

纳秒激光驱动的数千电子伏特 X 射线背光面源特性

熊俊, 安红海, 贾果, 王伟, 王琛, 王瑞荣, 方智恒, 董佳钦, 雷安乐

中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 数千电子伏特(Multi-keV)量级的 X 射线背光成像是高能密度等离子体物理实验中常用的一种诊断技术。在神光 II 激光装置上,研究了纳秒激光驱动钛 4.7 keV 波段及氯 2.7 keV 波段背光面源的性能。研究表明,氯背光能谱以类 He 线及类 H 线为主,其中 2.7 keV 波段的类 He- α 线最强;在当前神光 II 激光加载能力下,氯背光面源相对强度超过钛背光面源一个量级,因此,可选用氯 He- α 线的 X 光探针进行背光诊断。

关键词 X 射线光学; 背光面源; 等离子体; K 壳层能谱; 氯

中图分类号 O536; O434

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901011

Characteristics of Multi-keV X-Ray Area Backlighting Sources Driven by Nanosecond Laser

Xiong Jun, An Honghai, Jia Guo, Wang Wei, Wang Chen, Wang Ruirong,
Fang Zhiheng, Dong Jiaqin, Lei Anle

Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract Multi-keV X-rays are used as backlighting sources of the radiography to diagnose plasmas in high energy density physics (HEDP) experiments. We study the characteristics of Ti-4.7 keV and Cl-2.7 keV X-rays driven by nanosecond laser at the SG-II laser facility. The results show that the X-rays from Cl plasma are primarily He-like and H-like line radiation, with 2.7 keV He- α line on the strongest line emission. In addition, the relative intensity of Cl X-rays is more than an order of magnitude compared to that of Ti X-rays under the current SG-II laser conditions. Therefore, the Cl X-rays can be used as the backlighting diagnosis.

Key words X-ray optics; area backlighting sources; plasma; K-shell spectrum; chlorine

OCIS codes 340.7480; 300.6560; 280.5395

1 引 言

在惯性约束聚变实验研究中,数千电子伏特(Multi-keV)量级的 X 射线背光探针技术^[1-2]可有效地诊断高温高密度区域等离子体的状态参数。该技术作为一种常规诊断手段,广泛应用于观测高能量密度物理实验研究中的等离子体不稳定性发展,点火靶丸压缩过程中的热斑区密度分布和演化过程,以及等离子体射流等^[3-4]。

在高能量密度物理实验环境下获得的 Multi-keV 波段 X 射线主要是通过强激光驱动产生高温等离子体来实现。激光能量通过逆韧致吸收沉积在等离子体冕区,冕区等离子体温度升高,离子外层电子经碰撞电离,形成高度离化的离子-电子分布。高度电离的离子再经过电子的碰撞激发-退激发过程,产生强带电状态的离子束缚-束缚跃迁线谱及自由-束缚连续谱。Multi-keV 波段的 X 射线中主要的贡献来自于离子的特征跃迁线谱^[5],因此 Multi-keV 波段 X 射线源的单色性较好,可作为优质的主动式探针光源。

在神光系列的高功率激光装置上,国内多家研究机构开展了多轮次的 Multi-keV 波段 X 射线源的实验研究^[6-8],成功建立了钛的 4.7 keV 波段背光探针诊断能力,应用于多类实验诊断^[9-11]。随着物理实验的精密

收稿日期: 2017-04-26; **收到修改稿日期:** 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475146)

作者简介: 熊俊(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事强激光驱动辐射源实验方面的研究。

E-mail: 51854037@qq.com

化发展,常用的针孔辅助点投影方法^[12]的空间分辨能力受限于针孔尺寸,难以应用于更高精度的实验诊断当中。KB(Kirkpatrick-Baez)掠入射成像技术^[13]具有集光效率高、空间分辨能力强(小于 5 μm)等优势,逐渐成为 X 射线背光成像诊断技术研究的热点。

然而 KB 成像的诊断视场大小取决于面源尺寸,对驱动激光能量的需求远大于针孔辅助点投影方案。如果要在神光 II 装置上建立 KB 成像诊断系统,首先需要判断神光 II 当前的驱动能力能否满足诊断应用需求。本文将神光 II 纳秒激光实测输出数据代入到辐射流体力学程序,通过对钛背光面源的数值模拟,对神光 II 装置上的纳秒级背光面源辐射输出能力进行初步评估,并根据评估结果,在神光 II 装置上开展了纳秒激光驱动钛、氯面光源的实验研究,对不同材料面源背光的性能进行分析和比对,为神光 II 装置上开展高能量密度物理实验诊断技术方案的设计提供参考和数据支撑。

2 模拟预估分析

图 1 为 KB 成像原理示意图,驱动激光通过列阵透镜聚焦后辐照平面箔靶,形成 500~1000 μm 的面源背光,待测样品位于背光面源与 KB 成像镜之间,在接收面处可获得正立放大的诊断图像。由图可知,KB 成像的诊断视场大小取决于面源尺寸,因此能否在神光 II 装置上实现高亮度、大面源的 X 射线辐射源输出是首要考虑的问题。

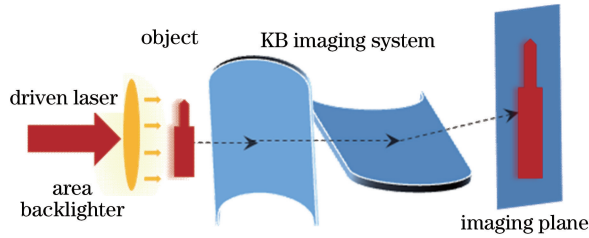


图 1 KB 显微成像原理示意图

Fig. 1 Schematic of Kirkpatrick-Baez (KB) microscopic imaging principle

利用二维非平衡辐射流体力学程序对第 9 路激光驱动钛背光面源实验进行模拟分析。模拟条件:驱动激光为神光 II 第 9 路,能量约 2000 J,倍频 2ω ,脉冲波形为脉宽 $\tau=2.2$ ns 方波,驱动激光入射方向与靶面法向夹角为 20° ,焦斑为 $600 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 。

模拟结果见图 2-4。图 2 为不同发次条件下 K_α 辐射强度 $E_t^{X\text{-ray}}$ 随时间 t 变化趋势。图 3 为不同时刻下 301 发次的局域 K_α 辐射发光辐射强度 W_K 二维分布图。图 4 则为 301 发次的激光能量沉积 W_L 及电子温度 T_e 的二维空间分布。由于驱动功率不高(约 $1.3 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$),电子温度仅达到 2 keV,其转换效率为 2.7%~3.6%。从图中可知,激光驱动功率越大,K 壳层线辐射越强。而总 X 光辐射并不弱,但 K_α 线辐射(特指 K 壳层的类 He 离子的主量子数 $k=2 \rightarrow 1$ 跃迁谱线)仅占总 X 光辐射的 7.2%(301 发为例)。

从图 2 可见, K_α 辐射强度随时间的推移而增大,主要原因是发光区域在逐步增大(见图 3)。主要发光区

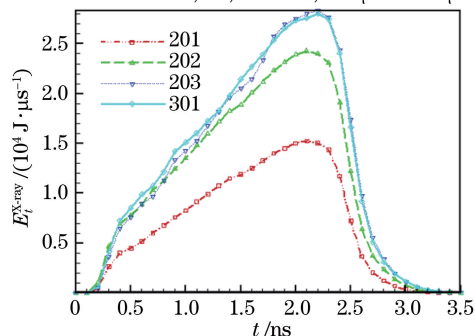


图 2 K_α 线辐射时间微分谱

Fig. 2 Temporal histories for K_α radiation

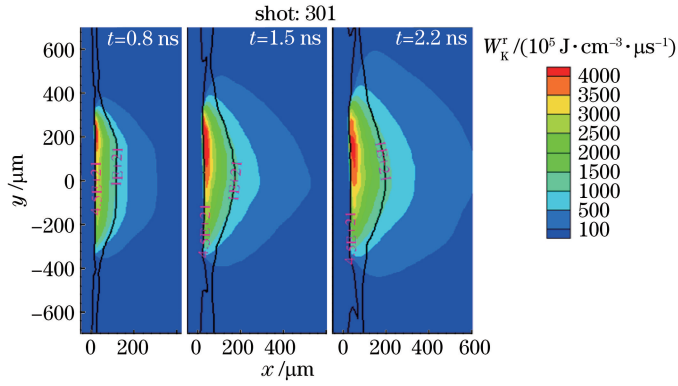


图 3 几个时刻的实验 K_{α} 线发光空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of K_{α} radiation in different time

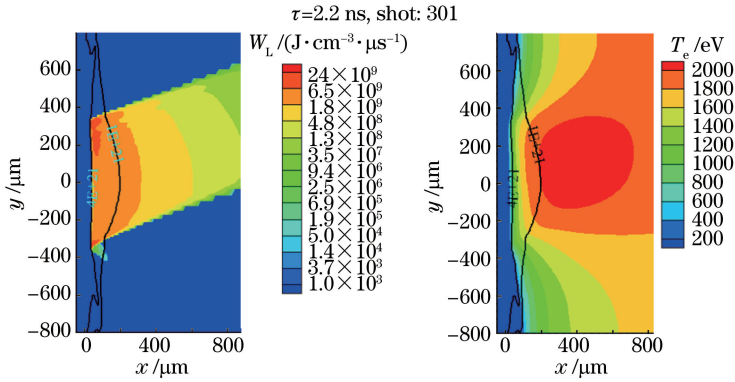


图 4 实验激光能量沉积和电子温度分布

Fig. 4 Laser energy deposition and profile of electron temperature

位于高密度区 ($N_e > 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)。当激光驱动结束后,等离子体冷却, K_{α} 线辐射强度快速下降,虽然电离到类 He 态的离子数占优,但是因为等离子体温度偏低,电子碰撞不能有效地把离子激发到上能级, K 壳层的线辐射发光效率被大幅度削弱。总的说来,钛的 X 射线背光面源并没有工作在理想状态。结合纳秒激光驱动钛靶的实验数据可知:目前神光 II 驱动激光功率密度,初步估计难以实现纳秒级钛背光面源的优化输出。在无法提高激光能量和功率密度的情况下,尝试采用核电荷数更低的氯作背光靶^[14-15],探索发展更为适用的探针光源。

3 实验方案

实验在神光 II 激光装置上进行,第 9 路脉宽 2 ns,三倍频,总能量 1000 J 的方波脉冲经 $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ 的列阵透镜聚焦后,沿靶室正东方向的斜 45° 入射到靶室中心,与靶面成 45° 夹角,驱动激光功率密度 P 控制在 $1 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围内。实验靶材料为聚氯乙烯(无色透明状薄膜,俗称 PVC,化学式 $(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$)和钛。

实验基本光路排布及诊断设备的安装如图 5 所示。球形靶室的正东方向架设 KB 成像系统,成像放大倍数约 10 倍,利用 X 射线 CCD 作为图像记录元件(CCD 前放置 $20 \mu\text{m}$ 钛和 $25 \mu\text{m}$ 铍作为滤片),获得正向背光面源的尺寸及强度空间分布信息。在球形靶室的东偏北 30° 、东偏南 15° 位置分别各安装一套弯晶谱仪,对 $2 \sim 6 \text{ keV}$ 波段范围内的 X 射线能谱分布进行诊断。靶室正南偏东 $3^\circ \sim 4^\circ$ 位置安装一台针孔相机(10 倍放大),可测量背光等离子体的纵向膨胀尺度。针孔相机及弯晶谱仪的记录底片均采用可重复使用的 IP 成像板(FujiFilm BAS-SR2025)^[16]。

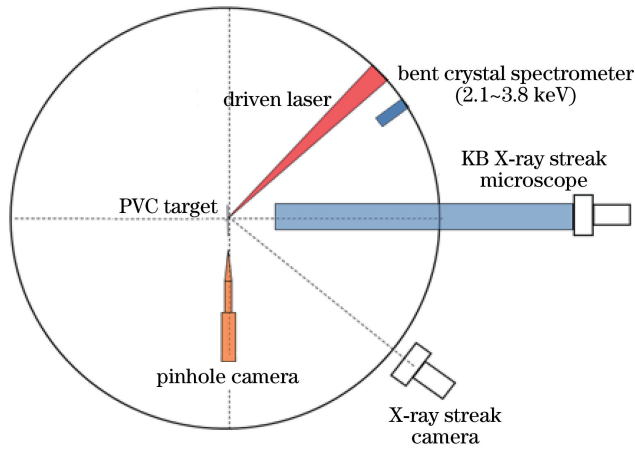


图 5 实验排布示意图

Fig. 5 Setup of experiment

4 实验结果与分析

4.1 氯等离子体能谱分布

图 6 为高谱分辨能力($\lambda/\Delta\lambda > 600$)的椭圆弯晶谱仪拍摄到的 2~4 keV 波段范围内,纳秒激光驱动聚氯乙烯所产生的氯等离子体 X 射线辐射线谱分布。由以往的实验数据和数值模拟^[5,17-18]可知,Multi-keV 波段的 X 射线主要在临界密度面以下冕区产生。高温冕区内的电子被激光电磁场加速,通过碰撞电离,将等离子体内离子的外层电子剥离,由于该区域电子温度较高,电离态很少(主要为类氦、类氢、含有少量的类锂离子),背景连续谱相当低。且由于高温低密度的缘故,不透明效应达到最小^[19],故而其发射的 X 光为 K 壳层特征线谱。

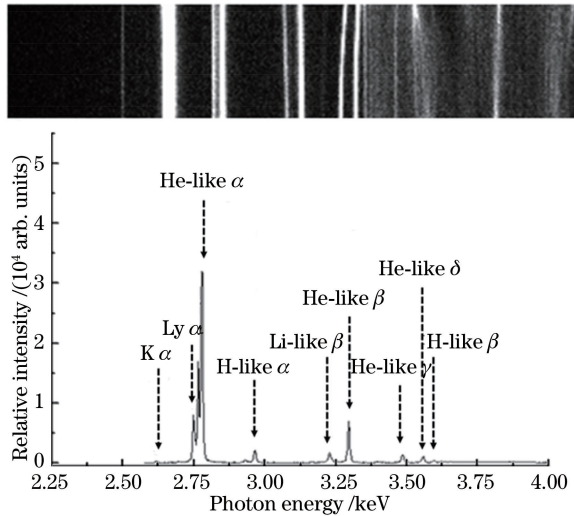


图 6 氯的 K 壳层能谱分布

Fig. 6 Chlorinous K-shell spectrum

该能段的 X 射线谱主要由 K 壳层的类 He、类 H 离子的共振跃迁线谱组成。其中类 He 离子所产生的 $1s2p^1P_1$ 和 3P_1 跃到 $1s^21S_0$ 的共振跃迁及互组跃迁线为该波段能谱的主发射线。同时主量子数 $k=3$ 到 $k=1$ 的类 Li、类 He、类 H 离子的共振跃迁线在谱仪记录底片上也清晰可见。

该发次的激光驱动能量约 210 J,功率密度约为 $0.74 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由图 6 可知, $2p1s$ 到 $1s^2$ 的类 He 线最为突出,而类 Li 线的强度则低了许多,仅为类 He 线的 15%,而 $2p$ 到 $1s$ 的类 H- α 谱线更低,仅为类 He- α 线的 5%左右。查阅离子束缚能数据可知,氯离子中类 Li 离子的电离能为 0.81 keV,而类 He 离子的

电离能为 3.65 keV,根据氯等离子体能谱分析看来,等离子体中类 He 离子占据主导地位,而类 Li 离子、类 H 离子数目较少,按照等离子体内电子近似为麦克斯韦分布估算,电子温度应介于 0.5~0.8 keV 之间。

4.2 Multi-keV 波段 X 光辐射相对强度

图 7(a)为 KB 成像系统所拍摄的等离子体辐射区域的正向图。1 ns 方波脉冲经过 450 $\mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ 的阵列透镜,以 45°斜入射到 33.5 μm 的聚氯乙烯靶。由于第 9 路激光从斜上方 45°入射到靶面,因此等离子体辐射区域近似一个长方形,宽约 400~450 μm ,长约 640~680 μm ,正向光场的空间分布较为均匀。侧向针孔相机测量结果如图 7(b)所示,主发射区等离子体向外膨胀近似呈现“馒头状”,沿靶面向外膨胀约 120 μm 。

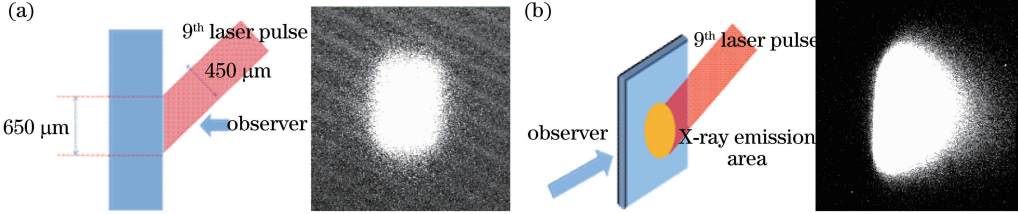


图 7 不同方向的 X 射线辐射区域图像。(a) X 射线辐射区域(正向-KB);

(b) X 射线辐射区域(侧向-针孔相机)

Fig. 7 Images of X-ray emission in different directions. (a) X-ray emission area (forward-KB);

(b) X-ray emission area (side-pinhole camera)

通过 KB 成像获取了不同打靶条件下所产生的 X 射线源的正向辐射强度分布图像。通过 CCD 计数平均值来比较不同发次、不同材料靶所产生的 X 射线辐射强度的相对差异,分析不同条件下的背光面源所适用的诊断环境。表 1 为 5 发不同驱动条件下所产生的 X 射线源相对辐射强度数据(根据入射激光能量进行了换算)。实验数据表明,单位能量的相对辐射强度随着驱动激光功率的增加而增加;Ti 背光 X 射线相对辐射强度(单位能量下)要比同驱动条件下的氯背光相对强度弱一个量级以上;当功率密度从 0.74×10^{14} 增加到 $2.57 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,氯背光相对强度极大地增强,但当功率密度增加到 $1.7 \times 10^{15} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,其增长幅度变缓。可能的原因是随着电子温度的升高,越来越多的类 He 离子被剥离到类 H 态,类 H- α 谱线显著增加,伴随而来的其他更高能段的谱线所占份额也随之增加。这必然导致 He 离子密度下降,He 线谱辐射所占份额减少,因此 CCD 采集到的 2~4 keV 波段的 X 射线光强度增加幅度逐渐变缓,其中还包括了复合辐射以及超热电子产生的韧致辐射,因此功率密度“过高”,对 X 射线光源的单色性有着不利的影响。通过上述分析表明在神光 II 现有驱动能力条件下,可以找到氯的类 He- α 线辐射的“最佳工作区”,能够通过进一步的实验研究和理论模拟,设计满足诊断需求的准单色背光探针。

表 1 5 发实验的单位能量下相对强度估算数据

Table 1 Five shot experiment data about relative intensity per laser energy

Shot number	Target	$P / (10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	Image grayscale in CCD	Transmittance /%	Relative intensity (arb. units)
0209006	CH ₂ CHCl	0.74	890	1.8	233.8
0209007	CH ₂ CHCl	2.57	9200	1.8	657.8
0210011	CH ₂ CHCl	17	16700	1.8	1010.6
1104001	Ti	6.86	4400	83	38.5
1104002	Ti	4.84	2600	83	31.9

5 结 论

主要讨论了纳秒激光驱动 2~4 keV 波段的氯 X 射线背光面源强度及能谱等特性参数。分析表明: 1)从理论预估和实验验证可以明确,目前神光 II 的驱动能力可以获得理想的 4.7 keV 波段纳秒级背光面源;在接近的激光驱动能力下,氯背光面源强度要超过钛背光面源强度一个量级。2)对于氯背光,其 X 射线辐射的主发射线为 K 壳层的类 He- α 线,光子能量为 2.77 keV。当驱动功率高于 $2 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,类 H 离子数目开始增加;当功率密度超过 $10^{15} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,离子过电离带来的复合辐射以及非线性效应产生的超热电子韧致辐射连续谱,会对背光面源单色性造成不利的影响。3)根据对不同功率密度条件下,氯材料的 X

射线能谱分析结果表明:在神光 II 现有驱动能力条件下,设计满足实验诊断需求的 2.7 keV 波段单色背光面源探针具有可行性。后续研究将在此基础上,进一步通过理论分析和数值模拟,结合实验验证的方式寻找到氦的类 He- α 线辐射的“最理想工作区”,获得高效的准单色面源背光探针。

致谢 感谢神光 II 装置靶场组、运行组的大力协助;感谢北京计算数学及应用物理研究所的郑无敌老师对论文理论模拟工作的指导。

参 考 文 献

- [1] Sawada H, Fujioka S, Hosoda T, *et al.* Development of 4.5 keV monochromatic X-ray radiography using the high-energy, picosecond LFEX laser[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 717(1): 012112.
- [2] Girard F. Review of laser produced multi-keV X-ray sources from metallic foils, cylinders with liner, and low density aerogels[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(4): 040501.
- [3] Glendinning S G, Colvin J, Haan S, *et al.* Ablation front Rayleigh-Taylor growth experiments in spherically convergent geometry[J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(5): 2033-2039.
- [4] Goldman S R, Caldwell S E, Wilke M D, *et al.* Shock structuring due to fabrication joints in targets[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(8): 3327-3336.
- [5] Matthews D L, Campbell E M, Ceglio N M, *et al.* Characterization of laser produced plasma X-ray sources for use in X-ray radiography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(8): 4260-4268.
- [6] Hu G Y, Liu S Y, Zheng J, *et al.* Efficient K-shell X-ray sources produced with titanium foils[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14(3): 033103.
- [7] Tu S Y, Hu G Y, Miao W Y, *et al.* Efficient multi-keV X-ray source generated by nanosecond laser pulse irradiated multi-layer thin foils target[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(4): 043107.
- [8] Xiong J, Dong J Q, Jia G, *et al.* Optimization of 4.7 keV X-ray titanium sources driven by 100-ps laser pulse[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(6): 065201.
- [9] Fang Zhiheng, Wang Wei, Jia Guo, *et al.* Imprinting and consequent Rayleigh-Taylor growth[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7057-7061.
方智恒, 王伟, 贾果, 等. 高温烧蚀初始印记及其瑞利-泰勒不稳定性发展的研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7057-7061.
- [10] Jia G, Xiong J, Dong J Q, *et al.* Directly driven Rayleigh-Taylor instability of modulated CH targets[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(9): 396-399.
- [11] Wang R R, Chen W M, Wang W, *et al.* Laser-produced plasma helium-like titanium K α X-ray source and its application to Rayleigh-Taylor instability study[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(7): 362-368.
- [12] Dong Jiaqin, Fu Sizu, Wang Wei, *et al.* Applications of point-projection radiography to high energy density physics experiments[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2010, 22(10): 2345-2348.
董佳钦, 傅思祖, 王伟, 等. X射线点投影技术在高能量密度物理相关实验中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(10): 2345-2348.
- [13] Yi S Z, Mu B Z, Wang X, *et al.* Multi-energy four-channel Kirkpatrick-Baez microscope for X-ray imaging diagnostics at the Shenguang-II laser facility[J]. *Chinese Optics letters*, 2014, 12(9): 093401.
- [14] Kai T, Nakazaki S, Kawamura T, *et al.* Integral cross section with magnetic sublevels and polarization degree of He-like Cl ions by electron impact[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(1): 012703.
- [15] Limpouch J, Renner O, Borisenko N G, *et al.* Applications of low-density foams for X-ray source studies and laser beam smoothing[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112(4): 042056.
- [16] Izumi N, Snavely R, Gregori G, *et al.* Application of imaging plates to X-ray imaging and spectroscopy in laser plasma experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10E325.
- [17] Riley D, Woolsey N C, McSherry D, *et al.* He-like X-ray line emission from laser irradiated sources[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2002, 11(4): 484-491.
- [18] Workman J, Lanier N E, Kyrala G A. Analysis of Ti K-shell emission produced from solid targets using nanosecond pulses on the TRIDENT laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 2165-2168.
- [19] Griem H R. *Principles of plasma spectroscopy*[M]. London: Cambridge University Press, 1997.