

汤姆孙散射 : 等离子体参数诊断的强大工具*

郑 坚[†] 俞昌旋

(中国科学技术大学近代物理系 中国科学院基础等离子体物理重点实验室 合肥 230026)

摘 要 汤姆孙散射是低能光子与自由电子之间的弹性散射. 因为汤姆孙散射光谱携带着等离子体涨落的信息, 通过测量汤姆孙散射光谱可以高精度地测量等离子体的多种参数, 如电子温度、电子密度、等离子体流速等等. 经过多年的发展, 汤姆孙散射已经成为等离子体物理研究中最重要的一种诊断工具.

关键词 等离子体物理, 汤姆孙散射, 动力学形状因子, 等离子体参数

Thomson scattering : a powerful diagnostic tool of plasma physics

ZHENG Jian[†] YU Chang-Xuan

(Key Laboratory of Basic Plasma Physics , Chinese Academy of Sciences , Department of Modern Physics , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 , China)

Abstract Thomson scattering is the process in which a low-energy photon scatters from a free electron. When a laser pulse propagates through a plasma, the spectrum of the scattered light due to the Thomson scattering is proportional to the power spectrum of the electron density fluctuations, i. e., dynamic form factor, from which various plasma parameters can be inferred, such as electron temperature and plasma flow velocity. After years of development, Thomson scattering has now become a powerful diagnostic tool of plasma physics.

Keywords plasma physics, Thomson scattering, dynamic form factor, plasma diagnostics

1 引言

精确测量等离子体的状态参数是深入研究等离子体物理过程的基本前提之一. 对于高温高密度的等离子体, 由于受到可接近性的限制, 实验室常用的主动诊断手段(如探针)是无法接近需要探测的等离子体的. 当然也有其他被动诊断方式可以提供众多等离子体参数的测量手段, 如 X 射线能谱测量. 相对被动诊断手段, 汤姆孙散射作为一种主动诊断手段有其独特的一面: 它可以高时空分辨地测量等离子体参数, 且实验结果的解释相对简单, 即散射光谱以比较直接的方式与等离子体参数有关. 后者特别重要, 因为有些诊断方法严重依赖于对实验数据的解释和处理, 导致获得的等离子体参数的置信度较低. 经过多年的发展, 特别是由于激光技术以及高速高灵敏度探测器的进步, 汤姆孙散射已经逐渐演

化成为惯性约束聚变等离子体的标准诊断手段, 成为精确研究等离子体行为的强大工具.

2 汤姆孙散射的基本原理

汤姆孙散射是低能光子(光子能量远远小于 0.511 MeV)与低能自由电子之间的弹性散射. 该过程的经典物理图像是, 在入射电磁波场中振荡的电子发射电磁波——散射电磁波. 若电子有一运动速度 v , 散射电磁波的频率将不同于入射电磁波的频率, 其差别为

$$\Delta\omega = k \cdot v,$$

这里 $k = k_s - k_0$ 是散射波的波矢与入射电磁波的波

* 国家高技术研究发展计划(惯性约束聚变专题)、国家自然科学基金(批准号: 10625523, 10676033)资助项目

2008-06-10 收到初稿

[†] 通讯联系人. Email: jzheng@ustc.edu.cn

矢之差 称为散射差矢. 由这个简单的公式可以看到, 散射电磁波携带了电子的运动信息, 这就是汤姆孙散射可以用来诊断等离子体的基本原因. 当然, 当我们采用汤姆孙散射诊断等离子体时, 我们测量到的散射光谱来自许多电子产生的散射电磁波的相干叠加. 叠加的结果是, 散射光谱与电子密度涨落功率谱成正比,

$$\frac{d^2P}{d\omega d\Omega} = N_e I_0 r_e^2 \sin^2 \theta S(k, \omega)$$

这里 $S(k, \omega)$ 就是所谓的动力学形状因子, 它是电子密度涨落自相关函数的谱密度; I_0 是入射电磁波的功率密度; N_e 是发生汤姆孙散射的电子数; r_e 是经典电子半径; θ 是入射电磁波的极化方向与散射波矢之间的夹角. 若电子彼此之间是完全无关的, 那么散射光谱就是各个电子散射光谱的简单相加, 此时散射光谱反映了电子在散射差矢方向上的速度分布. 若等离子体中存在集体运动, 电子之间不是彼此完全相互无关的, 干涉效应会导致散射光谱在相应于等离子体集体运动模式的频率和波矢处出现尖锐的极大值. 对于无磁化的等离子体, 我们知道等离子体中的集体运动模式有两个: 高频的电子等离子体波和低频的离子声波. 这两种集体运动模式的色散关系为

$$\omega_{epw}^2 = \omega_{pe}^2 (1 + 3k^2 \lambda_{De}^2),$$

$$\omega_{ia}^2 = \frac{1}{1 + k^2 \lambda_{De}^2} \frac{Z T_e}{m_i} + 3 \frac{T_i}{m_i},$$

这里 ω_{pe} 是朗缪尔振荡频率, λ_{De} 是电子德拜长度, T_e, T_i 是电子/离子温度, Z 是离子电荷数, m_i 是离子质量. 经过适当的实验安排, 以满足 $k^2 \lambda_{De}^2 \ll 1$, 那么我们就能够从散射光谱中获得电子密度 n_e 以及电子密度与离化态乘积 $Z T_e$ 的信息. 此外, 散射光谱的宽度与集体运动模式的阻尼有关, 而阻尼也取决于等离子体的状态参数, 因此通过散射光谱的宽度, 原则上也可以推断出等离子体的参数. 例如, 通过电子等离子体波的散射光谱的宽度, 可以测量电子温度 T_e .

3 汤姆孙散射实验结果

中国科学技术大学基础等离子体物理重点实验室的研究小组与中国工程物理研究院激光聚变研究中心的同事们同心协力, 先后在“星光 II”装置^[1-3]和“神光 II”装置^[4,5]上完成了汤姆孙散射实验. 图 1 是“星光 II”装置上的实验安排示意图^[3]. 实验中,

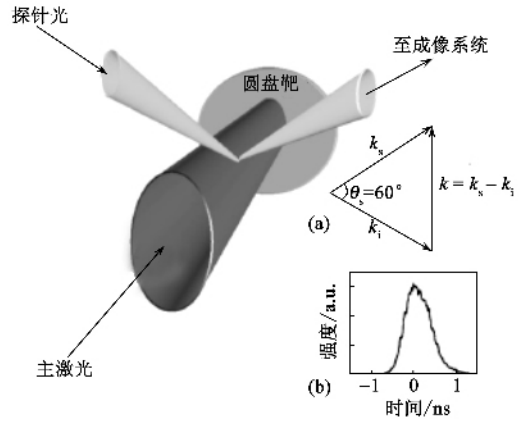


图 1 “星光 II”装置上汤姆孙散射实验安排示意图 (a) 散射差矢的示意图 (b) 主激光的脉冲形状

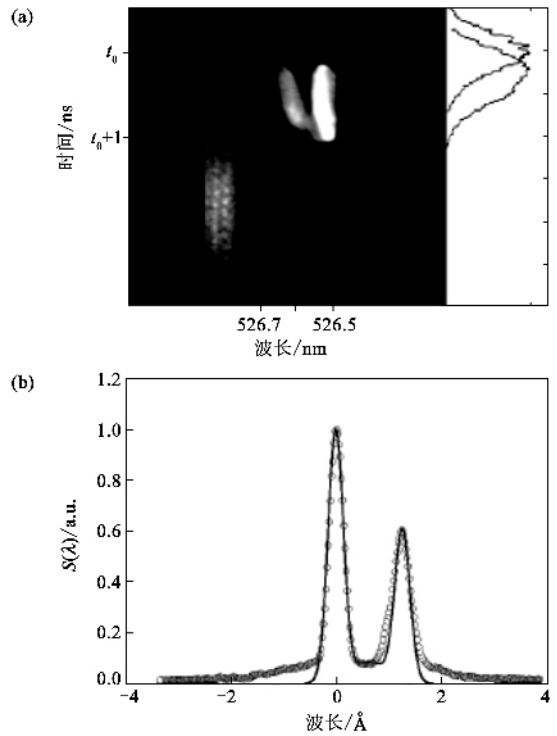


图 2 “星光 II”装置上, 汤姆孙散射光谱及其拟合曲线 (a) 实验结果 (b) $t = t_0 + 450\text{ps}$ 时刻的散射光谱以及理论拟合

我们采用波长为 351 nm 的激光脉冲辐照金平面靶, 产生等离子体, 采用波长为 526.5 nm 的激光脉冲作为汤姆孙散射探测束. 主激光的能量在 100 J 左右, 探针束的能量在 10 J 左右.

我们得到的典型汤姆孙散射光谱如图 2(a) 所示. 由于采用了具有高时间分辨的探测设备, 得到的是随时间的演化汤姆孙散射光谱, 由此我们可以得到等离子体参数随时间的演化.

在“神光 II”装置上, 我们进一步利用汤姆孙散射测量了腔靶等离子体的状态参数^[5]. 实验安排如

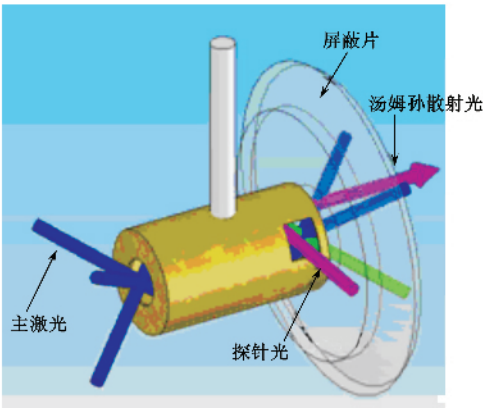


图3 “神光 II”装置上,腔靶的汤姆孙散射实验安排示意图

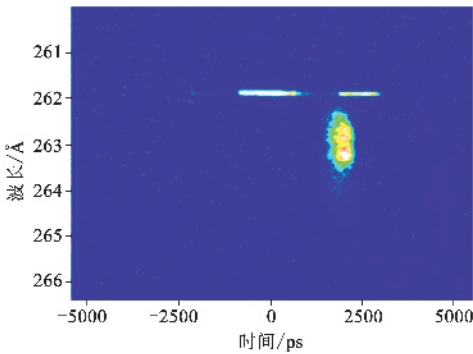


图4 “神光 II”装置上,腔靶内等离子体的汤姆孙散射光谱

图3所示.在圆柱形腔靶的侧壁上,我们开设了一个探针光注入口,散射光由圆柱的端面出射.由于封闭的几何位形,腔靶内等离子体的离子温度一般要远

远高于平面靶产生的等离子体的离子温度.导致汤姆孙散射光谱严重展宽,以至于两个离子声波散射峰融合,如图4所示.

4 总结

本文回顾了中国科学技术大学等离子体物理学科点在汤姆孙散射方面的实验研究工作的主要结果.对于该项诊断技术的掌握,使我们对激光聚变等离子体的演化有了更加深入的了解,有助于我们精确预言激光等离子体的行为.

致谢 本文报告的工作是多人共同努力协作的结果.作者对以下人员的贡献表示感谢:白波、王哲斌、蒋小华、李文洪、刘永刚、曹柱荣、丁永坤、郑志坚等,同时感谢中国工程物理研究院激光聚变中心的制靶人员;“星光 II”装置全体运行人员,以及“神光 II”装置全体运行人员.

参考文献

[1] Bai B, Zheng J, Yu C X *et al.* Chin. Phys. Lett. 2001, 18 :936
 [2] Zheng J, Bai B, Liu W D *et al.* Chin. Phys. Lett. 2001, 18 : 1377
 [3] Bai B, Zheng J, Liu W D *et al.* Phys. Plasmas, 2001, 8 :4144
 [4] Wang Z B, Zheng J, Zhao B *et al.* Phys. Plasmas, 2005, 12 : 082703
 [5] Zheng J, Wang Z B, Yu C X *et al.* Journal of Physics : Conference Series, 2008, 112 :022040



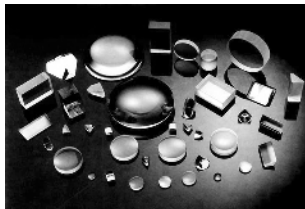
北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询.我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等.



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等.
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜.
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金,及介质反射镜.直径5mm—200mm.
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶.直径5mm—200mm.
- 各种有色玻璃滤光片:规格为直径5mm—200mm.(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片.
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头.

地址 北京市海淀区知春路49号希格玛大厦B座#306室

电话 010-88096218/88096217 传真 010-88096216 网址: www.goldway.com.cn

联系人 陈钢先生 施楠小姐 曾安小姐

E-mail kevinchen@goldway.com.cn shinan@goldway.com.cn zengan@goldway.com.cn