

CNIC-01930

CAEP-0208

中俄联合 Z-Pinch 实验 C-300 软 X 射线 辐射功率测量

宁家敏 蒋世伦 徐荣昆 郭 存

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

介绍了软 X 射线功率测量系统用在中俄联合 Z-Pinch 实验的 C-300 装置上, 测量软 X 射线辐射功率和能量, 研究辐射功率随时间变化的关系, 并为其他测试系统提供时间关联信号。实验中丝阵靶分为单层钨丝阵、铝丝阵和双层铝丝阵, 实验结果得到了各种丝阵靶的软 X 射线辐射波形、辐射功率和能量。其中, 双层丝阵的辐射峰分离普遍比单层低, X 光辐射的轴向同步性对辐射前沿有明显影响, 较快的脉冲前沿可能反映了等离子体内爆均匀性较好, 通常产生较高的辐射功率。辐射脉冲宽度与功率没有直接的关系。丝阵负载的微观结构对辐射功率有重要影响, 增加丝间隙的均匀性, 对改善聚心的同时性, 提高功率有明显作用。

关键词: Z-Pinch 软 X 射线功率测量系统 闪烁体 C-300

The C-300 Soft X-ray Power Measurement on Sino-Russian Joint Z-Pinch Experiment

(In Chinese)

NING Jiamin JIANG Shilun XU Rongkun GUO Cun
(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

The measurement system for soft X-ray radiation power was introduced which applied in Sino-Russia joint Z-pinch experiments on C-300. The system measured the soft X-ray radiation power and energy, investigated relation between radiation power and time, and provided the time-relating signals. The type of experimental wire array loads were tungsten wire array single layer, aluminum wire array and nested wire array, and obtained the radiation wave, power and energy. Radiation peak of double wire array generally lower than that of single wire, radial radiation synchronization didn't obviously affected radiation front, fast pulse front may reflect better homogenous of plasma inner explosive which generally produced higher radiation power. There are no direct relationship between wide and power of radiation pulse. The micro-structures of wire array load were a very important factor for radiation power. Increasing the homogenous of wire array gap could optimize radiation synchronization and obviously increased the radiation power.

Key words: Z-Pinch, Soft X-ray power meter system, Scintillation, C-300

引言

快过程 Z 箍缩(Z-Pinch)作为一种受控热核聚变驱动的新途径,近年来得到了快速发展。在强电流的洛伦兹力作用下负载沿电流的径向压缩形成高温高密度等离子体,电磁能量转化成等离子体的动能。在等离子体的轴对称中心附近等离子体被止滞(Stagnation),等离子体的动能和电磁场的能量转化成等离子体的内能,同时伴随强烈的 X 射线辐射,X 射线辐射的能量主要集中在软 X 射线能区。

在 Z-Pinch 研究中,X 射线的产额、辐射功率、能谱等反映了等离子体的内爆状态和负载与装置的匹配状况。研究发现等离子体具有高的内爆速度和均匀压缩时,X 射线的产额和辐射功率较高、能谱也较硬;负载与装置具有良好的匹配性时 X 射线的产额和辐射功率也高。通过测试内爆过程中 X 射线的产额和辐射功率,可以研究等离子体的压缩过程,诊断等离子体压缩的均匀性;评估负载与装置的匹配质量,优化负载设计;为校验理论计算数值模拟程序提供参数。

我们从事 Z-Pinch 方面的物理诊断研究已经多年,专门研制软 X 射线功率谱仪诊断 Z-Pinch 的 X 射线辐射功率、产额。采用限束狭缝、闪烁体、光电管、高压电源、示波器组成的软 X 射线功率谱仪,在西安“强光一号”装置上进行了系统的线性输出研究,通过调节狭缝的宽度和狭缝到闪烁体的距离增加 X 光在闪烁体上的照射面积,从而改变 X 光在闪烁体上的功率密度,系统在 0.5~3 MA 的不同装置上测量软 X 射线辐射功率时能线性输出。这次中俄联合 C-300 实验上用这套系统测量了软 X 射线辐射功率波形。

1 实验方法

1.1 实验原理

软 X 射线辐射参数探测系统,由限束狭缝、闪烁体、光电管、高压电源、示波器组成,测量原理是,Z-pinch 等离子体辐射的 X 射线经狭缝限束后照射闪烁体,在闪烁体中,X 射线与闪烁体物质作用发生光电效应产生光电子,光电子在闪烁体内行进过程中与闪烁体原子发生库仑作用逐渐将能量传递给(闪烁体原子的)外层电子,使原子激发,原子退激后辐射的荧光被光电探测器接收转换成电信号,电信号经电缆传输后最终由示波器记录(如图 1 所示)。

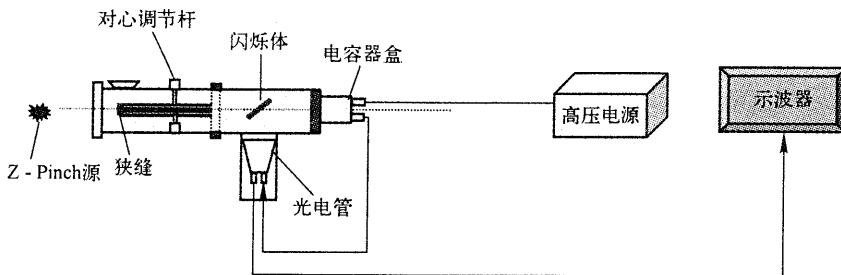


图 1 软 X 射线辐射参数探测系统示意图

1.2 实验安排及测量系统参数

C-300 装置主体由八个竖直放置的电流模块构成,测试通道分布在模块间狭小空间,正对记录间的远端通道为 8 号通道,须兼用于系统对心(见图 2)。C-300 上用两套软 X 射线辐射参数探测系统,一套安装在水平方向,一套安装在顶部窗口,与垂直方向的夹角为 23° 。

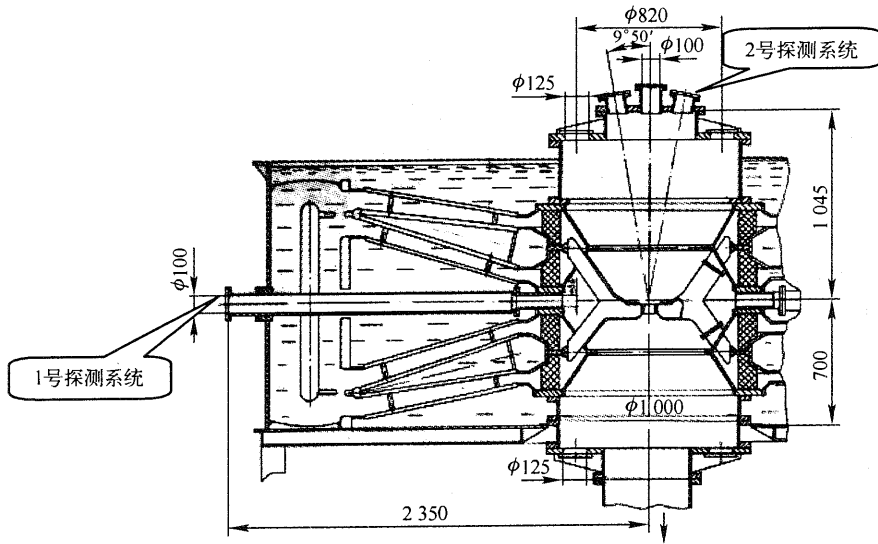


图 2 靶室侧视图

在 C-300 装置上用两套软 X 射线辐射参数探测系统测量 X 光辐射功率、能量。图 3 为径向 1 号探测系统位置示意图,图 4 为轴向 2 号探测系统位置示意图。表 1 列出了实验中使用的狭缝、闪烁体、光电管的编号。

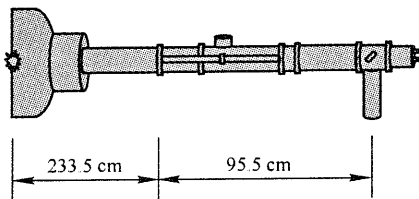


图 3 径向 1 号软 X 射线辐射参数探测系统位置图

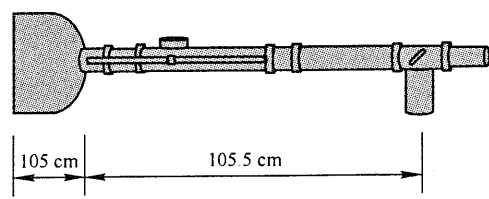


图 4 轴向 2 号软 X 射线辐射参数探测系统位置图

表 1 系统参数

功率谱仪编号	丝阵类型	狭缝宽度/mm	闪烁体	光电管
1(径向)	全部负载	1.300	ST401-02	2 037
2(轴向)	全部负载	2.000	ST401-05	2 036

2 实验内容

C-300 装置的实验负载采用 $\phi 15 \mu\text{m}$ 铝/铝镁和 $\phi 5 \mu\text{m}$ 钨丝制作,细丝数量分别设计为 72 根和 90 根,负载质量和 Angara-5-1 装置的设计质量一致,以利于实验结果的对比分析。理论计算和实验测量等离子体内爆速度均接近 $2 \times 10^7 \text{ cm/s}$,等离子体温度约为 240 eV,可以开展与铝镁 K 线辐射相关的物理研究。

丝阵负载设计成双层结构对提高等离子体内爆品质的效果十分明显,是增强 Z-Pinch X 光辐射功率的重要措施,但内层丝阵与外层等离子体的作用方式还不清楚,妨碍物理学家建立正确的数学模型来预测双层丝阵的内爆辐射行为。设计铝镁材料的双层丝阵负载,通过比较铝、镁特征谱线的辐射图像,可以分析内外层丝阵材料的分布特征,理解内层丝阵在内爆过程中的作用。该项工作是 C-300 联合实验的研究重点。

为了比较分析驱动装置差异给等离子体内爆辐射带来的变化,我们还采用与 Angara-5-1 实验相同的单层钨丝阵开展实验,研究辐射功率、功率空间分布、辐射能谱与图像等特征量。

三十三发正式实验的负载参数列于表 2。

表 2 C-300 实验负载参数

负载类型	丝材料	丝阵直径/mm	丝数量	发次
单层丝阵	W $\phi 5 \mu\text{m}$	12	90	10
	W $\phi 6 \mu\text{m}$	12	76	2
双层丝阵	Al/Al : Mg $\phi 15/16 \mu\text{m}$	12 : 6	48 : 24	8
	Al : Mg/ Al $\phi 16/15 \mu\text{m}$	12 : 6	48 : 24	4
双层丝阵	Al/Al $\phi 15 \mu\text{m}$	12 : 6	48 : 24	4
	Al : Mg $\phi 15 \mu\text{m}$	12	72	4

3 测量结果

3.1 数据处理方法

根据在北京同步辐射装置软 X 射线光站对闪烁体灵敏度的标定和光电倍增管相对光电管增益的测量结果,软 X 射线功率测量系统灵敏度计算公式为:

$$\text{测量系统灵敏度} = \frac{S_{\text{PMT}} \times \eta}{N} \quad (1)$$

式中: S_{PMT} ——同步辐射标定系统灵敏度, C/keV;

η ——标定系统闪烁体到探测器的距离 L_1 与测量系统闪烁体到探测器的距离 L_2 的比例因子 L_1^2/L_2^2 ;

N ——光电倍增管相对光电管的增益。

由计算得到实验所需光电管的灵敏度(见表 3)。

表 3 系统灵敏度

GD40 编号	闪烁体	GD40 增益	$S_{PMT}/(C/J)$	系统灵敏度 $S_x/(C/J)$
2036	ST401-05	2.48×10^5	1.37	2.25×10^{-6}
2035	ST401-02	2.65×10^5	1.58	2.43×10^{-6}
2037	ST401-02	3.34×10^5	1.58	1.92×10^{-6}

根据表 3,我们就可以根据所测图形和数据来计算 X 光辐射功率和 X 光辐射能量。

X 光辐射功率为:

$$W_x = I_{\text{信}} \times \frac{4\pi L_1^2}{S_{\text{孔}}} \times \frac{1}{S_x} \times \frac{4\pi L_2^2}{\pi r^2} \quad (2)$$

X 光辐射能量为:

$$E_x = W_x \times t_{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

或:

$$E_x = \frac{W_x}{V_{\text{信}}} \times S_{\text{峰}} \quad (4)$$

式中: W_x ——X 光辐射功率;

$S_{\text{孔}}$ ——针孔面积, cm^2 ;

L_1 ——光源与针孔之间的距离, cm ;

L_2 ——闪烁体与光电管之间的距离, cm ;

r ——光电管灵敏区半径, cm ;

$t_{\frac{1}{2}}$ ——X 光输出波形时间半宽度, ns ;

E_x ——X 光辐射输出能量, keV ;

S_x ——光电管灵敏度, C/keV ;

$S_{\text{峰}}$ ——X 光峰的面积, $\text{V} \cdot \text{ns}$;

$V_{\text{信}}$ ——X 光的峰值, V 。

3.2 实验结果

3.2.1 单层钨丝阵

单层钨丝阵以 0807-1 和 0810-2 发为例。负载是 90 根单层钨丝阵,测量结果如图 5、图 6 所示,实验结果列于表 4。从实验结果看 C-300 的负载电流和 X 射线辐射功率、能量都较低,辐射脉宽,辐射前沿更慢。

3.2.2 铝丝阵

铝丝阵以单层铝丝阵 0811-2 和双层铝丝阵 0815-1,0803-2,0809-2 发为例。负载都是 72 根铝丝阵,测量结果见图 7,8,9 和 10,实验结果列于表 5 和 6。

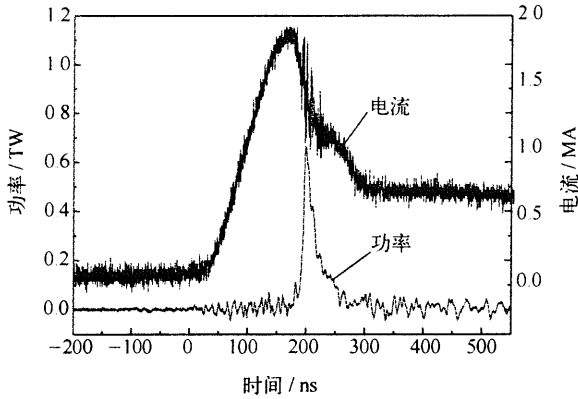


图5 Shot 0807-1/90 根钨丝典型单层钨丝阵 X 光辐射特性

0807-1(单层钨丝阵):X 光辐射功率 0.675 TW;脉宽 19.59 ns;辐射总能量 20.9 kJ;电流 1.90 MA

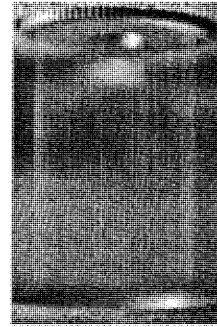
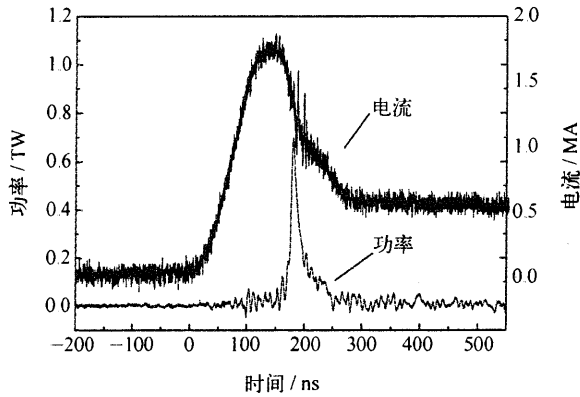


图6 Shot 0810-2/90 根钨丝典型单层钨丝阵 X 光辐射特性

0810-2(单层钨丝阵):X 光辐射功率 0.70 TW;脉宽 13.47 ns;辐射总能量 19.9 kJ;电流 1.80 MA

表 4 单层钨丝阵实验测量结果

发次	电流/MA	辐射峰值 功率/TW	辐射 能量/kJ	辐射波形 脉宽/ns	辐射波形 前沿/ns	备注
0801-1	2.16	0.65	36.6	5.33	9.88	
0807-1	1.90	0.67	20.9	19.6	9.03	
0807-2	1.90	0.56	21.1	21.8	10.3	中方负载
0808-2	1.55	0.42	14.7	19.4	11.3	
0810-2	1.80	0.70	19.9	13.47	9.85	
0811-1	1.80	0.38	16.9	25.67	27.08	
0814-1	1.60	0.39	17.6	21.07	20.56	俄方负载

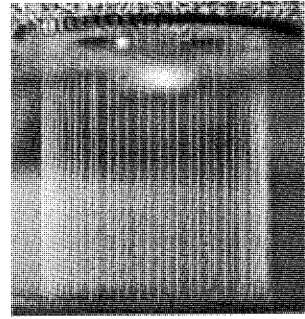
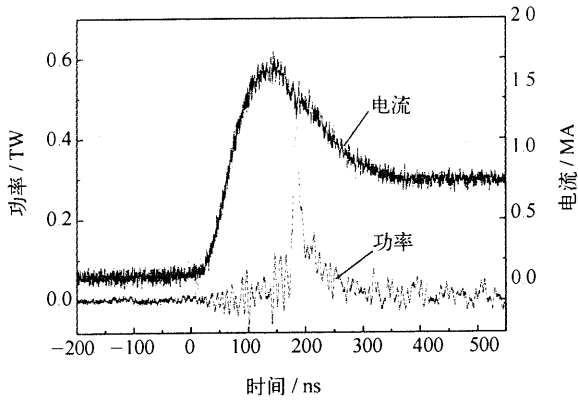


图 7 Shot 0811-2/72 根铝丝典型单层铝丝阵 X 光辐射特性

0811-2[单层铝丝阵+Mg(10%)]:X光辐射功率 0.44 TW;脉宽 16.25 ns;辐射总能量 15.9 kJ;电流 1.70 MA

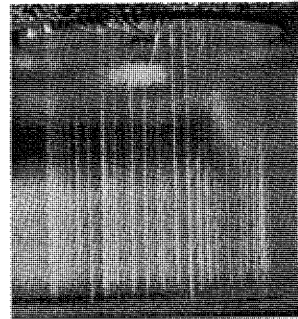
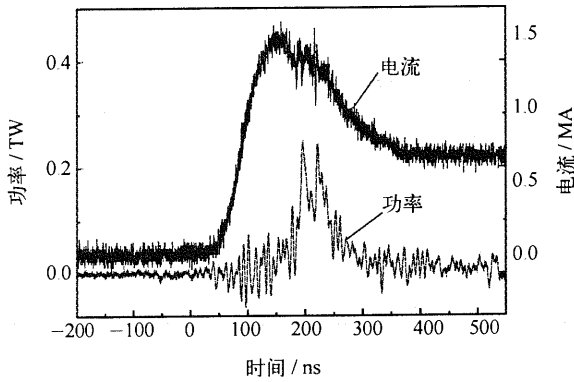


图 8 Shot 0815-1/48+24 根铝丝典型双层铝丝阵 X 光辐射特性

0815-1(双层铝丝阵):X光辐射功率 0.25 TW;脉宽 13.88 ns;辐射总能量 16.3 kJ;电流 1.54 MA

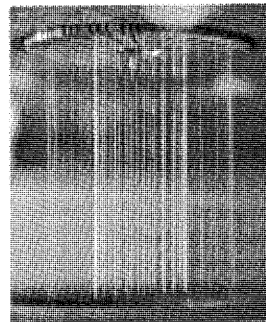
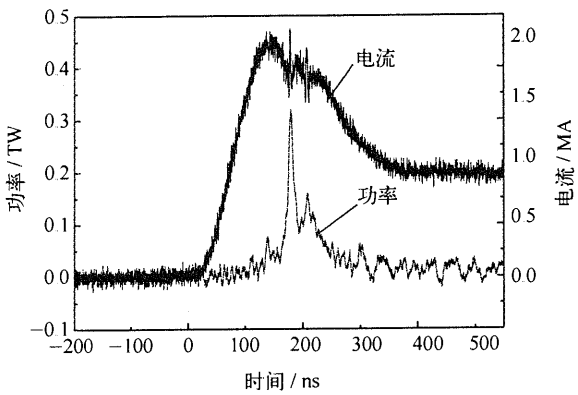


图 9 Shot 0803-2/48+24 根铝丝典型双层铝丝阵 X 光辐射特性

0803-2[双层铝丝阵,外层加 Mg(10%)]:X光辐射功率 0.32 TW;脉宽 12.3 ns;辐射总能量 16.0 kJ;电流 2.05 MA

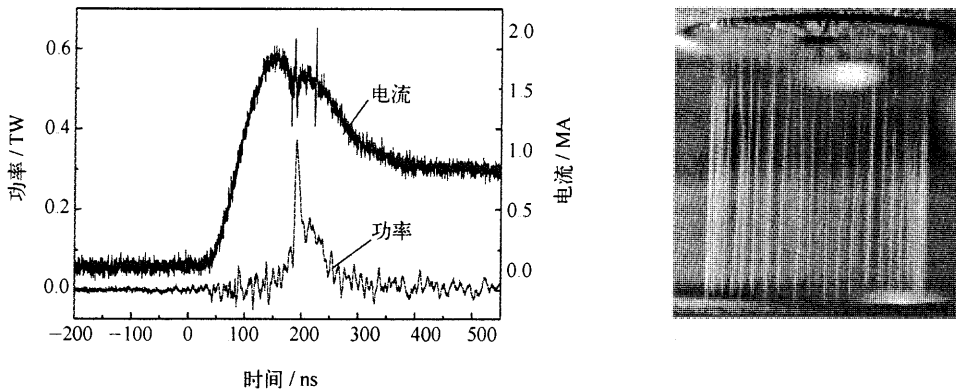


图 10 Shot 0809-2/48+24 根铝丝典型双层铝丝阵 X 光辐射特性
0809-2[双层铝丝阵,内层加 Mg(10%)];X 光辐射功率 0.37 TW;脉宽 12.04 ns;
辐射总能量 15.4 kJ;电流 1.90 MA

表 5 单层铝丝阵实验测量结果

发次	电流/MA	辐射峰值功率/TW	辐射能量/kJ	辐射波形脉宽/ns	备注
0802-2	1.70	0.45	19.6	21.7	
0808-1	1.90	0.49	21.5	17.9	Al/15 μm/
0808-3	1.70	0.38	18.1	19.8	N72/D12H15
0811-2	1.70	0.44	15.9	16.3	

表 6 双层铝丝阵实验测量结果

发次	电流/MA	辐射峰值功率/TW	辐射能量/kJ	辐射波形脉宽/ns	备注
0801-2	2.20	0.05	4.2	24.30	
0810-1	1.90	0.42	18.1	11.02	
0815-1	1.54	0.25	16.3	13.88	
0815-3	2.23	0.32	12.9	13.71	
0803-1	1.60	0.14	12.7	27.30	Al/15 μm/
0803-2	2.05	0.32	16.0	12.30	N48+24/D12H15
0804-2	1.60	0.20	10.2	14.70	
0815-2	1.70	0.37	17.8	13.78	
0809-1	1.80	0.46	19.3	8.40	

双层铝丝阵(图 8,9,10)由于外层丝阵内爆比内层早,在 X 射线辐射波形上出现了双辐射峰现象。铝丝阵掺镁的负载,基本不影响 X 射线的辐射功率和能量。

4 不确定度分析

软 X 射线功率仪系统对软 X 射线功率测量的不确定度由以下几个部分组成:探测器灵

敏度标定产生的标准不确定度(18.9%);狭缝到辐射源距离的标准不确定度(1.0%);探测器到闪烁体的标准不确定度(3.0%);当前示波器信号测量产生的标准不确定度($<1.0\%$)。因此,总软 X 射线功率测量的标准不确定度为 23.9%。

5 结 论

(1) 双层的辐射峰分离普遍比单层低,X 光辐射的轴向同步性对辐射前沿有明显影响,较快的脉冲前沿可能反映了等离子体内爆均匀性较好,通常产生较高的辐射功率。辐射脉冲宽度与功率没有较大的关系。

(2) 丝阵负载的微观结构对辐射功率有重要影响,增加丝间隙的均匀性,对改善聚心的同时性,提高功率有明显作用。

(3) 今后的要求:双层丝阵内爆与传统认识有差异,内外层丝阵的相互作用,对 X 光辐射的贡献需要进一步研究。通过设计含示踪元素的双层铝丝阵,测量时间分辨的特征谱线,可以解释双峰的原因。低密度泡沫与平台高度、前沿时间的相互关系,优化泡沫参数、提高泡沫辐射温度也将是下一步开展动力学黑腔研究的重要内容。

参 考 文 献

- 1 项志遴,俞昌旋. 高温等离子体诊断技术. 上海:上海科学技术出版社,1982
- 2 汲长松. 辐射探测器及其实验技术手册. 北京:原子能出版社,1990
- 3 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术. 北京:科学技术出版社,1994
- 4 杨津基. 高温度高密度磁化等离子体. 北京:科学出版社,2000
- 5 Liberman M A, De Groot J S, Toor A, Spielman R B. 高密度 Z 箍缩等离子体物理学. 孙成纬,译. 北京:国防工业出版社. 2003