

“强光一号”钨丝阵 Z 箍缩等离子体辐射特性研究*

邱爱慈^{1,2)} 蒯 斌^{1,2)} 曾正中²⁾ 王文生²⁾ 邱孟通²⁾ 王亮平²⁾ 丛培天²⁾ 吕 敏²⁾

1) 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

2) 西北核技术研究所, 西安 69 信箱 10 分箱 710024)

(2005 年 9 月 21 日收到, 2005 年 11 月 26 日收到修改稿)

在“强光一号”装置驱动电流峰值 1.4—2.1MA、上升时间 80—100ns 条件下, 研究了不同丝阵直径、丝数及丝直径的钨丝阵负载 Z 箍缩等离子体的辐射特性. 用自行研制的测试系统对等离子体辐射参数进行了诊断. 实验获得的最大 X 射线总能量为 34kJ, 最大峰值功率为 1.28TW. 得到了一些关于钨丝阵 Z 箍缩等离子体辐射特性的规律性认识.

关键词: 钨丝阵, Z 箍缩, 等离子体辐射

PACC: 5255E, 5270L

1. 引 言

Z 箍缩技术的基本原理是利用脉冲高电压大电流放电产生等离子体, 等离子体在大电流自磁场的作用下轴向箍缩, 形成高温高密度等离子体, 产生脉冲 X 射线. 但是由于受到等离子体不稳定性问题的限制, 以及脉冲功率技术水平的制约, 在上世纪 80 年代以前研究工作进展不大; 直到 1980 年以后, 随着人们对内聚爆等离子体磁流体动力学不稳定性深入的研究, 以及高功率脉冲加速器的发展, 才在高功率 Z 箍缩技术研究方面取得重大突破. 例如, 在美国圣地亚国家实验室的 Z 装置上进行的钨丝阵箍缩实验^[1], 在驱动电流为 20MA 的条件下, 得到的 X 射线峰值功率达到 290TW, X 射线能量达到 2MJ. 由高功率 Z 箍缩产生的强脉冲 X 射线, 可以应用于研究材料的软 X 射线的热力学效应和系统电磁脉冲效应, 研究与惯性约束聚变相关的辐射对称化技术, 还可以用于研究材料的不透明度、极端温度和压强下材料的状态方程以及其他高能密度物理的基础问题等^[2]. 由于应用前景广阔, 近年来受到高度重视.

本文在“强光一号”加速器驱动电流峰值 1.4—2.1MA、上升时间 80—100ns 条件下, 实验研究了不同丝阵直径、丝数及丝直径的钨丝阵负载 Z 箍缩等

离子体的辐射特性, 用自行研制的测试系统对不同初始参数的钨丝阵 Z 箍缩等离子体负载的辐射性能进行了诊断, 得到了一些关于钨丝阵 Z 箍缩等离子体辐射特性的规律性认识. 但是由于受到实验条件与诊断设备性能的制约, 我们所开展的研究及取得的结果只是初步的, 还有大量的研究工作有待进一步深入开展.

2. 物理过程和负载设计原则

产生强脉冲软 X 射线辐射的高功率 Z 箍缩技术可以用以下几个物理过程描述: 首先, 由高功率脉冲装置产生的电流脉冲加到处于真空腔中心处的圆柱状负载上(金属丝阵列或喷气负载), 使之迅速加热电离成等离子体, 然后, 在驱动电流产生的磁场作用下, 引起等离子体向内聚爆, 电能转换为粒子动能, 最后, 当等离子体在内爆轴附近停滞时, 动能和电能转换成热能, 并产生 X 射线辐射.

利用高功率 Z 箍缩技术产生高温高密度等离子体时, 等离子体温度的典型值在 0.01—10keV, 因此需要将等离子体圆柱壳层加速至 10^7 cm/s 量级以上. 根据 0 维近似下圆柱壳层的运动方程

$$m\ddot{r} = -\frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi r}; r|_{t=0} = r_0, \dot{r}|_{t=0} = 0 \quad (1)$$

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10035020)资助的课题.

可近似得到下面的关系式：

$$\frac{I_m^2 \tau^2}{m r_0^2} = A, \quad (2)$$

式中 I_m 和 τ 分别是脉冲功率源注入负载的电流幅值和脉冲上升时间, m 和 r_0 分别是圆柱形负载的线质量和初始半径, 单位分别为 g/cm 和 cm , A 是常数, 取值与脉冲驱动源输出电流波形相关, 通常称之为负载的初始参数定标常数, 该关系式对于设计 Z 箍缩负载的初始参数起着重要的作用。

通常, 在采用脉冲形成线技术对等离子体负载馈电时存在下列关系式：

$$2U - IZ = IR_{\text{pl}} + \frac{d(LI)}{dt} + L_0 \frac{dI}{dt}, \quad (3)$$

式中 U 是形成线输出电压波, Z 是形成线阻抗, R_{pl} 是等离子体电阻, L 是与等离子体运动有关的时变电感, L_0 是输出部件的固有电感. 输入等离子体的能量可通过变换上式得

$$\int_0^t (2U - IZ) I dt - \frac{(L + L_0) I^2}{2} = \int_0^t I^2 \left(R_{\text{pl}} + \frac{dL}{dt} \right) dt = E_{\text{pl}}(t). \quad (4)$$

由此可得, 要得到电磁能转换为等离子体动能乃至辐射能的最大转换效率, 必需在电流最大值附



图1 整个装置系统构成框图

实验中脉冲功率源的主要参数: 直线型脉冲变压器初级储能电容器充电电压 40—45kV, 次级输出电流峰值 165—195kA, 1.4Ω 水介质脉冲形成线的充电电压 2.4—2.7MV, 0.75Ω 水介质脉冲压缩线的充电电压 2.4—2.7MV, 传输到二极管上的能量为 80—110kJ, 短路电流峰值 3MA, 实际驱动 Z 箍缩负载电流 1.4—2.1MA, 上升时间 80—100ns.

实验研究中, 采用电阻分压器、电容分压器和两个罗可夫斯基线圈(分别位于阳极直径 450mm 和 100mm) 分别测量二极管的电压和流过负载的电流波形, 测量误差约 10%. 利用 5 个过滤型 X 射线二极管(XRD) 和自行研制的闪烁体加 GD-40 光电管平能谱响应的功率测量系统测量 X 射线时间谱, 探测器的时间响应小于 2ns. 5 个 XRD 的测量范围 50—1100eV, 离源的距离分别为 1.28m, 0.93m, 1.37m,

近实现聚爆压缩. 因此, 等离子体能量可以这样估算, 即

$$E_{\text{pl}} \approx \left(\frac{\Delta L}{2} + \bar{R}_{\text{pl}} \Delta t \right) \bar{I}^2, \quad (5)$$

式中 Δt 是等离子体在最终压缩状态的“生存”时间, \bar{R}_{pl} 是按照“生存”时间取平均的等离子体电阻, $\bar{I}^2 \approx I_m^2$ 是按照“生存”时间取平均的电流平方, ΔL 可由下式计算出：

$$\Delta L (\text{nH}) = 2l (\text{cm}) \ln \left(\frac{r_0}{r_f} \right), \quad (6)$$

式中 l 是等离子体负载长度, r_f 是等离子体负载的最终压缩半径.

3. 实验装置

“强光一号”加速器在开展 Z 箍缩实验研究时, 整个装置由脉冲功率源和 Z 箍缩二极管两部分组成. 其中, 脉冲功率源主要由直线型脉冲变压器, 1.4Ω 水介质脉冲形成线, 水介质单通道自击穿开关, 0.75Ω 水介质脉冲压缩线, 9 通道水介质自击穿开关, 水介质脉冲传输线等部件组成. Z 箍缩二极管由磁绝缘真空同轴线和丝阵负载两部分组成. 整个系统的构成框图参见图 1.

2.05m, 2.06m, 闪烁体加 GD-40 离源的距离为 1.35m. 使用自行研制的镍薄膜量热计测量 X 射线总能量, 探测器离源的距离为 3.0m, 总能量测量的相对标准不确定度小于 20%^[3]. 将电流和 X 射线波形进行时间关联, 可以得到内爆时间, 其定义为电流起始至 X 射线峰值的时间.

4. 钨丝阵 Z 箍缩等离子体辐射特性实验结果

在驱动电流上升时间 ~ 100ns、峰值 1.4—2.1MA 条件下, 进行了不同丝直径(5 μm 和 8 μm) 丝数(10, 12, 24, 32, 48, 54, 64, 78 根), 丝阵直径($\phi 18$, $\phi 12$, $\phi 10$) 钨丝阵 Z 箍缩等离子体辐射特性的实验研究. 主要目的是研究辐射特性与负载、驱动电流参

数的关系,并在强光一号上获得最大的 X 射线总能量和功率输出.

1)进行了固定丝阵直径($\phi 12\text{mm}$)、驱动电流(1.6MA)和上升时间($\sim 100\text{ns}$),改变丝数和线质量

的 Z 箍缩实验,每种状态共进行了 5 次有效的实验,典型的实验结果见表 1 与图 2.从实验结果可知,在丝数为 48 根(丝间距 0.785mm)时,辐射总能量和功率均较大.

表 1 在基本相同电流参数(1.6MA, $\sim 100\text{ns}$)和丝阵直径时,不同丝数的 Z 箍缩辐射特性

炮号	丝数(丝间距/mm)	线质量($\mu\text{g}/\text{cm}$)	内爆时间/ns	辐射总能量/kJ	平均辐射功率/TW	总的能量转换效率/%
04071	24(1.57)	90.9	107	33.7	0.83	12.6
04068	48(0.785)	181.8	141	31.6	1.28	11.8
04066	48(0.785)	181.8	139	33.5		12.5
04075	54(0.698)	204.6	15(1.54MA)	25.6	0.75	9.6
04079	54(0.698)	204.6	145	22.2	0.60	8.3

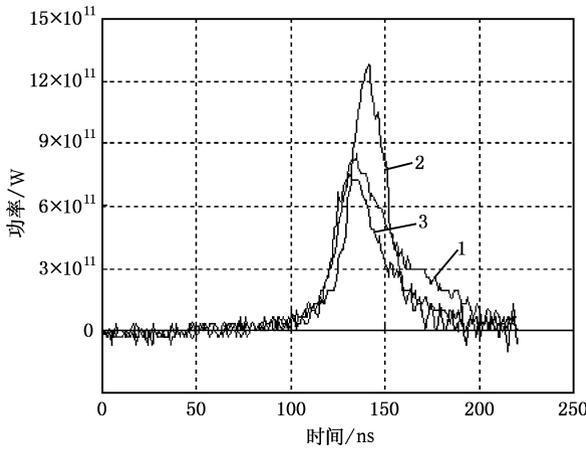


图 2 不同丝数时 X 射线功率波形图(曲线 1 为 04071 炮($\phi 12$ 24 根);曲线 2 为 04068 炮($\phi 12$ 48 根);曲线 3 为 04075 炮($\phi 12$ 54 根))

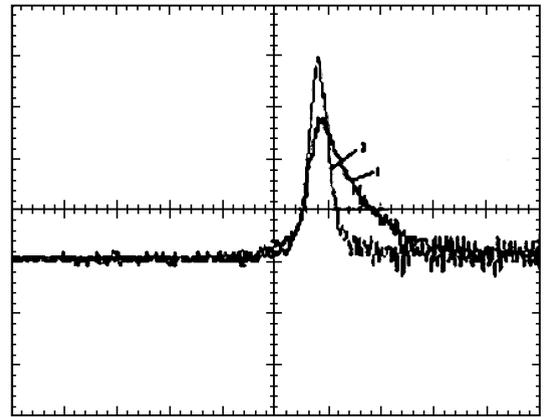


图 3 X 射线波形(线质量约为 $190\mu\text{g}/\text{cm}$)(曲线 1 为 04212 炮;曲线 2 为 04068 炮)

2)进行了两组基本固定丝阵负载线质量,改变丝数的 Z 箍缩实验,每种状态共进行了 5 次有效的实验,典型的实验结果见表 2 与图 3.

3)进行了基本固定 mr_0^2 、驱动电流(1.6MA)、上升时间($\sim 100\text{ns}$)、改变丝阵直径和丝数的 Z 箍缩实验,每种状态共进行了 5 次有效的实验,典型的结果见表 3 与图 4.图 4(b)表明在该状态下有时会出现二次箍缩的情形.

表 2 负载线质量基本不变,改变丝数的 Z 箍缩辐射特性

炮号	负载电流/MA	上升时间/ns	线质量($\mu\text{g}/\text{cm}$)	丝阵直径/mm	丝直径/ μm	丝数(丝间距离/mm)	内爆时间/ns	辐射总能量/kJ	平均辐射功率/TW
04068	1.61	97	181.8	12	5	48(0.785)	141	31.6	1.28
04212	1.82	99	193.8	12	8	16(2.356)	133	22.1	0.42
04223	1.63	102	116.3	10	8	12(2.618)	124	25.4	0.37
04228	1.55	94	121.2	10	5	32(0.982)	121	23.4	0.81

表 3 电流参数和 mr_0^2 基本保持一致时,不同丝阵直径和丝数的 Z 箍缩辐射特性

炮号	丝阵直径/mm	丝数(丝间距/mm)	线质量($\mu\text{g}/\text{cm}$)	内爆时间/ns	辐射总能量/kJ	辐射平均功率/TW
04076	18	24(2.365)	90.9	137	27.4	0.65
04075	12	54(0.698)	204.6	151	25.6	0.75
04085	10	78(0.403)	295.4	134(1.67MA)	24.8	1.12

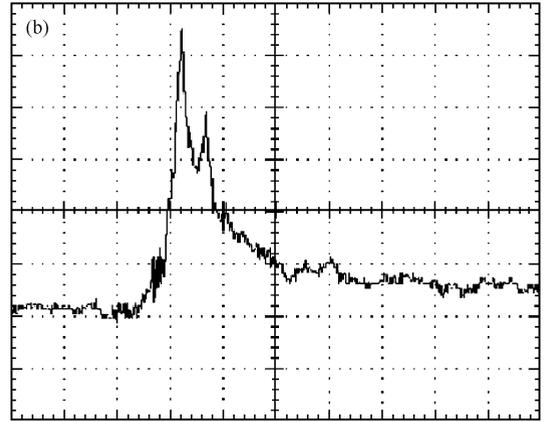
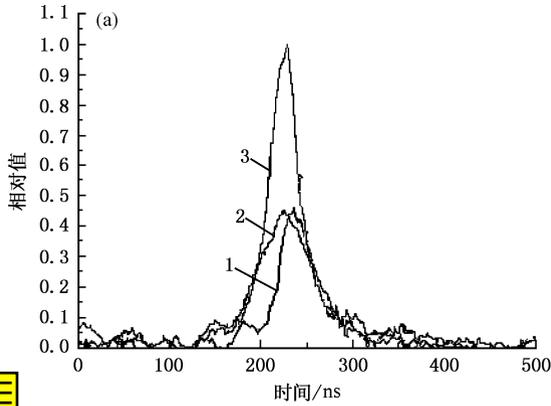


图 4 (a) X 射线波形 (曲线 1 为 04075 炮, 曲线 2 为 04076 炮, 曲线 3 为 04085 炮) (b) X 射线功率波形图 (03256 炮) (丝阵参数: $\phi 18$, 24 根, $8\mu\text{m}$ 钨丝, 1.7MA)

4) 测量了不同参数钨丝阵负载时 X 射线与电流的时间关联波形, 见图 5, 进而计算了 Z 箍缩内爆

时间与驱动电流之间的关系, 结果见图 6. 表 4 列出了丝阵直径为 $\phi 18\text{mm}$ 时内爆时间随丝阵质量的变化.

表 4 丝阵直径为 $\phi 18\text{mm}$ 时内爆时间随丝阵质量的变化

炮号	负载电流 /MA	丝数目	丝阵线质量 ($\mu\text{g}/\text{cm}$)	内爆时间 /ns	X 射线峰值与电流峰值的时间差/ns
03007	2.1	10	193.8	120	24
02204	1.6	13	251.9	164	47
03009	2.1	40	303.2	173	75
03008	2.1	20	387.6	188	89
03264	1.6	24	465.1	228	159

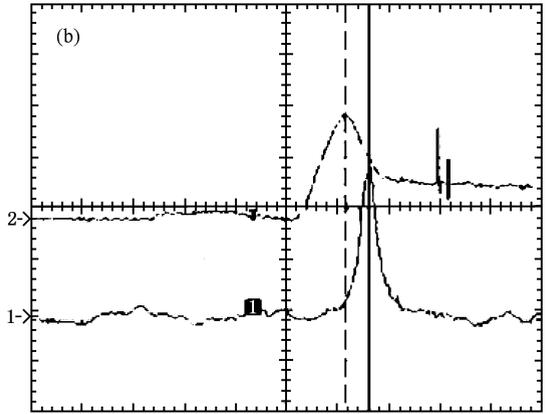
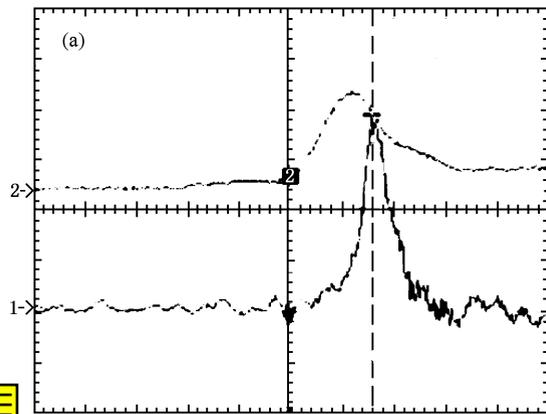


图 5 (a) 02194 炮负载电流与 X 射线时间关联波形 (1.5MA, $96.9\mu\text{g}/\text{cm}$, $\phi 18-10$ ($8\mu\text{m}$ 钨丝)) (波形 1 为 X 射线, 波形 2 为电流波形) (b) 04085 X 射线和电流波形关联图 (1.7MA, $295.4\mu\text{g}/\text{cm}$, $\phi 10-78$ ($5\mu\text{m}$ 钨丝)) (图中上图为电流波形, 下图为 X 射线波形)

5. 结 论

1. 从实验结果(表 3 与图 4)可以看出, 当负载的初始参数定标常数 A 基本一致时, Z 箍缩的辐射总能量很接近, 但 X 射线波形随着丝数(丝间距离)

不同而不同, 总的趋势随着丝数增多, 间距减小, X 射线脉冲波形前沿变陡、脉宽变窄. X 射线辐射功率在线质量基本固定时, 随丝间距的减小而增大. 内爆时间随着负载质量的增加而增加, 随着驱动电流的增大而减小. X 射线波形有时出现双峰, 尤其在丝数较少时更为明显, 说明有两次箍缩现象存在.

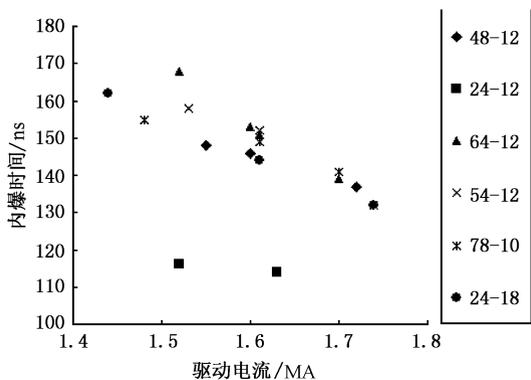


图 6 内爆时间和驱动电流之间的关系

2. 在“强光一号”装置的驱动电流参数下,得到了最佳的辐射总能量和功率输出. 辐射总能量最大为 34kJ, 峰值功率最大为 1.28TW, 总的能量转换效率约为 12.6%. X 射线总能量 E_x 基本符合 $E_x - I_m^2$ 定标曲线. 见图 7 和表 5.

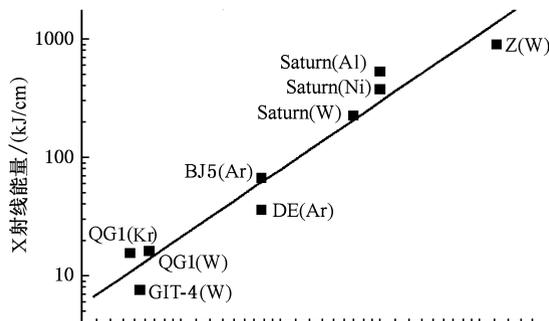


图 7 “强光一号”Z 箍缩实验结果与国外比较

3. 辐射总能量 E_x 大于内爆动能 E_k , 根据文献 [13] 给出的公式 $E_k = 0.9 I_m^2 \ln(r_0/r_f)$ 可计算出, E_x/E_k 约为 3, 参见表 6. 说明辐射总能量不仅取决于内爆动能, 还与其他因素(如内爆滞止后电流对负载的继续加热情况)有关.

表 5 “强光一号”装置 Z 箍缩等离子体辐射实验结果与国外装置结果比较

装置名称	负载材料	负载长度	驱动电流	压缩比 *	X 射线总能量	
		l/cm	I_m /MA	r_0/r_f	/kJ	kJ/cm
强光一号 ^[4]	氟气	4.0	1.4	14	62	15.5
强光一号	钨丝	2.0	1.6	10	32	16.0
GIT-4 ^[5]	钨丝	4.0	1.5	6	30	7.5
DE ^[6]	Ar 气	4.0	3.5	15	140	35.0
Blackjack ^[5,7]	Ar 气	3.0	3.5	20	200	66.7
Saturn	钨丝 ^[8]	2.0	6.6	20	450	225
	铝丝 ^[9]	2.0	8.0	20	1060	530
	钨丝 ^[10]	2.0	8.0	25	750	375
Z ^[11]	钨丝	2.0	18	25	1800	900

* 压缩比是利用图像诊断系统得到的实验结果^[12].

表 6 “强光一号”上 Z 箍缩产生的 X 射线辐射总能量与动能的比较

负载材料	负载长度	驱动电流	压缩比	X 射线总能量	内爆动能	E_x/E_k
	l/cm	/MA	r_0/r_f	E_x /kJ	E_k /kJ	
钨丝	2.0	1.6	10	30.2	10.5	2.9
钨丝	2.0	1.5	10	28.6	9.3	3.1

4. 理论分析与实验研究结果显示^[14], 对一定的驱动装置来说, 存在一个较佳的丝阵参数范围, 其辐射功率和总能量均较大; 在“强光一号”装置现有的参数与国内金属细丝生产能力(国内最细的钨丝直

径是 $5\mu\text{m}$) 条件下, 采用丝间距小于 0.8mm、丝数为 48 根(线质量 $180\mu\text{g/cm}$) 的钨丝阵负载, 获得了最高的辐射功率和总能量, 如果能够进一步减小单丝直径, 使得负载线质量更小, 估计会得到更好的结果.

[1] Spielman R B, Deeney C, Chandler G A et al 1998 *Phys. Plasmas* 5 2105
 [2] Sanford T W L, Mock R C, Nash T J et al 1999 *Phys. Plasmas* 6

1270
 [3] Kuai B, Cong P T, Zeng Z Z et al 2002 *Plas. Sci. Tech.* 4 1329
 [4] Wang W S, He D H, Qiu A C et al 2003 *High Power and Laser and*

- Particle Beams* **15** 184 (in Chinese) [王文生、何多慧、邱爱慈等 2003 强激光与粒子束 **15** 184]
- [5] Baksh R B , Bugaev S P , Dasto I M *et al* 1993 *Laser and Particle Beams* **11** 587
- [6] Riordan J C , Coleman P L , Failor B H *et al* 1998 *Bull. Am. Phys. Soc.* **43** 1905
- [7] Clark W , Richardson R , Brannon J *et al* 1982 *J. Appl. Phys.* **53** 5552
- [8] Deeney C , Nash T J , Spielman R B *et al* 1997 *Phys. Rev. E* **56** 5945
- [9] Douglas M R , Deeney C , Spielman R B *et al* in IEEE Conference Record-Abstracts , 1999 *IEEE International Conference on Plasma Science* , June 20-24 , 1999 , Monterey , CA , p230
- [10] Deeney C , Covertale C A , Douglas M R *et al* 1999 *Phys. Plasmas* **6** 3576
- [11] Deeney C , Douglas M R , Spielman R B *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883
- [12] Qiu M T , Lv M , Wang K L *et al* 2003 *High Power and Laser and Particle Beams* **15** (1) 102 (in Chinese) [邱孟通、吕敏、王奎录等 2003 强激光与粒子束 **15** (1) 102]
- [13] Zeng Z Z , Qiu A C 2004 *Chin. Phys.* **13** 201
- [14] Duan Y Y , Guo Y H , Wang W S *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 1856

Study on W wire array Z pinch plasma radiation at qiangguang- I facility^{*}

Qiu Ai-Ci¹⁾²⁾ Kuai Bin¹⁾²⁾ Zeng Zheng-Zhong²⁾ Wang Wen-Sheng²⁾

Qiu Meng-Tong²⁾ Wang Liang-Ping²⁾ Cong Pei-Tian²⁾ Lü Min²⁾

1) *School of Electrical Engineering , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China*

2) *Northwest Institute of Nuclear Technology , Xi 'an 710024 , China*

(Received 21 September 2005 ; revised manuscript received 26 November 2005)

Abstract

Experimental study on plasma radiation characteristics of W wire array Z pinch with different initial parameters performed on Qiangguang- I pulsed power generator of 1.4—2.1MA current with 80—100ns rise time is reported. The generator configuration and the diagnostic system for the experiments are briefly described. The total X-ray energy and peak power have been measured , and the maximum of X-ray energy and peak power are 34kJ and 1.28TW , respectively. In additional , the main results and conclusions are discussed also.

Keywords : W wire array , Z-pinch , plasma radiation

PACC : 5255E , 5270L