上述汤姆逊散射光谱的演化特性。在探针光和探针光正对的激光加热束光路周围,由于电子密度堆积,形成激波向外传播。这两支激波相互碰撞,形成更高的密度区,对汤姆逊散射信号形成拦截。对于靠近 Au 泡的探测区域(图 8(d)中序号 2),激波碰撞时刻出现得最早,形成高电子密度区,在最早期拦截汤姆逊散射信号(图 8(c));随着时间的推移,高密度区逐渐稀疏,汤姆逊散射信号又逐渐恢复正常观测。而对于远离 Au 泡的探测区域(图 8(d)中序号 3),激波碰撞时刻出现得最晚,因此基本没观测到对汤姆逊散射信号的拦截(图 8(a))。

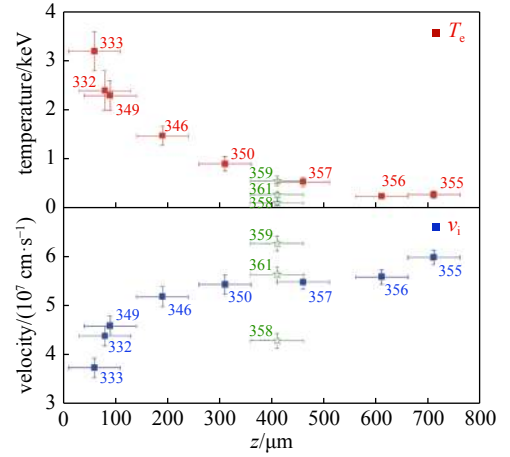


Fig. 6 Typical spatial distribution of electron temperature and plasma velocity on the axis of the Au disk

图 6 实验获得的 Au 盘靶轴线上等离子体电子温度和等离子体流速的空间分布



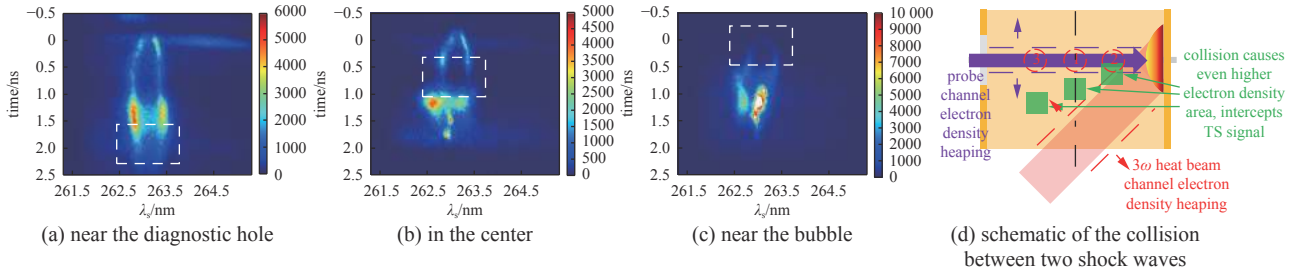


Fig. 8 Thomson scattering spectra measured from different regions of the gas-filled hohlraum on Shenguang-III prototype

图 8 神光 III 原型充气黑腔内部不同特征区域的汤姆逊散射光谱演化

神光 III 原型装置上充气黑腔汤姆逊散射实验,反映了汤姆逊散射光谱对黑腔等离子体状态演化的极度敏感性,可利用其开展黑腔动力学或动理学特性<sup>[29]</sup>的相关研究。

### 2.3 100 kJ 激光装置多环辐照充气黑腔实验

在输出能力和规模上,100 kJ 激光装置<sup>[20]</sup>目前是国内最大,世界前三的大科学激光装置,它具有 48 束三倍频长脉冲激光束,可提供 180 kJ 的到靶能量,创造出接近点火条件的黑腔等离子体状态。自 2015 年该装置建成后,逐渐成为 ICF 实验研究的主力军<sup>[30]</sup>。2017 年,利用抽束改造,该装置具备了轴向四倍频探针光输出能力,并开展了首轮四倍频汤姆逊散射实验<sup>[21]</sup>。

图 9 展示了首轮实验的排布示意图。实验采用充气柱腔,腔轴竖直放置,尺寸  $\phi 2.4 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$ ,腔内填充 0.04 MPa 的辛戊烷( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ),腔腰部开  $\phi 0.5 \text{ mm}$  尺寸的诊断孔,便于探针光注入。43 束三倍频激光加热束分两环从黑腔两端注入,采用 3 ns 方波,总能量 110 kJ。四倍频探针光沿腔轴方向入射,同样采用 3 ns 方波,相对热束滞后 0.3 ns,能量约 90 J。收光方向在水平赤道面上,诊断目标为腔中心区域,散射角为  $90^\circ$ ,散射体积约为  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。

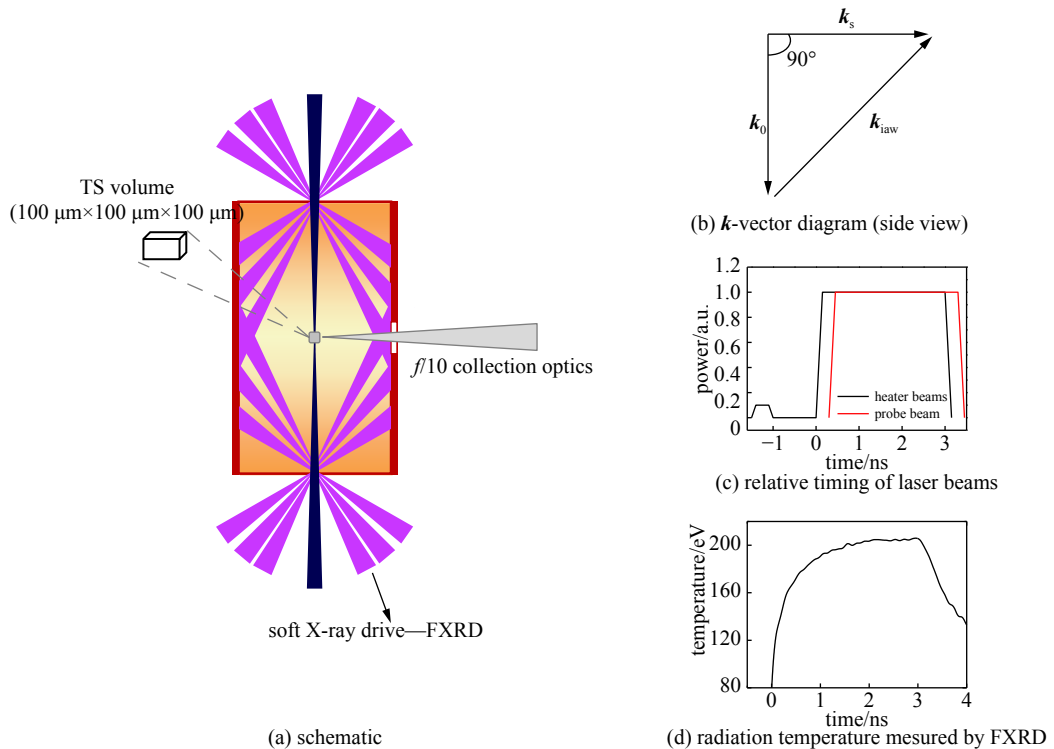


Fig. 9 Schematic of the complex hohlraum experimental setup on 100 kJ-level laser facility

图 9 100 kJ 激光装置复杂充气黑腔实验排布示意图及激光波形和辐射温度曲线

实验获得的汤姆逊散射时间分辨光谱如图 10(a) 所示。散射信号出现在主脉冲 0.5 ns 左右,到 2 ns 就结束了,窗口时间仅 1.5 ns(图 10(a)红色虚线方框)。相比于探针光 3 ns 的脉宽,汤姆逊散射信号持续时间过短,该现象在诊断黑腔内部其他区域时也同时出现,表明后续信号因某些因素被拦截,而这种现象在神光 III 原型上并没有出

现。图 10(b) 给出了汤姆逊散射光谱的正算结果, 模拟信号的持续时间可到探针光结束, 表明信号的拦截效应并不是来源于光路吸收。相比神光 III 原型, 100 kJ 装置的能量规模存在量级提升, 激光脉冲更长, 辐射温度更高, 诊断孔边缘辐射烧蚀出的等离子体向孔心膨胀, 即缩孔效应会更强。此外, 原型装置的诊断孔由于存在探针光的持续注入, 激光通道的热压有助于抑制缩孔; 与此相比, 100 kJ 装置的诊断孔用于散射信号传出腔外, 没有了激光热压的作用, 辐射烧蚀缩孔效应进一步加强。为了考察上述影响, 基于 LARED-JC 程序, 建立了 X 光辐射烧蚀缩孔的简化模型。以实验获得的辐射温度(图 9(d))为依据, 模拟了诊断孔附近等离子体膨胀的状态演化, 计算了散射光信号穿过诊断孔的吸收情况, 获得了信号的透过率演化曲线。当考虑  $\phi 0.5$  mm 诊断孔的辐射烧蚀缩孔效应以后, 汤姆逊散射正算光谱出现了显著变化, 如图 10(c) 所示, 整体谱型和截止时刻均与实验一致。

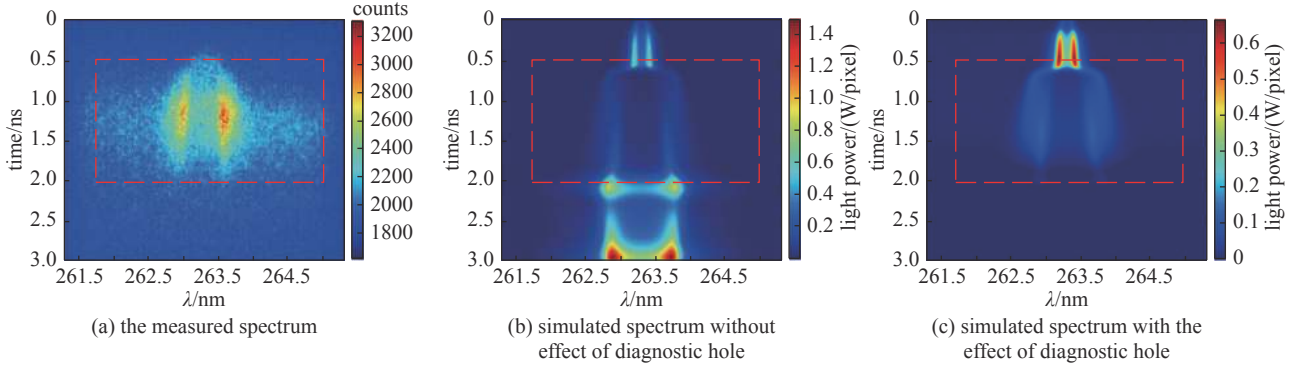


Fig. 10 Comparison of Thomson scattering spectra

图 10 100 kJ 装置复杂充气黑腔汤姆逊散射实验光谱对比

为了进一步研究汤姆逊散射信号截止时刻与诊断孔尺寸的定标关系, 我们模拟计算了诊断孔尺寸分别为  $\phi 0.5$  mm 和  $\phi 0.8$  mm 情况下信号穿过诊断孔透过率的时空演化行为, 如图 11(a) 和 (b) 所示。其中, 横坐标表示散射信号过孔位置与诊断孔中心的距离。可以看到, 在越靠近诊断孔中心的位置, 烧蚀膨胀的等离子体到来越晚, 信号截止时刻越晚; 当诊断孔变大时, 腔中心位置信号的截止时刻也会后延。若以信号透过率降至 20% 作为截止时刻, 则从图 11(a) 和 (b) 中可提取出截止时刻与诊断孔半径的定标关系曲线, 如图 11(c) 所示。可以看到, 诊断孔  $\phi 0.5$  mm 和  $\phi 0.8$  mm 两个算例获得的定标曲线基本重合; 当选择实验用  $\phi 0.5$  mm 诊断孔尺寸时, 截止时刻约为 1.8 ns, 与实验结果基本一致。从图 11(c) 中还可以看到, 若要保持汤姆逊散射信号在主脉冲 3 ns 期间不被截止, 诊断孔尺寸需要达到  $\phi 0.8$  mm 以上。

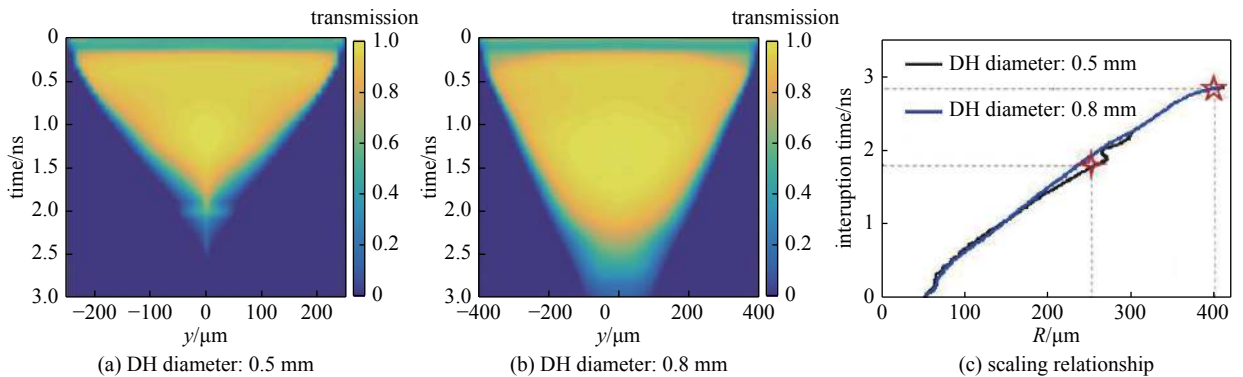


Fig. 11 Simulation results of temporal behavior of the  $4\omega$  light transmission with spatial distribution along the DH radius and scaling relationship of the interruption time vs the diagnostic hole diameter

图 11 诊断孔直径为 0.5 mm 和 0.8 mm 情况下的信号透过率行为模拟结果及散射光信号截止时刻与诊断孔半径的定标关系

上述定标关系得到了 100 kJ 装置后续实验的证实。当实验采用  $\phi 0.8$  mm 的诊断孔时, 汤姆逊散射信号能够持续到主脉冲结束。但是, 需要注意的是, 图 11(c) 的定标关系曲线在诊断孔尺寸接近  $\phi 0.8$  mm 时出现拐点, 诊断孔尺寸的进一步增大对拦截时刻的后延效果不佳。在点火条件下, 辐射温度将达到 300 eV, 脉冲持续时间长达 10 ns 以上, 等离子体的辐射烧蚀膨胀将更厉害, 需要寻找手段来抑制诊断孔的缩孔效应。另外, 在十万焦耳装置的六孔球腔实验<sup>[31]</sup>中, 汤姆逊散射利用  $\phi 1.4$  mm 的激光注入孔进行诊断, 获得了全过程、高信噪比的离子谱信

号<sup>[22]</sup>, 如图 12 所示。因此, 未来可能更多的是利用激光注入孔来开展汤姆逊散射诊断, 既避免了诊断孔开孔对黑腔环境的改变, 又有利于获得全时段的目标信号。

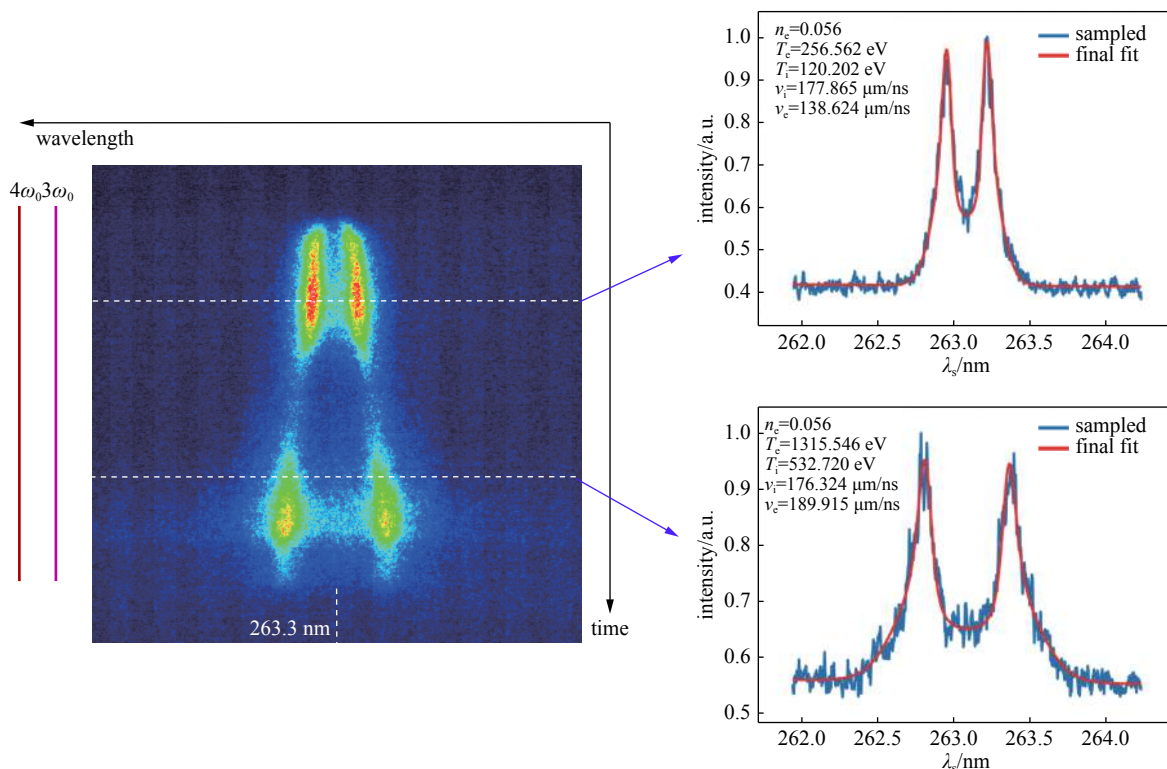


Fig. 12 High-quality Thomson scattering spectrum of gas-filled octahedral spherical hohlraum on 100 kJ-level facility and fitting results at two typical time

图 12 100 kJ 激光装置上获得的充气六孔球腔全过程、高信噪比的汤姆逊散射光谱及两个特征时刻的光谱拟合结果

### 3 光学汤姆逊散射技术展望

#### 3.1 面向参数精密化诊断的多支路汤姆逊散射技术

当前, 针对 ICF 黑腔, 神光系列激光装置上已突破了单支路光学汤姆逊散射离子特征谱技术。但是, 单支路汤姆逊散射离子特征谱不能得到黑腔内部等离子体的电子密度。对于同一个汤姆逊散射光谱, 采用不同的电子密度假定值, 同样可以实现较好的谱型拟合, 但电子温度差异较大, 如图 13 所示。因此, 同时获得 ICF 黑腔内部等离子体的电子温度和电子密度, 是汤姆逊散射实验技术亟待突破的一个瓶颈。

汤姆逊散射光谱的拟合过程可以看成是解耦关于电子密度  $n_e$  和电子温度  $T_e$  的多元函数方程, 这从离子谱色散方程公式(4)和电子谱色散方程公式(3)可以观察到, 其中  $n_e$  隐含在公式(3)的等离子体振荡频率  $\omega_{pe}$  和公式(4)的散射参数  $\alpha$  中。如此, 满足一定角度匹配条件的两个或多个方程的约束解耦将更具确定性, 参数精度也会得到大幅提升。图 14 展示了两个不同角度的离子谱支路信号和一个电子谱支路信号共计三个支路联立解耦的情况, 支路交汇处即为参数拟合的最优解。可以看到, 离子谱对电子温度比较敏感, 对电子密度不敏感; 电子谱则相反, 对电子密度尤为敏感。一般来说, 同一个角度的离子谱搭配电子谱是能够解耦获得  $n_e$  和  $T_e$  的。但是, 四倍频电子谱是一个宽谱极弱信号, 与背景噪声在同一水平; 此外, 电子谱信号进入  $\sim 200$  nm 的极深紫外波段, 诊断系统面临不响应的风险。在这种情况下, 可以考虑两支不同散射角的离子谱的联立解耦<sup>[32]</sup>; 上述两支离子谱的差异化需要比较显著, 即两条参数曲线相交的夹角需要尽量大, 这需要通过散射角匹配和实验条件的优化设计来实现。当然, 如果能够同时获得图 14 所示的三支电子谱和离子谱信号, 则参数拟合精度将可以大幅提升。目前, 100 kJ 激光装置上已开展了初步的实验探索, 证实了上述技术路线的可行性。

#### 3.2 面向点火黑腔条件的五倍频汤姆逊散射技术

神光系列激光装置的汤姆逊散射探针光波长均为四倍频 ( $4\omega$ , 263 nm), 有利于避开三倍频 ( $3\omega$ , 351 nm) 常规激光束带来的各种干扰。但是, 在未来的点火黑腔条件下, 三倍频激光能量将达到 MJ, 数量级的提升使得黑腔内部的干扰向深紫外波段扩散。相比于四倍频探针光, 五倍频 ( $5\omega$ , 211 nm) 与三倍频热束在波长上间隔更大, 有利于



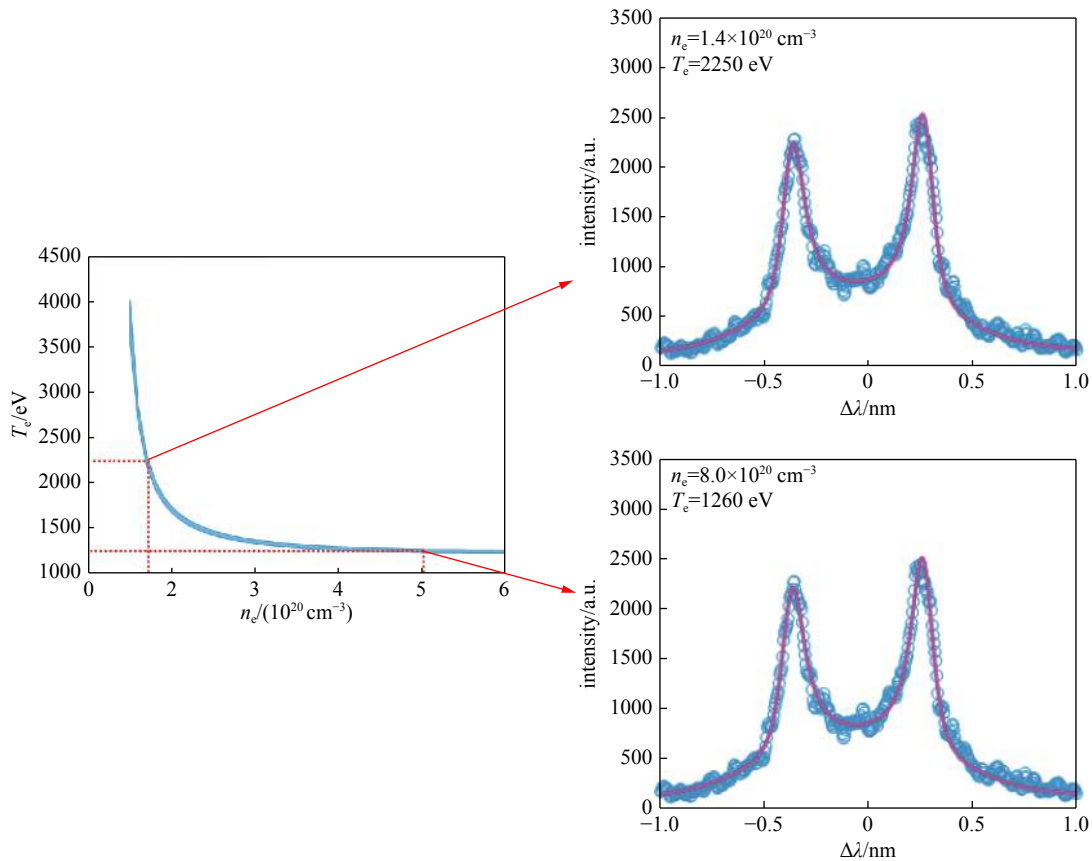


Fig. 13 Schematic of the fitting results by single Thomson scattering ion spectrum: Multiple plasma parameters can be obtained due to the uncertainty of electron density

图 13 单支路汤姆逊散射离子光谱参数拟合面临的难题: 存在多解

避开热束本身的汤姆逊散射产生的背景干扰, 如图 15 所示。

此外, 点火黑腔在尺度上将达到 cm 量级, 腔内等离子体的动力学效应更为显著, 汤姆逊散射信号需要穿过更长、更复杂的等离子体状态。相比于四倍频, 利用五倍频探针光, 可以减弱其在等离子体中的逆韧致吸收效应。一方面, 散射信号在等离子体中的透过率较高, 利于诊断; 另一方面, 探针光本身对等离子体的状态扰动较小。图 16 展示了不同波长的信号光穿过 0.5 mm 尺度均匀等离子体的透过率。可以看到, 采用五倍频探针光, 可以诊断更高密度的区域。

但是, 五倍频汤姆逊散射信号位于极深紫外波段 (150~220 nm), 该波段在大气和光学元件中的传输将受到极大挑战。此外, 由于五倍频的倍频效率相比三倍频和四倍频存在大幅下降, 探针光的能量输出是受限的, 散射信号在点火黑腔条件下的信噪比可能受限。美国 NIF 装置将五倍频汤姆逊散射列为革命性诊断技术<sup>[33]</sup>, 可见其难度, 需要集中技术力量攻关。

### 3.3 面向新物理机制研究的超热相干汤姆逊散射实验技术

在 ICF 实验研究中, 光学汤姆逊散射有着两方面的重要应用。当等离子体电子密度扰动来源于热涨落时, 汤姆逊散射可用于诊断等离子体的各种状态参数, 这种散射被称为热相干汤姆逊散射<sup>[10]</sup>, 前面所介绍的都属于该范畴。当等离子体电子密度扰动来源于外源驱动时, 汤姆逊散射可用于诊断由此产生的定向、强波模, 这种散射被称为超热相干汤姆逊散射<sup>[10]</sup>。外源驱动的电子密度扰动在激光等离子体不稳定性 (LPI) 实验<sup>[34]</sup> 中很常见。在激光注入黑腔的过程中, 受激拉曼散射 (SRS) 除了会反射入射激光, 还会在激光传播方向上激发一支电子等离子体波;

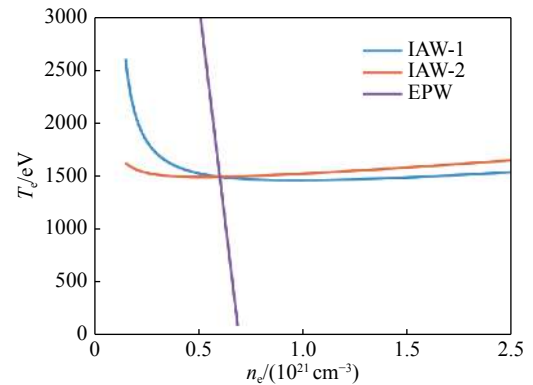


Fig. 14 Schematic of simultaneous diagnosis of multiple Thomson scattering spectra: The precision of electron temperature and electron density will be increased

图 14 多支路汤姆逊散射联合诊断示意图: 利用不同信号对参数敏感度的差异化特点, 能够大幅提升参数诊断精度和完备性



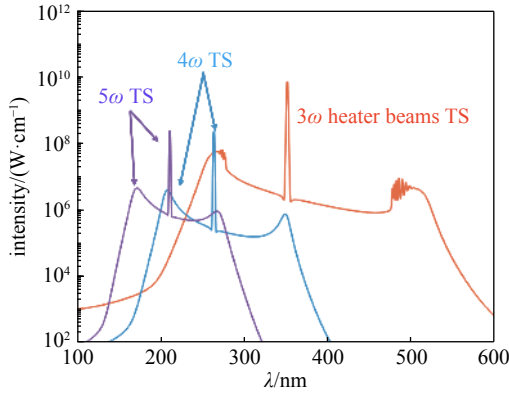


Fig. 15 Comparison of Thomson scattering spectral distribution of  $5\omega$  probe beam,  $4\omega$  probe beam, and  $3\omega$  heater beams.  $5\omega$  seems better to avoid the background noise produced by  $3\omega$  heater beams

图 15 典型 ICF 黑腔条件下的汤姆逊散射光谱信号强度与加热束背景噪声的对比, 五倍频汤姆逊散射信号有利于避开热束本身的汤姆逊散射产生的背景干扰

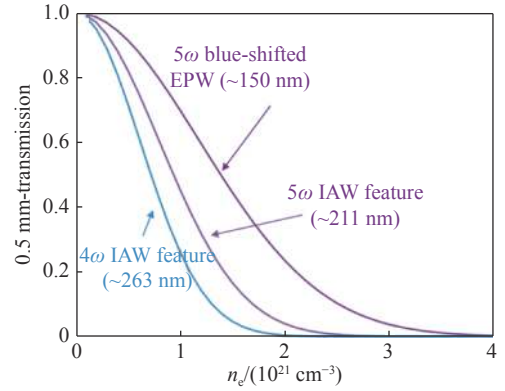


Fig. 16 Transmission comparison of Thomson scattering signal with different wave length.  $5\omega$  seems better to propagate and detect higher electron density region

图 16 不同波长信号光穿过等离子体的透过率对比, 五倍频具有更显著的优势

同理, 受激布里渊散射(SBS)也会在激光传播方向上激发一支离子声波。当探针光电磁波与上述电子等离子体波或离子声波恰好耦合时, 就可能产生超热相干汤姆逊散射, 散射信号中包含有上述定向波的信息, 由此可对 SRS 或 SBS 开展物理过程分析<sup>[35-36]</sup>。在已知的诊断方法中, 超热相干汤姆逊散射是 ICF 研究领域唯一能够直接诊断等离子体中定向波的手段, 具有非常强大的应用潜力。

但是, 超热相干汤姆逊散射对实验设计的要求非常高。在热相干汤姆逊散射中, 目标等离子体本征波模为各项同性, 重点需要考虑的是波矢匹配关系。但由于激光等离子体不稳定性激发的等离子体波模方向特定, 色散关系又与 LPI 过程密切相关, 这意味着超热相干汤姆逊散射在设计上不仅需要考虑波矢匹配, 还需要在频率上匹配。因此, 超热相干汤姆逊散射不仅对探针光的入射方位和散射收光方位有着严苛的要求, 还对探针光的波长有着范围要求。在神光系列的大科学装置上, 由于靶室法兰窗口的局限性, 进一步增大了实验排布设计的难度。

神光 III 原型装置上曾诊断得到 ICF 黑腔超热相干汤姆逊散射光谱<sup>[19]</sup>, 如图 17 所示。实验采用  $\phi 1000 \mu\text{m} \times 2100 \mu\text{m}$  黑腔, 内充 0.07 MPa 的辛戊烷。7 束三倍频激光用于加热黑腔, 激光波形采用 1 ns 方波, 总能量 5.6 kJ。诊断位置位于 N3 路激光光路上, 且靠近 N3 路激光在腔壁的打击点, Au 泡界面在主脉冲期间可能扫过该探测点。从散射波矢匹配图(图 17(b))可以看到, 散射差矢正好与 N3 路激光光路方向一致, 且汤姆逊散射离子谱(图 18(c))的红峰强度远高于蓝峰强度, 符合超热相干的光谱特征。分析表明, 该发次的汤姆逊散射信号来自于 Au 等离子

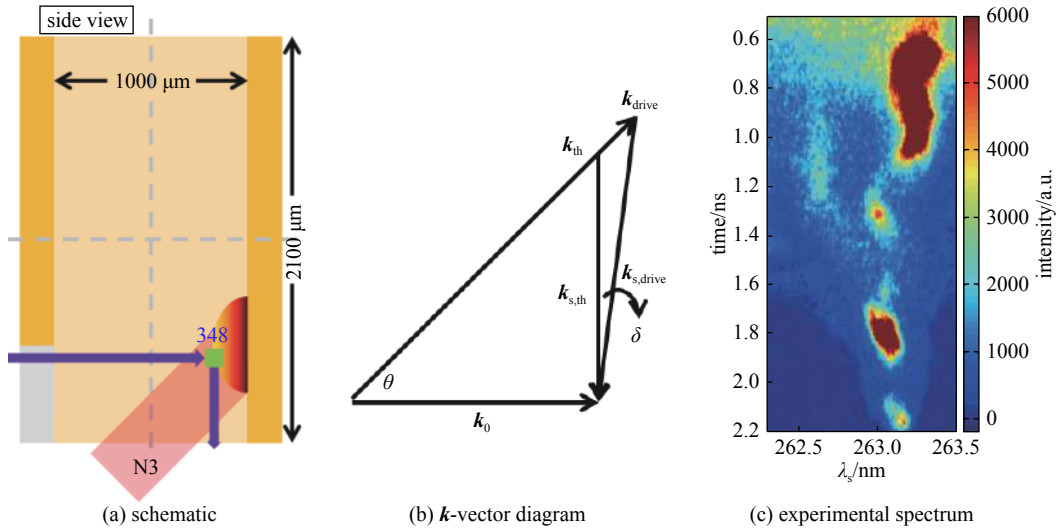


Fig. 17 Schematic of experiment setup of superhot collective Thomson scattering on Shenguang-III prototype,  $k$ -vector diagram and experimental spectrum

图 17 神光 III 原型装置超热相干汤姆逊散射实验排布、散射差矢与光谱结果

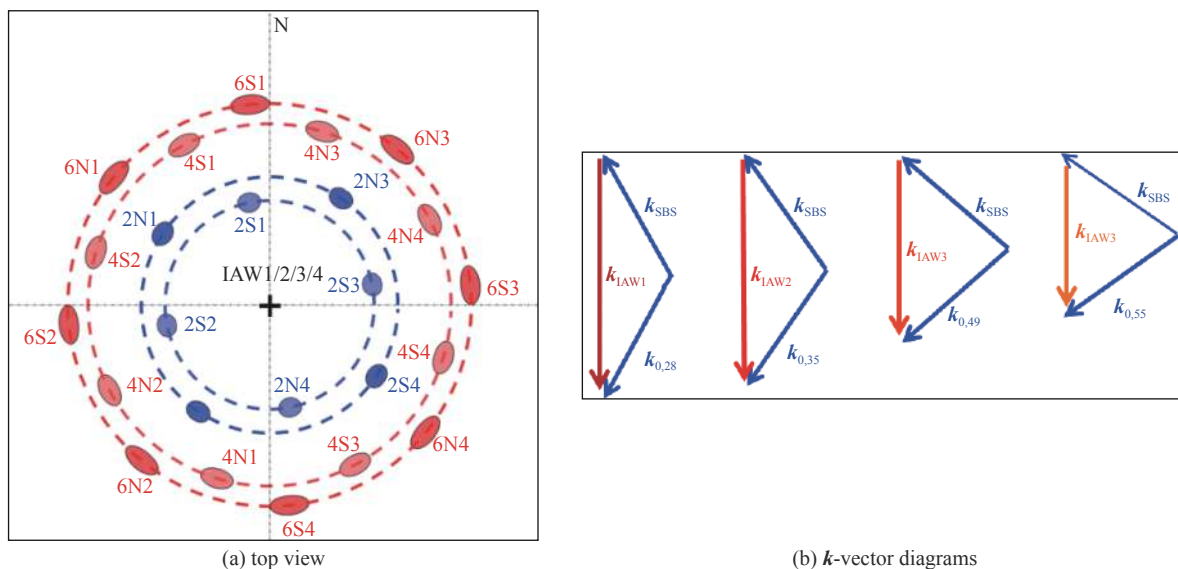


Fig. 18 Schematic of four kinds of multi-beam SBS that are coupled to a coaxial wave on 100 kJ-level laser facility

图 18 100 kJ 装置四类共轴多光束 SBS 耦合示意图

体, 电子密度约为  $0.22n_c$ , 电子温度约为 4 keV。

超热相干汤姆逊散射还可用于探索某些新的物理机制。随着更大规模激光装置的投入运行, 几十甚至上百路激光从不同角度入射腔靶, 给 LPI 带来了新的物理现象, 如多光束参与作用的共用波或共用散射光 LPI<sup>[37-39]</sup>, 使得散射光可能不再沿激光背向传播。如果能够确认这些有关多光束 LPI 的新现象和新规律, 将使人们重新审视目前基于背向散射光实验测量的激光靶耦合物理认识。图 18 展示了 100 kJ 装置上四类可能的共轴多光束 SBS 耦合示意图。

## 4 结 论

光学汤姆逊散射在激光惯性约束聚变中有着极为重要的应用, 是 ICF 黑腔等离子体状态参数诊断的标准方法。本文回顾了光学汤姆逊散射技术在神光系列激光装置上的发展历程, 介绍了近年来几个重要的实验应用案例, 包括神光 III 原型长脉冲 Au 盘靶稳恒源实验、神光 III 原型单环充气黑腔实验、100 kJ 装置多环辐照充气黑腔实验等。通过汤姆逊散射在这些实验中的应用, 不仅加深了对 ICF 激光靶耦合环节的物理理解, 也揭示了探针光和靶的相关参数对汤姆逊散射诊断的影响, 促进了汤姆逊散射技术的精密化发展。最后, 本文还对汤姆逊散射技术未来的发展进行了深入思考, 提出了面向参数诊断精密化提升的多支路汤姆逊散射技术、面向点火黑腔条件的五倍频汤姆逊散射技术、以及面向新物理机制研究的超热相干汤姆逊散射实验技术。通过上述技术的发展, 光学汤姆逊散射将在神光系列装置, 乃至未来的 MJ 装置上发挥更广泛、更重要的作用, 其应用领域将拓展到整个高能密度物理实验科学。

**致 谢** 感谢中国科学院西安光学精密机械研究所闫亚东研究员在成像组件设计与研制方面的研讨与合作, 感谢激光聚变研究中心靶科学与研究部在实验靶设计方面的有益研讨和协助, 同时也感谢神光 III 原型、神光十万焦耳驱动器团队在四倍频探针光和实验运行期间的稳定保障和大力支持。

## 参考文献:

- [1] 李三伟, 杨冬, 李欣, 等. 我国激光间接驱动黑腔物理实验研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 065202. (Li Sanwei, Yang Dong, Li Xin, et al. Recent progress of hohlraum physics experiments in indirect driven ICF in China[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48: 065202)
- [2] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [3] Lindl J, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [4] Glenzer S H, Back C A, Suter L J, et al. Thomson scattering from inertial confinement fusion hohlraum plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(7): 1277-1280.
- [5] Glenzer S, MacGowan B, Michel P, et al. Symmetric Inertial Confinement Fusion implosions at ultra-high laser energies[J]. *Science*, 2010, 327(5970): 1228-

1231.

- [6] National Nuclear Security Administration. National Ignition campaign program completion report[R]. LLNL-TR-570412, 2021.
- [7] Lindl J, Landen O, Edward J, et al. Review of the National Ignition Campaign 2009-2012[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 020501.
- [8] Guo Liang, Li Xin, Xie Xufei, et al. Experimental and simulation studies on gold bubble movement in gas-filled hohlraums[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 016002.
- [9] 杨冬, 李志超, 李三伟, 等. 间接驱动惯性约束聚变中的激光等离子体不稳定性[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48: 065203. (Yang Dong, Li Zhichao, Li Sanwei, et al. Laser plasma instability in indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48: 065203)
- [10] Froula D, Glenzer S, Luhmann N, et al. Plasma scattering of electromagnetic radiation: Theory and measurement techniques[J]. *Fusion Science and Technology*, 2012, 61(1): 104-105.
- [11] Bai Bo, Zheng Jian, Liu Wandong, et al. Thomson scattering measurement of gold plasmas produced with 0.351  $\mu\text{m}$  laser light[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(9): 4144-4148.
- [12] Bai Bo, Zheng Jian, Yu Changxuan, et al. Collective Thomson scattering from laser-produced plasmas[J]. *Chinese Physics Letters*, 2001, 18(7): 936-939.
- [13] 王哲斌. 激光聚变等离子体Thomson散射诊断[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 121-286. (Wang Zhebin. Thomson scattering of laser plasmas in relevance to inertial confinement fusion[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 121-286)
- [14] Wang Zhebin, Zheng Jian, Zhao Bin, et al. Thomson scattering from laser-produced gold plasmas in radiation conversion layer[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12: 082703.
- [15] 李志超. 大尺度激光等离子体相互作用的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011: 11-199. (Li Zhichao. Experimental research on large-scale laser-plasma interactions[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011: 11-199)
- [16] Li Zhichao, Zheng Jian, Jiang Xiaohua, et al. Methods of generation and detailed characterization of millimeter-scale plasmas using a gasbag target[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28: 125202.
- [17] Li Zhichao, Zheng Jian, Jiang Xiaohua, et al. Interaction of 0.53  $\mu\text{m}$  laser pulse with millimeter-scale plasmas generated by gasbag target[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19: 062703.
- [18] Gong Tao, Li Zhichao, Jiang Xiaohua, et al. Development of Thomson scattering system on Shenguang-III prototype laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86: 023501..
- [19] 龚韬. 激光间接驱动惯性约束聚变中受激散射过程的理论和实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015. (Gong Tao. Theoretical and experimental study on the stimulated scattering in laser indirect-drive inertial confinement fusion [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015)
- [20] Zheng Wanguo, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua, et al. laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III laser facility[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017, 2(5): 243-250.
- [21] Zhao Hang, Li Zhichao, Yang Dong, et al. Implementation of ultraviolet Thomson scattering on SG-III laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 093505.
- [22] Zhao Hang, Li Zhichao, Yang Dong, et al. Progress in optical Thomson scattering diagnostics for ICF gas-filled hohlraums[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2019, 4: 055201.
- [23] Froula D H, Ross J S, Divol L, et al. Thomson scattering measurements of high electron temperature hohlraum plasmas for laser-plasma interaction studies[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13: 052704.
- [24] Song Tianming, Yang Jiamin, Yang Dong, et al. Experimental study of the X-ray radiation source at approximately constant radiation temperature[J]. *Plasma Science and Technology*, 2013, 15(11): 1108-1111.
- [25] Song Tianming, Yang Jiamin, Zhu Tuo, et al. Continued study of hohlraum radiation source at approximately constant radiation temperature[J]. *Plasma Science and Technology*, 2016, 18(4): 342-345.
- [26] Li Zhichao, Jiang Xiaohua, Liu Shenye, et al. A novel flat-response X-ray detector in the photon energy range of 0.1–4 keV[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 073504.
- [27] Li Zhichao, Zhu Xiaoli, Jiang Xiaohua, et al. Note: Continuing improvements on the novel flat-response X-ray detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82: 106106.
- [28] 宋鹏, 崔传磊, 李双贵, 等. 激光间接驱动惯性约束聚变二维总体程序—LARED集成程序[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 032007. (Song Peng, Zhai Chuanlei, Li Shuangui, et al. LARED—Integration code for numerical simulation of the whole process of the indirect-drive laser inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 032007)
- [29] Shan Lianqiang, Cai Hongbo, Zhang Huasen, et al. Experimental evidence of kinetic effects in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120: 195001.
- [30] Jiang Shaoen, Wang Feng, Ding Yongkun, et al. Experimental progress of inertial confinement fusion based at the ShenGuang-III laser facility in China[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 032006.
- [31] Huo Wenyi, Li Zhichao, Chen Yaohua, et al. First octahedral spherical hohlraum energetics experiment at the SGIII laser facility[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120: 165001.
- [32] Liu Yaoyuan, Ding Yongkun, Zheng Jian. Improvement in Thomson scattering diagnostic precision via fitting the multiple-wavenumber spectra

- simultaneously[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90: 083501.
- [33] Ross J S. UV Thomson scattering on the NIF[C]//National ICF Diagnostic Working Group Meeting. 2015.
- [34] Gong Tao, Hao Liang, Li Zhichao, et al. Recent research progress of laser plasma interactions in Shenguang laser facilities[J]. [Matter and Radiation at Extremes](#), 2019, 4: 055202.
- [35] Kline J L, Montgomery D S, Bezzerides B, et al. Observation of a transition from fluid to kinetic nonlinearities for Langmuir waves driven by stimulated Raman backscatter[J]. Physical Review Letters, 2005, 94: 175003.
- [36] Rousseaux C, Gremillet L, Casanova M, et al. Transient development of backward stimulated Raman and Brillouin scattering on a picosecond time scale measured by subpicosecond Thomson diagnostic[J]. Physical Review Letters, 2006, 97: 015001.
- [37] Turnbull D, Michel P, Ralph J E, et al. Multibeam seeded Brillouin sidescatter in inertial confinement fusion experiments[J]. Physical Review Letters, 2015, 114: 125001.
- [38] Michel P, Divol L, Dewald E L, et al. Multibeam stimulated Raman scattering in inertial confinement fusion conditions[J]. Physical Review Letters, 2015, 115: 055003.
- [39] Neuville C, Tassin V, Pesme D, et al. Experimental evidence of the collective Brillouin scattering of multiple laser beams sharing acoustic waves[J]. [Physical Review Letters](#), 2016, 116: 235002.