

基于神光 100 kJ 装置的五倍频汤姆孙散射评估

赵航¹, 李志超¹, 李欣², 刘耀远¹, 龚韬¹, 郭亮¹, 李三伟¹, 蒋小华¹, 李琦¹, 潘凯强¹,
陈朝鑫¹, 杨冬¹, 丁永坤², 王峰^{1*}

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

摘要 基于神光 100 kJ 装置的实验条件,对深紫外五倍频汤姆孙散射诊断应用的可行性与适用性进行了评估,并与目前广泛应用的四倍频汤姆孙散射进行了对比,为面向惯性约束聚变等离子体高精度诊断的技术路线选择提供了参考。从探针束信号、驱动束本底和韧致辐射本底等方面进行评估,针对汤姆孙散射离子谱和电子谱测量波段分别开展讨论。结果表明:对于离子谱,采用五倍频探针束可以显著提升信背比;对于电子谱红峰,无论采用五倍频探针束还是四倍频探针束均受到驱动束强本底的干扰;对于电子谱蓝峰,采用五倍频探针束可以避开驱动束本底,但韧致辐射本底会显著增强。综合来看,五倍频汤姆孙散射对低原子序数等离子体的测量具有显著的优势,对高原子序数等离子体的测量优势并不明显。

关键词 真空紫外; 汤姆孙散射; 五倍频; 惯性约束聚变; 等离子体

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134013

Assessment of Quintuple-Frequency Thomson Scattering on Shenguang-100 kJ Laser Facility

Zhao Hang¹, Li Zhichao¹, Li Xin², Liu Yaoyuan¹, Gong Tao¹, Guo Liang¹, Li Sanwei¹,
Jiang Xiaohua¹, Li Qi¹, Pan Kaiqiang¹, Chen Chaoxin¹, Yang Dong¹, Ding Yongkun²,
Wang Feng^{1*}

¹Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;

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

Abstract Based on the experimental conditions of the Shenguang-100 kJ laser facility, the feasibility and applicability of the deep ultraviolet quintuple-frequency Thomson scattering diagnostics are evaluated, and compared with the widely used quadruple-frequency Thomson scattering, so as to provide a reference for the technical route for high-precision diagnosis of inertial confinement fusion plasmas. The probe beam signal, the drive-beam background, and the bremsstrahlung background are evaluated, and the measurement bands of the Thomson scattering ion spectrum and electron spectrum are discussed respectively. The results show that for the ion spectrum, the signal-to-background ratio can be significantly improved by using a quintuple-frequency probe beam. For the red peak of the electron spectrum, whether a quintuple-frequency probe beam or a quadruple-frequency probe beam is used, it is strongly disturbed by the intense background of the drive beam. For the blue peak of the electron spectrum, the drive beam background can be avoided by using a quintuple-frequency probe beam, while the bremsstrahlung background will be significantly enhanced. In general, quintuple-frequency Thomson scattering has significant advantages in the measurement of low atomic number plasmas, but not for high atomic number plasmas.

Key words vacuum ultraviolet; Thomson scattering; quintuple frequency; inertial confinement fusion; plasmas

收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-04-02; 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0403300)、国家自然科学基金(11975215)

通信作者: *lfrc_wangfeng@163.com

1 引言

汤姆孙散射(TS)^[1-2]是一种强有力的等离子体参数诊断方法,可以对等离子体中电子与离子的温度、密度和流速等一系列状态参数进行高精度诊断^[3-7]。经过多年的技术发展,汤姆孙散射已在激光惯性约束聚变^[8]和高能量密度物理^[9]等实验研究中得到了广泛应用。汤姆孙散射诊断技术涉及探针光和散射光两个部分。从探针光来看,汤姆孙散射技术经历了从长波长向短波长发展的历程^[8-14]。相对而言,更短波长的探针光在等离子体中具有更好的穿透性和更强的抗偏折能力,因而适用于诊断密度更高的区域。在诸如神光系列^[15-16]的大型激光装置上,目前较为成熟且应用最为广泛的是基于四倍频探针光(波长为 263.3 nm)的汤姆孙散射技术^[14,17-20]。从散射光来看,汤姆孙散射可按光谱特征分为离子谱和电子谱两个部分。其中,离子谱对应于探针光波长附近的窄带波段,电子谱则包含波长大于探针光(对应于红峰)和小于探针光(对应于蓝峰)的宽波段。不同的测量波段具有不同的探测效率和本底水平,因而对应于不同的技术路线。一般而言,要实现等离子体参数的高精度诊断,需要同时对离子谱与电子谱信号或是不同波数的离子谱信号联合开展光谱拟合。目前已发展的技术路线包括离子谱与电子谱红峰联合诊断技术^[14]、离子谱与电子谱蓝峰联合诊断技术^[21-22]、双角度离子谱联合诊断技术^[22-24]和双色离子谱联合诊断技术^[25]。

在激光惯性约束聚变等离子体诊断的应用场景下,尤其是在数十束甚至上百束激光交叠的区域,汤姆孙散射信号测量会面临三倍频(波长为 351 nm)驱动束本底的强干扰,其典型的波长范围可覆盖 230~520 nm,对四倍频汤姆孙散射离子谱与电子谱信号均有影响。因此,为获得具有一定信背比、可解谱的汤姆孙散射信号,需要采取相应的技术手段对本底进行控制。针对这一问题有两种技术发展思路。其一是基于成熟的四倍频汤姆孙散射技术,对诊断排布进行优化,从视场上尽量避开强本底的区域,并且针对特定的等离子体参数区间采用特定的入射角与散射角以提升信背比,如法国兆焦耳激光装置(LMJ)的汤姆孙散射系统设计^[26]。其二是发展五倍频(波长为 210.6 nm)汤姆孙散射技术,从测量波段上避开三倍频本底,如美国国家点火装置(NIF)的汤姆孙散射系统设计^[27-29]。虽然五倍频汤姆孙散射技术在穿透性、抗偏折性和抗三倍频干扰

等方面具有优势,但面临倍频效率低、深紫外光学传输和探测效率低等问题,故仍有相当多的技术难题需要解决^[30-32]。此外,随着波长变短,等离子体韧致辐射本底强度会极大增强,尤其是在惯性约束聚变黑腔内的高原子序数和高电子密度区域中,故对五倍频汤姆孙散射电子谱蓝峰(一般落在 140~200 nm 范围内)的测量是极大挑战。

本文基于神光 100 kJ 装置的实验条件,对五倍频汤姆孙散射诊断应用的可行性与适用性进行评估,并与四倍频汤姆孙散射进行对比,为面向惯性约束聚变等离子体高精度诊断的技术路线的选择提供参考。本文结合辐射流体模拟给出的等离子体状态,从探针束信号、驱动束本底和韧致辐射本底等方面进行评估,针对汤姆孙散射离子谱和电子谱测量波段分别展开讨论。本文结构安排:第 2 章介绍汤姆孙散射信号与本底的评估方法;第 3 章结合具体的辐射流体算例,对五倍频和四倍频汤姆孙散射的信背比进行评估和对比;第 4 章进行总结。

2 汤姆孙散射信号与本底

2.1 汤姆孙散射信号

若入射探针光的功率密度为 I_0 ,波矢和频率分别为 \mathbf{k}_i 和 ω_i ,则沿波矢 \mathbf{k}_s 方向传播的 Ω 立体角内的频率为 ω_s 到 $\omega_s + \Delta\omega_s$ 的散射光功率^[1]可表示为

$$P_s(\omega_s)\Omega\Delta\omega_s = \frac{1}{2\pi}I_0r_e^2n_eV\Omega\Delta\omega_s\left(1+2\frac{\omega}{\omega_i}\right)\sin^2\phi S(\mathbf{k},\omega), \quad (1)$$

式中: $P_s(\omega_s)$ 是单位立体角、单位频率分量的散射光功率; $\omega = \omega_s - \omega_i$ 和 $\mathbf{k} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i$ 分别是差频和差矢,同时也是汤姆孙散射诊断的等离子体特征频率和特征波矢; r_e 是经典电子半径; n_e 是电子数密度; V 是散射体积; ϕ 是探针光偏振方向和散射光传播方向的夹角; $S(\mathbf{k},\omega)$ 是动力学形状因子。动力学形状因子与等离子体中电子和离子的速度分布函数密切相关,决定了汤姆孙散射光谱的谱形。 $S(\mathbf{k},\omega)$ ^[1]一般可表示为

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

式中: $\epsilon = 1 + \chi_e + \chi_i$ 是等离子体介电函数,其中 χ_e 和 χ_i 分别是电子和离子的电极化率函数; Z 是离子电荷数; f_e 和 f_i 分别是电子和离子的一维速度分布函数; k 为诊断波数。

汤姆孙散射的光谱特征按诊断波数 k 与等离

子体德拜长度 λ_{De} 的关系可分为非集体散射和集体散射两种类型。在惯性约束聚变等离子体条件下, 汤姆孙散射的主要类型是集体散射, 对应的参数条件是散射参数 ($\alpha = 1/k\lambda_{De}$) 大于 1。图 1 展示了集体汤姆孙散射光谱的典型结构, 包括两个离子声波 (IAW) 共振峰和两个电子等离子体波 (EPW) 共振峰, 每个共振峰对应一支等离子体波, 并且它与入射光、散射光之间满足三波耦合关系。对于实验测量而言, 散射角度一般是固定的 (由探针光的入射方向和散射光的收集方向决定), 进而对能耦合到散射光谱中的几支等离子体波进行了限制, 对应于沿着和逆着散射差矢 \mathbf{k} 方向传播的 IAW 和 EPW, 分别形成蓝移的共振峰和红移的共振峰。在实验室坐标系下, 共振峰的频移量由等离子体波的频率和由等离子体宏观流速 \mathbf{u}_n 带来的多普勒频移量共同决定, 满

足的关系为

$$\begin{cases} \Delta\omega_{IAW} = \pm k \sqrt{\frac{ZT_e}{M} \frac{\alpha^2}{1+\alpha^2} + \frac{3T_i}{M}} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{u}_n, \\ \Delta\omega_{EPW} = \pm \sqrt{\omega_{pe}^2 + 3k^2 v_{te}^2} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{u}_n \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_e 和 T_i 分别是电子和离子的温度, 单位为 eV; M 是离子质量; ω_{pe} 是等离子体频率; v_{te} 是电子热速度。一般而言: 离子谱的双峰间距主要反映 ZT_e , 峰宽主要反映离子温度 T_i , 整体的频移反映等离子体的宏观流速大小 u_n ; 电子谱的峰位主要反映电子的数密度 n_e , 峰宽主要反映电子温度 T_e 。如果能同时测得汤姆孙散射的离子谱与电子谱, 就可以依据动力学形状因子 $S(\mathbf{k}, \omega)$ 的表达式, 通过光谱拟合给出一整套自洽的等离子体状态参数。

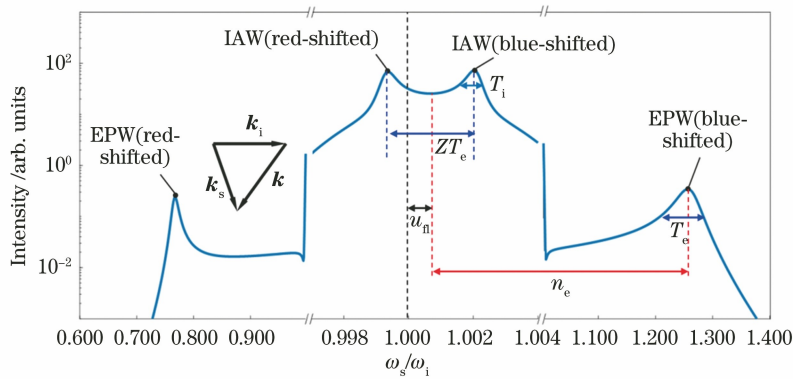


图 1 集体汤姆孙散射的光谱特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral characteristics of collective Thomson scattering

汤姆孙散射信号可根据式(1)、(2)计算。其中, 立体角由散射光收光系统的 F 数决定, 散射体积则由探针光束的直径和收光视场光阑的大小共同决定。在汤姆孙散射实验设计中, 散射角度是影响实验布局和信号特征的关键参量, 其影响主要体现在两个方面: 1) 散射体积的限定; 2) 集体效应的强弱。图 2 对比了前向散射、 90° 散射和后向散射三种情形。从汤姆孙散射体积的形态来看: 90° 散射具有最小的散射体积, 该情况下参数诊断受等离子体不均匀性(梯度)的影响较小; 前向和后向散射的散射体积相对狭长, 这两种情况下受等离子体不均匀性的影响较大。从集体效应的强度来看, 前向散射的集体效应较强 (k 小, α 大), 后向散射的集体效应较弱 (k 大, α 小)。若要提升汤姆孙散射信号的强度, 则应尽量选择前向散射。

图 3 对比了同一状态的等离子体 ($n_e = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 1500 \text{ eV}$, 成分为 C_5H_{12}) 在不同散

射角度下产生的汤姆孙散射光谱信号 (以四倍频探针光为例)。从电子谱蓝峰和红峰来看: 小角度散射的光谱较窄而大角度散射的光谱较宽, 信号的峰值强度则随散射角度的增大呈现先增大后减小的趋势; 对于典型的惯性约束聚变黑腔等离子体状态, 最佳散射角为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。从离子谱来看, 信号的宽度随散射角度的增大而增大, 峰值强度随散射角度的增大而单调递减。由于离子谱信号的绝对强度远高于电子谱信号, 故无论选择前向散射还是后向散射, 对离子谱来说测量都相对容易。因此, 散射角度的选取主要考虑电子谱信号。目前在神光 100 kJ 装置上的汤姆孙散射诊断系统可开展 42° 、 90° 和 138° 三种角度的测量^[17-18, 22]。

2.2 本底

由图 2 可知, 汤姆孙散射信号来源于收光通道与探针束交叠的区域。然而, 收光通道除了与探针束产生交叠外, 还可能与驱动束产生交叠, 进而可以

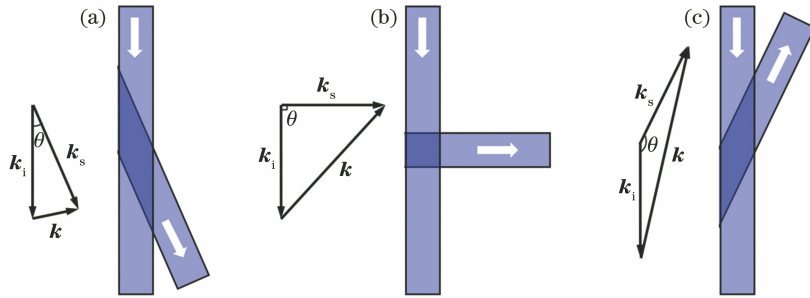


图 2 不同散射角度下的波矢匹配与散射体积示意图。(a)前向散射;(b)90° 散射;(c)后向散射
Fig. 2 Schematic diagram of wave vector matching and scattering volume at different scattering angles.
(a) Forward scattering; (b) 90° scattering; (c) backward scattering

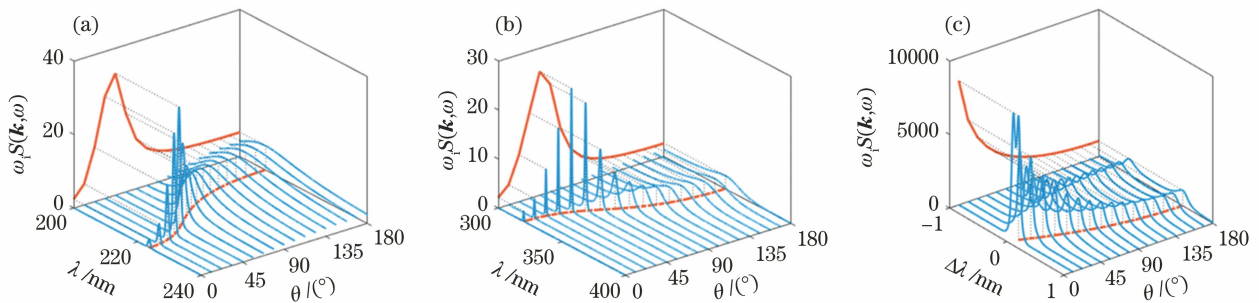


图 3 汤姆孙散射光谱随散射角度的变化情况。(a)电子谱蓝峰;(b)电子谱红峰;(c)离子谱
Fig. 3 Thomson scattering spectrum varying with scattering angle. (a) Blue peak of electron spectrum; (b) red peak of electron spectrum; (c) ion spectrum

收集来自驱动束的汤姆孙散射光。对于要测量的信号而言,驱动束的汤姆孙散射光谱即为本底干扰。此外,在整个收光通道上,等离子体自身的轫致辐射也会进入收光系统形成本底。图 4 以典型的黑腔靶汤姆孙散射实验排布为例展示了收光通道上汤姆孙散射信号与本底来源的区域。

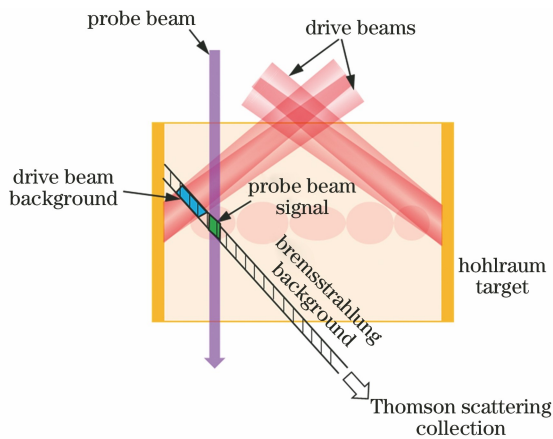


图 4 汤姆孙散射测量中的本底来源示意图
Fig. 4 Schematic diagram of background source in Thomson scattering measurement

驱动束的本底实质上仍是汤姆孙散射,可根据式(1)、(2)计算。对于收光 F 数较大的情况,收光区域可近似为横截面积固定的柱状通道^[6,22]。轫致

辐射本底的计算公式为

$$P_B(\lambda) = 2.09 \times 10^{-36} \frac{V_B}{4\pi} g Z^2 \left(\frac{n_e n_i}{\lambda^2 T_e^{1/2}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{1.24 \times 10^{-4}}{\lambda T_e}\right), \quad (4)$$

式中: $P_B(\lambda)$ 是单位立体角、单位波长的轫致辐射功率,单位为 W/cm ; λ 是波长,单位为 cm ; g 是 Gaunt 因子,无量纲,对于 $\lambda < 10^{-5} \text{cm}$ 的波段可取 $g = 1$; n_e 和 n_i 分别为电子和离子的数密度,单位为 cm^{-3} ; V_B 为收光体积,单位为 cm^3 。

图 5 展示了汤姆孙散射全波段的信号与本底光谱,计算中取等离子体状态为 $T_e = 1500 \text{eV}$, $n_e = 5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。四倍频探针束光强取为 $2 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$, 散射角与偏振角均取为 90° , 散射体积大小为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。三倍频驱动束的光强与探针束保持同样的设置,但考虑到光束直径的差异,其散射体积大小取为探针束的 5 倍。需要注意的是,这里考虑的是单一驱动束的情况,对于多驱动束而言,总的本底谱是各束本底谱的叠加,其强度会更高。从图 5 中可以看到,三倍频驱动束产生的汤姆孙散射光谱可覆盖的波长范围为 $230 \sim 520 \text{nm}$ 。对四倍频汤姆孙散射信号的影响主要有两点:1) 在 $300 \sim 400 \text{nm}$ 波长范围内,驱动束本底可能远高于

四倍频的电子谱红峰信号,从而将电子谱红峰信号淹没;2)在 263 nm 波长附近,驱动束的电子谱蓝峰可能形成较强的本底,对四倍频离子谱信号造成干扰。相比之下,在 180~240 nm 波长范围内,驱动束本底对四倍频电子谱蓝峰的影响相对较小,但由于电子谱的峰位会随电子密度的变化而移动,因此在实验中固定的测量波段内仍有可能探测到由驱动束电子谱蓝峰形成的强本底。从五倍频探针束产生的汤姆孙散射信号来看(计算中探针光强和散射体积与四倍频探针束保持一致),其光谱相对四倍频信号整体向短波方向移动。因此,五倍频汤姆孙散射的离子谱波段(210 nm 附近)和电子谱蓝峰波段(140~180 nm)受三倍频驱动束的干扰显著降低,这一特征是五倍频汤姆孙散射最大的优势。然而,当五倍频的电子谱红峰落在 250~300 nm 波长范围内时,其仍会受到三倍频驱动束的强干扰。此外,由于等离子体韧致辐射本底整体呈现短波强、长波弱的特征,故五倍频的电子谱蓝峰波段相比四倍频会受到更强的韧致辐射干扰,这是五倍频汤姆孙散射的劣势。

表 1 对比了不同波段下汤姆孙散射信号测量所面临的背景干扰情况。对于离子谱测量,等离子体韧致辐射的影响很小,干扰源主要是驱动束的本底。

表 1 汤姆孙散射测量中的本底强度对比

Table 1 Comparison of background intensity in Thomson scattering measurement

Probe	Background source	Ion spectrum	Red peak of electron spectrum	Blue peak of electron spectrum
Quadruple frequency	Drive beam	★	★★★★★	★★
Quadruple frequency	Bremsstrahlung	☆	★★	★★★★
Quintuple frequency	Drive beam	☆	★★★★★	☆
Quintuple frequency	Bremsstrahlung	☆	★★	★★★★☆

3 五倍频与四倍频汤姆孙散射正算对比

本节基于辐射流体程序 LARED^[33-34] 给出的惯性约束聚变黑腔等离子体状态对五倍频和四倍频汤姆孙散射的信号与本底开展正算对比。以下分两个特征区域进行讨论。其一是激光注入孔附近的低 Z 等离子体区域,该区域主要的本底源于驱动束。其二是腔壁附近的高 Z 等离子体区域,该区域主要的本底源于等离子体韧致辐射。

3.1 低 Z 等离子体区域

图 6 是辐射流体模拟程序 LARED 给出的激光注入孔区低 Z 等离子体状态演化的一个示例。其中,曲线围成的阴影区域表征了 $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ 的汤姆孙散射体积内的参数分布范围。在该

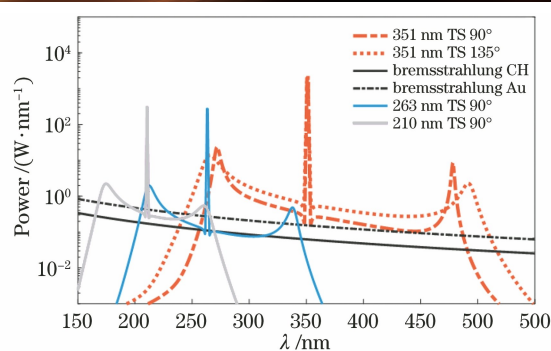


图 5 汤姆孙散射全波段的信号-本底对比

Fig. 5 Signal-background comparison of Thomson scattering in full band

若采用五倍频汤姆孙散射,则驱动束的本底也会显著降低,有利于信号的测量。对于电子谱测量,红峰和蓝峰信号需分开考虑。其中:红峰信号无论是采用四倍频汤姆孙散射还是五倍频汤姆孙散射都会受到驱动束的强干扰,测量的可行性不高;蓝峰信号主要受韧致辐射的干扰,若采用五倍频汤姆孙散射,则韧致辐射本底会更强,测量的可行性需根据等离子体状态和散射布局进行具体的评估。其中:★表示本底强度及其对测量的影响,数量越多表示本底强度越强;☆对应的强度要弱于★。

示例中,电子温度 T_e 经历早期的快速上升后,基本处于 2000~3500 eV 范围内。电子的数密度 n_e 经历早期的冲激、中期的稀疏和后期的抬升过程后,变化范围在 $0.2 \times 10^{21} \sim 1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。

根据图 6 的等离子体状态,开展汤姆孙散射正算仿真^[7],可获得图 7 所示的结果,其中图 7(a)~(d)是不包含本底的汤姆孙散射信号,图 7(e)~(h)是汤姆孙散射信号叠加驱动束本底和等离子体韧致辐射本底后的结果。汤姆孙散射计算时选取散射角为 90° 。对比图 7(a)、(b)和图 7(c)、(d)可以看出,在相同的探针光功率密度和相同的散射体积条件下,五倍频汤姆孙散射的信号比四倍频略强。对比图 7(a)、(e)和图 7(b)、(f)可以看出:在电子谱蓝峰波段中存在很强的本底,尤其是演化后期等离子体

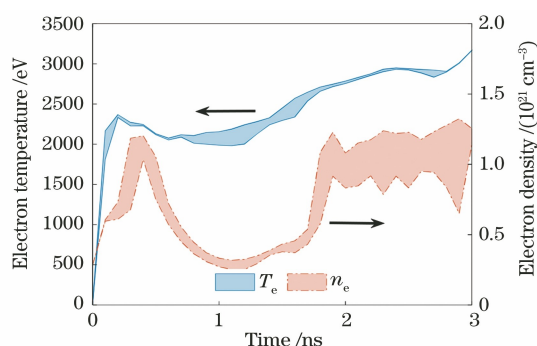


图 6 激光注入孔区的等离子体状态

Fig. 6 Plasma condition at laser entrance hole

密度整体较高时；四倍频电子谱蓝峰波段主要受到三倍频驱动束本底的影响，体现为长波段的强本底[图 7(e)中 220~230 nm 波长范围内]；五倍频电子谱蓝峰波段主要受到等离子体韧致辐射本底的影响，体现为短波段的强本底[图 7(f)中 150~160 nm 波长范围内]。对比图 7(c)、(g)和图 7(d)、(h)可以看出，四倍频离子谱波段中存在较强的本底干扰，而五倍频离子谱波段中相对干净。

图 8 展示了等离子体状态在电子密度 n_e 和电

子温度 T_e 空间内进行参数扫描时，汤姆孙散射离子谱的信背比等高线图。信背比采用简化的评估方式：1)以汤姆孙散射信号离子谱或电子谱共振峰强度除以相应波长点的本底强度作为信背比；2)本底强度包括驱动束本底和韧致辐射本底；3)以同一套等离子体状态参数计算汤姆孙散射信号和本底强度；4)驱动束的散射角取 135° ，收光体积为探针束体积的 5 倍，总光强为探针束光强的 20 倍；5)等离子体韧致辐射本底以 C_5H_{12} 成分计算，有效离子电荷数为 $Z=4.24$ ，收光体积为探针束体积的 20 倍。上述的参数选取是参考典型的实验排布得出的。图 8(a)~(c)展示了四倍频汤姆孙散射离子谱的信背比，散射角度分别为 42° 、 90° 和 138° ，与神光 100 kJ 装置现有的汤姆孙散射诊断系统对应。图 8(a)~(c)中用阴影标识出了信背比小于 3 的区域，在该区域中三倍频驱动束的电子谱蓝峰恰好落在四倍频的离子谱波段内，从而形成较强的本底。图 8(d)~(f)展示了五倍频汤姆孙散射离子谱的信背比，与图 8(a)~(c)一一对应。由于避开了三倍频本底的干扰，故五倍频离子谱的信背比得以大幅提升。

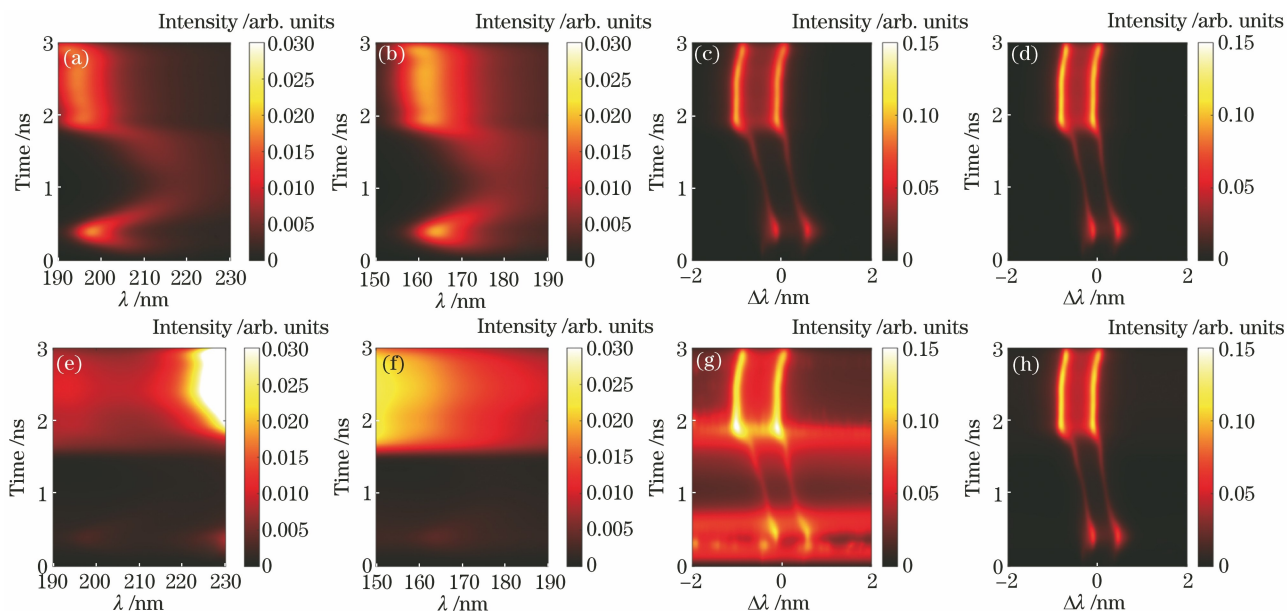


图 7 激光注入孔区的汤姆孙散射光谱比对。(a)四倍频电子谱蓝峰信号；(b)五倍频电子谱蓝峰信号；(c)四倍频离子谱信号；(d)五倍频离子谱信号；(e)四倍频电子谱蓝峰信号加本底；(f)五倍频电子谱蓝峰信号加本底；(g)四倍频离子谱信号加本底；(h)五倍频离子谱信号加本底

Fig. 7 Comparison of Thomson scattering spectra at laser entrance hole. (a) Blue peak signal of quadruple-frequency electron spectrum; (b) blue peak signal of quintuple-frequency electron spectrum; (c) quadruple-frequency ion spectrum signal; (d) quintuple-frequency ion spectrum signal; (e) blue peak signal of quadruple-frequency electron spectrum with background; (f) blue peak signal of quintuple-frequency electron spectrum with background; (g) quadruple-frequency ion spectrum signal with background; (h) quintuple-frequency ion spectrum signal with background

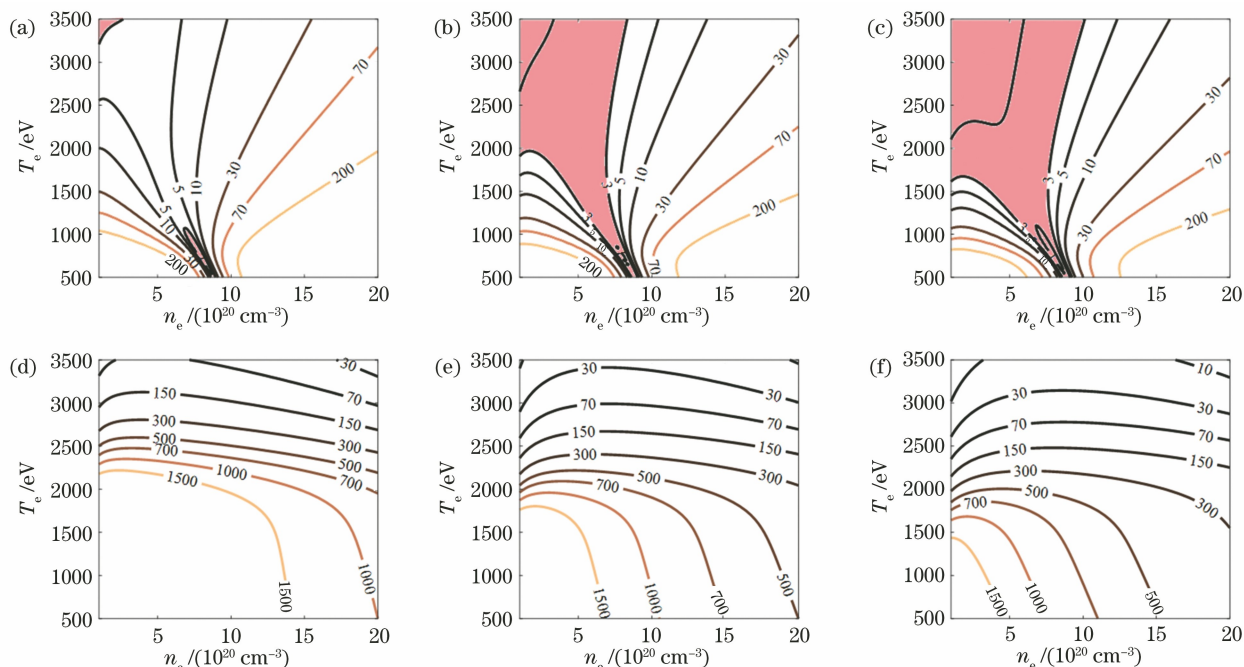


图 8 汤姆孙散射离子谱信背比等高线图。(a)四倍频 42°散射;(b)四倍频 90°散射;(c)四倍频 138°散射;(d)五倍频 42°散射;(e)五倍频 90°散射;(f)五倍频 138°散射

Fig. 8 Contour map of signal-to-background ratio of Thomson scattering ion spectrum. (a) Quadruple-frequency 42° scattering; (b) quadruple-frequency 90° scattering; (c) quadruple-frequency 138° scattering; (d) quintuple-frequency 42° scattering; (e) quintuple-frequency 90° scattering; (f) quintuple-frequency 138° scattering

图 9 展示了汤姆孙散射电子谱蓝峰的信背比等高线图,其评估方法与离子谱类似。图 9(a)~(c) 对应四倍频汤姆孙散射,图 9(d)~(f)对应五倍频汤姆孙散射,阴影部分标识出了信背比小于 1 的等

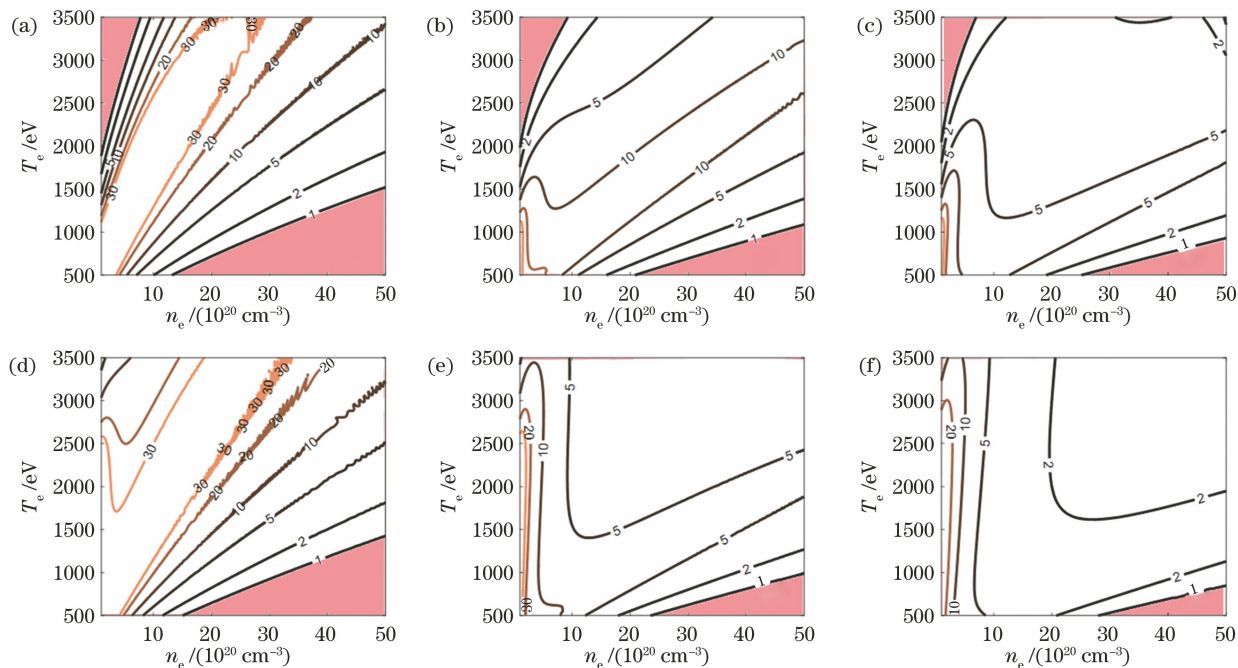


图 9 汤姆孙散射电子谱蓝峰信背比等高线图。(a)四倍频 42°散射;(b)四倍频 90°散射;(c)四倍频 138°散射;(d)五倍频 42°散射;(e)五倍频 90°散射;(f)五倍频 138°散射

Fig. 9 Contour map of signal-to-background ratio of blue peak of Thomson scattering electron spectrum. (a) Quadruple-frequency 42° scattering; (b) quadruple-frequency 90° scattering; (c) quadruple-frequency 138° scattering; (d) quintuple-frequency 42° scattering; (e) quintuple-frequency 90° scattering; (f) quintuple-frequency 138° scattering

离子体参数区域。对比可知:1)随着散射角度的增大,电子谱蓝峰的信背比在主要的参数区(非阴影区域)内逐渐降低;2)在同样的散射角度下,五倍频汤姆孙散射的电子谱蓝峰信背比低于四倍频汤姆孙散射。

3.2 高 Z 等离子体区域

图 10 是辐射流体模拟程序 LARED 给出的黑腔冕区等离子体状态演化的一个示例,曲线围成的阴影区域表征了 $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ 的汤姆孙散射体积内的参数分布范围。在汤姆孙散射体积内,1.5 ns 以前为低 Z 的 CH 等离子体,1.5 ns 以后为高 Z 的 Au 等离子体。电子温度 T_e 主要处于 2000~3000 eV 范围内。电子的数密度 n_e 在物质界面存在一定的堆积,整个演化过程中的变化范围为 $0.4 \times 10^{21} \sim 1.3 \times 10^{21}\ \text{cm}^{-3}$ 。

根据图 10 的等离子体状态,开展汤姆孙散射正算仿真,可获得图 11 所示的结果,其中图 11(a)~(d) 是不包含本底的汤姆孙散射信号,图 11(e)~(h) 是汤姆孙散射信号叠加驱动束本底和等离子体轫致辐射本底后的结果。汤姆孙散射计算时选取散射角为 90° 。对比图 11(a)、(e)和图 11(b)、(f)可以看出,在黑腔高 Z 冕区中,无论是四倍频汤姆孙散

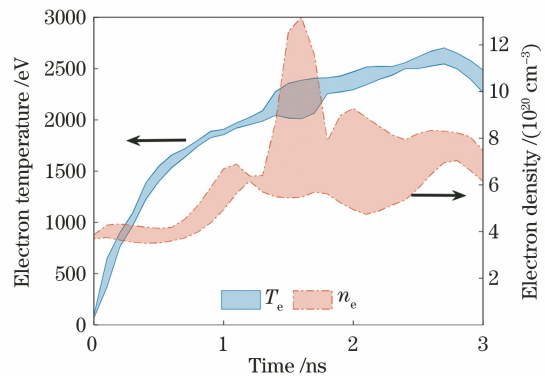


图 10 黑腔冕区的等离子体状态

Fig. 10 Plasma condition at hohlraum coronal region

射还是五倍频汤姆孙散射,电子谱蓝峰波段均存在较强的轫致辐射本底,体现出短波段渐强的特征 [图 11(e)中 190~200 nm 区间内和图 11(f)中 160~170 nm 区间内)。对比图 11(c)、(g)和图 11(d)、(h)可以看出,在黑腔高 Z 冕区中,无论是四倍频汤姆孙散射还是五倍频汤姆孙散射,离子谱波段的本底均处于较低的水平。此外,对比图 7 和图 11 可以发现,高 Z 等离子体的离子谱信号本身具有较高的强度,进而测量相对容易。

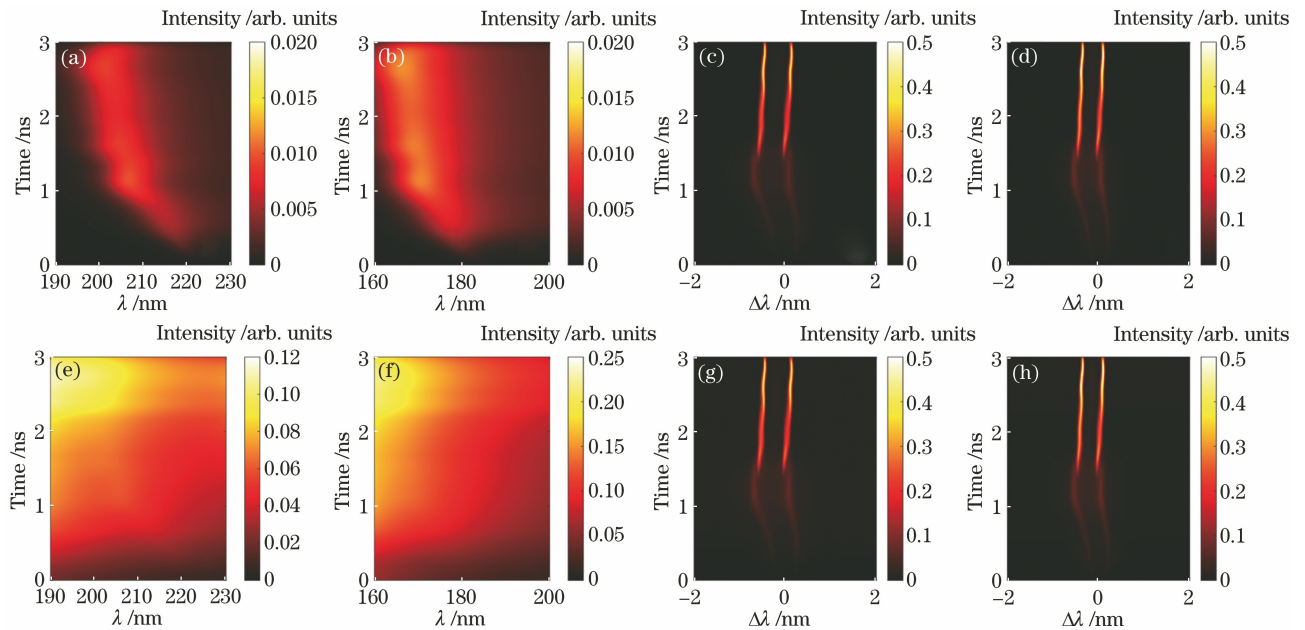


图 11 黑腔冕区的汤姆孙散射光谱对比。(a)四倍频电子谱蓝峰信号;(b)五倍频电子谱蓝峰信号;(c)四倍频离子谱信号;(d)五倍频离子谱信号;(e)四倍频电子谱蓝峰信号加本底;(f)五倍频电子谱蓝峰信号加本底;(g)四倍频离子谱信号加本底;(h)五倍频离子谱信号加本底

Fig. 11 Comparison of Thomson scattering spectra at hohlraum coronal region. (a) Blue peak signal of quadruple-frequency electron spectrum; (b) blue peak signal of quintuple-frequency electron spectrum; (c) quadruple-frequency ion spectrum signal; (d) quintuple-frequency ion spectrum signal; (e) blue peak signal of quadruple-frequency electron spectrum with background; (f) blue peak signal of quintuple-frequency electron spectrum with background; (g) quadruple-frequency ion spectrum signal with background; (h) quintuple-frequency ion spectrum signal with background

图 12 展示了黑腔高 Z 冕区中汤姆孙散射电子谱蓝峰的信背比等高线图,其中图 12(a)~(c)对应四倍频汤姆孙散射,12(d)~(f)对应五倍频汤姆孙散射,阴影部分标识出了信背比小于 1 的等离子体参数区域。相比图 8 和图 9 的评估,等离子体韧致辐射本底以 Au 成分计算,取有效离子电荷数为 $Z=55$,韧致辐射收光体积为探针束汤姆孙散射体积的

10 倍。由于高 Z 等离子体的韧致辐射本底大幅提升,故电子谱蓝峰的信背比出现显著下降(对比图 9 和图 12 可知),可开展实验测量的等离子体参数范围(对应图 12 中信背比大于 1 的区域)也大幅缩减。此外,由于五倍频汤姆孙散射的波长更短,故其电子谱蓝峰受到韧致辐射的影响更强,其适用的参数范围也更为狭窄。

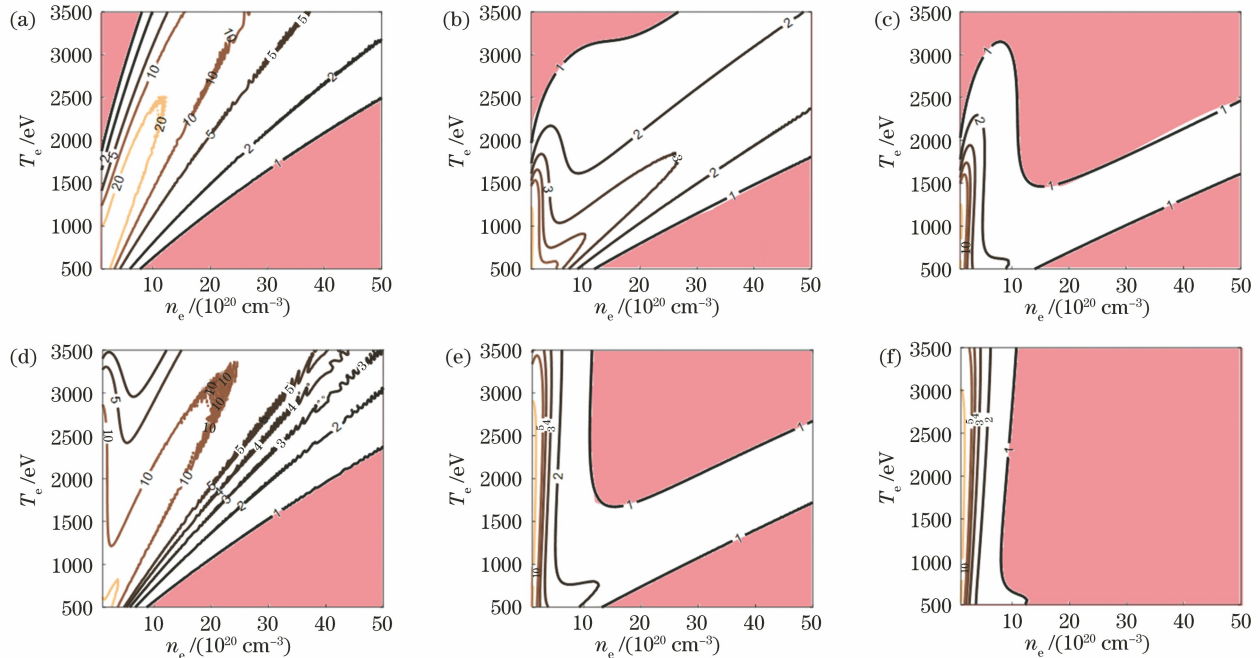


图 12 黑腔高 Z 冕区中汤姆孙散射电子谱蓝峰信背比等高线图。(a)四倍频 42° 散射;(b)四倍频 90° 散射;(c)四倍频 138° 散射;(d)五倍频 42° 散射;(e)五倍频 90° 散射;(f)五倍频 138° 散射

Fig. 12 Contour map of signal-to-background ratio of blue peak of Thomson scattering electron spectrum at hohlraum coronal region with high Z . (a) Quadruple-frequency 42° scattering; (b) quadruple-frequency 90° scattering; (c) quadruple-frequency 138° scattering; (d) quintuple-frequency 42° scattering; (e) quintuple-frequency 90° scattering; (f) quintuple-frequency 138° scattering

4 结 论

基于神光 100 kJ 装置的实验条件,对五倍频汤姆孙散射诊断应用的可行性与适用性进行了评估,并与四倍频汤姆孙散射进行了比对。结果表明:对于离子谱波段,采用五倍频探针束可以显著提升信背比;对于电子谱红峰波段,无论采用五倍频探针束还是四倍频探针束均受到驱动束强本底的干扰,因此未来的发展不建议采用电子谱红峰技术路线;对于电子谱蓝峰波段,采用五倍频探针束可以从波长上避开驱动束本底,但韧致辐射本底会显著增强。综合考虑离子谱与电子谱蓝峰波段的测量信背比:对于低 Z 等离子体而言,五倍频汤姆孙散射具有显著的优势;对于高 Z 等离子体而言,五倍频汤姆孙散射的优势并不明显。若要最大化利用五倍频汤姆

孙散射的优势,则可采用双角度离子谱联合诊断的技术路线。

参 考 文 献

- [1] Froula D H, Glenzer S H, Luhmann N C, et al. Plasma scattering of electromagnetic radiation: theory and measurement techniques[M]. Burlington: Academic Press, 2011.
- [2] 温树槐, 丁永坤. 激光惯性约束聚变诊断学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Wen S H, Ding Y K. Laser inertial confinement fusion diagnostics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [3] Glenzer S H, Alley W E, Estabrook K G, et al. Thomson scattering from laser plasmas[J]. Physics of Plasmas, 1999, 6(5): 2117-2128.
- [4] Froula D H, Ross J S, Divol L, et al. Thomson-

- scattering techniques to diagnose local electron and ion temperatures, density, and plasma wave amplitudes in laser produced plasmas (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10E522.
- [5] Ross J S, Glenzer S H, Palastro J P, et al. Thomson-scattering measurements in the collective and noncollective regimes in laser produced plasmas (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10D523.
- [6] Follett R K, Delettrez J A, Edgell D H, et al. Plasma characterization using ultraviolet Thomson scattering from ion-acoustic and electron plasma waves (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E401.
- [7] Zhao H, Li Z C, Yang D, et al. Progress in optical Thomson scattering diagnostics for ICF gas-filled hohlraums[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2019, 4(5): 055201.
- [8] 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.
- [9] Rinderknecht H G, Park H S, Ross J S, et al. Highly resolved measurements of a developing strong collisional plasma shock [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(9): 095001.
- [10] Glenzer S H, Weiland T L, Bower J, et al. High-energy 4ω probe laser for laser-plasma experiments at Nova[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 1089-1092.
- [11] Bai B, Zheng J, Liu W D, 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] Wang Z B, Zheng J, Zhao B, et al. Thomson scattering from laser-produced gold plasmas in radiation conversion layer[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(8): 082703.
- [13] Li Z C, Zheng J, Jiang X H, 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(6): 062703.
- [14] Gong T, Li Z C, Jiang X H, et al. Development of Thomson scattering system on Shenguang-III prototype laser facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(2): 023501.
- [15] Li P, Jing F, Wu D S, et al. Power balance on the SG-III prototype facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8433: 843317.
- [16] Zheng W G, Wei X F, Zhu Q H, et al. Laser performance of the SG-III laser facility [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4: e21.
- [17] 闫亚东, 卢卫涛, 董晓娜, 等. 神光-III 汤姆孙散射诊断的集光系统设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0611002.
- Yan Y D, Lu W T, Dong X N, et al. Design of collective optic system for Thomson scattering measurements on Shenguang-III facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0611002.
- [18] Zhao H, Li Z C, Yang D, et al. Implementation of ultraviolet Thomson scattering on SG-III laser facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(9): 093505.
- [19] 李志超, 赵航, 龚韬, 等. 激光惯性约束聚变中光学汤姆孙散射研究进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(9): 092004.
- Li Z C, Zhao H, Gong T, et al. Recent research progress of optical Thomson scattering in laser-driven inertial confinement fusion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(9): 092004.
- [20] 柴向旭, 李平, 冯斌, 等. 会聚光束 F 数对四倍频效率的影响及提升技术 [J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0908001.
- Chai X X, Li P, Feng B, et al. Influence of F number on the fourth-harmonic-generation efficiency of convergent beam and its improvement technologies [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0908001.
- [21] Ross J S, Divol L, Sorce C, et al. Ultraviolet Thomson scattering measurements of the electron and ion features with an energetic 263 nm probe [J]. *Journal of Instrumentation*, 2011, 6(8): P08004.
- [22] 赵航. 充气黑腔等离子体状态的 Thomson 散射实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2020: 100-124.
- Zhao H. Thomson-scattering studies on plasma conditions in gas-filled hohlraums [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020: 100-124.
- [23] Liu Y Y, Ding Y K, Zheng J. Improvement in Thomson scattering diagnostic precision via fitting the multiple-wavenumber spectra simultaneously [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(8): 083501.
- [24] Tan W Q, Liu Y Y, Li X Y, et al. Electron density measurement via dual-angle Thomson scattering diagnosis[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(4): 043302.
- [25] Froula D H, Davis P, Divol L, et al. Measurement of the dispersion of thermal ion-acoustic fluctuations in high-temperature laser plasmas using multiple-wavelength Thomson scattering[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(19): 195005.

- [26] Depierreux S, Tassin V, Neuville C, et al. Requirements for a 4ω Thomson scattering system on megajoule scale laser facilities [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(8): 083508.
- [27] Ross J S, Datte P, Divol L, et al. Simulated performance of the optical Thomson scattering diagnostic designed for the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E510.
- [28] Datte P S, Ross J S, Froula D H, et al. The design of the optical Thomson scattering diagnostic for the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E549.
- [29] Awwal A A S. Alignment of pointing beam in the optical thomson scattering laser at the national ignition facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11841: 118410I.
- [30] 郑佳琪, 丛振华, 刘兆军, 等. 高重复频率超短激光脉冲产生及频率变换技术发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1201008.
Zheng J Q, Cong Z H, Liu Z J, et al. Recent trend of high repetition rate ultrashort laser pulse generation and frequency conversion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201008.
- [31] 王江, 罗林保. 基于氧化镓日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1100001.
Wang J, Luo L B. Advances in Ga_2O_3 -based solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1100001.
- [32] 王金艳, 张锦龙, 焦宏飞, 等. 121.6 nm 远紫外高反射薄膜研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0931001.
Wang J Y, Zhang J L, Jiao H F, et al. Study on high reflective film in 121.6 nm far ultraviolet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0931001.
- [33] Pei W B. The construction of simulation algorithms for laser fusion [J]. *Communications in Computational Physics*, 2007, 238(52): 255-270.
- [34] 宋鹏, 翟传磊, 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(3): 032007.
Song P, Zhai C L, Li S G, 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(3): 032007.