

文章编号: 1001-4322(2005)04-0595-04

短脉冲高剂量率 γ 射线源技术研究*

蒯 斌^{1,2}, 邱爱慈^{1,2}, 曾正中², 丛培天², 王亮平², 梁天学²

(1. 西安交通大学 电气学院, 陕西 西安 710049; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 介绍了“强光一号”加速器产生宽度约 20 ns 的高剂量率脉冲 γ 射线的工作过程; 分析了短脉冲 γ 射线源二极管的管绝缘体和真空磁绝缘传输线的结构与绝缘性能; 说明了等离子体断路器的工作特性; 阐述了二极管工作阻抗和阴阳极的设计原则与设计参数。给出了不同短脉冲 γ 射线源的实验结果, 得到了 3 种辐射参数: 脉冲宽度约 20 ns, 辐射面积为 2, 30 和 100 cm² 时, 相应的辐射剂量率为 10¹¹, 0.7 × 10¹¹ 和 10¹⁰ Gy/s。

关键词: 短脉冲 γ 射线; 等离子体断路器; 二极管

中图分类号: TL503; TM836 **文献标识码:** A

“强光一号”加速器的一个标志性工作方式是产生脉冲宽度 15~25 ns 的短脉冲 γ 射线辐照环境, 利用该环境可以开展各种星弹用电子元器件的抗辐射加固技术实验考核。它的基本工作过程是^[1,2], 首先利用直线型脉冲变压器和水介质脉冲形成线产生一定脉冲宽度(约 80 ns)与幅值(约 1.5 MV)的电脉冲, 然后采用磁绝缘真空同轴传输线和 POS(Plasma Opening Switch)组成的系统将上述电脉冲进行脉冲压缩, 产生脉冲宽度小于 35 ns、电压幅值为 5~6 MV 的电脉冲, 再通过高阻抗电子束二极管将该电脉冲转换成电子束, 最后由电子束与高原子序数靶相互作用产生韧致辐射, 获得短脉冲宽度、不同直接辐射面积和不同辐射剂量的 γ 射线。其中, 管绝缘体、磁绝缘真空同轴线、POS 和短脉冲高阻抗电子束二极管等是组成短脉冲 γ 射线源的最关键部件, 它们直接决定短脉冲的成形及电能转换为电子束能的效率, 并最终决定所要获得的 γ 射线参数。因此, 对这些关键部件进行研究具有重要的意义。

1 管绝缘体和磁绝缘真空传输线

1.1 管绝缘体

由于整个真空二极管负载工作电压幅值约为 6 MV, 且脉冲形状有明显的台阶和跃变, 整个电压脉冲持续时间为 80 ns, 高压脉冲持续时间仅为 30~35 ns(见图 1), 因此, 将短脉冲电子束二极管的管绝缘体和磁绝缘真空传输线(MITL)设计成轴向绝缘结构(见图 2)。其中, 管绝缘体长 30 cm, 内径 $\phi 160$ cm, 包含有 9 片聚乙烯圆环和 8 片不锈钢均压环, 用 24 根直径 $\phi 3$ cm 的尼龙杆紧固在一起。整个管绝缘体放置在去离子水中, 工作时绝缘体内腔体保持真空状态, 真空度为 10⁻² Pa。对于轴向绝缘结构的管绝缘体, 它的绝缘性能可用 J. C. Martin 的真空沿面闪络场强 E_{TM} 表征^[3]

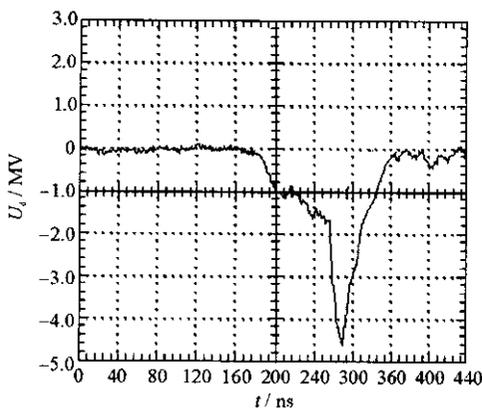


Fig. 1 Waveform of diode voltage
图 1 二极管管电压波形

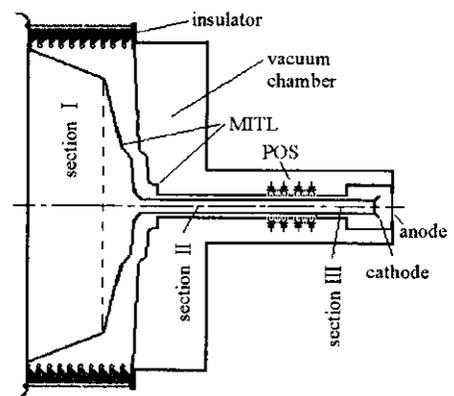


Fig. 2 Schematic of short pulse gamma-ray source
图 2 短脉冲 γ 射线源结构示意图

* 收稿日期: 2004-09-30; 修订日期: 2005-01-10

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 蒯 斌(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 从事脉冲功率技术研究; 西安 69-10 信箱; E-mail: Csun@nint.ac.cn.

$$E_{TM} t_{eff}^{1/6} D^{1/10} = 1\ 831 \tag{1}$$

式中： $E_{TM} = V_{TM}/l$, V_{TM} 是沿面闪络时管绝缘体两端电压幅值, l 是管绝缘体长度; t_{eff} 是脉冲电压有效时间 (ns), 计算中一般取脉冲电压半值宽度 (FWHM); D 是管绝缘体内径 (cm)。

根据管绝缘体的实际工作情况, 利用 Super Fish 程序计算了外加电压 1.8 MV 时绝缘体的工作电场分布 (见图 3), 计算结果表明最大场强位于阴极端面附近, 其幅值为 90.0 kV/cm。由图 1 可知, 二极管管电压可分成两部分, 一部分是在 POS 断路之前的电感负载电压, 另一部分是 POS 开关断路后形成的短脉冲电压。由此可将波形分为两种状态 (状态一: $t_{eff} = 80$ ns, $U_d = 1.5$ MV; 状态二: $t_{eff} = 30$ ns, $U_d = 5.0$ MV), 利用公式 (1) 并结合工作电场计算结果, 得到管绝缘体的绝缘性能, 见表 1。可以看出, 在状态一下, 二极管管绝缘体是工作安全电压下的, 而在状态二下, 二极管管绝缘体是在超过安全电压下工作的, 因此在该状态下管绝缘体真空表面存在滑闪放电, 需要在每次运行后对管绝缘体表面进行处理。

表 1 管绝缘体的绝缘性能

Table 1 Insulating characteristics of insulator

t_{eff}/ns	U_d/MV	$E_{TM}/(\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$	V_{TM}/MV
80	1.5	81.45	1.63
30	5.0	95.95	1.92

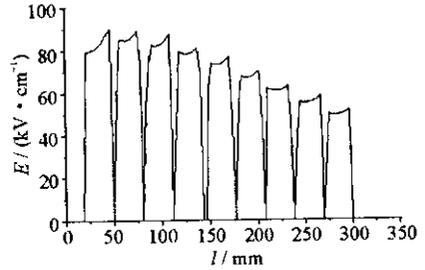


Fig. 3 Electric field distribution of insulator

图 3 二极管管绝缘体上的电场强度分布

1.2 MITL 特性

MITL 由三个组件构成 (参见图 2), 组件 I 的内筒是一段圆台, 长 26 cm, 与二极管水隔板相连的端面直径为 $\phi 152$ cm, 与二极管阴极相衔接的端面直径 $\phi 132$ cm; 外筒也是一段圆台, 与水线外筒连接的端面直径是 $\phi 250$ cm, 另一个端面的直径是 $\phi 183$ cm。组件 II 的内筒是一段带有过渡法兰的圆柱, 圆柱直径 $\phi 2.5$ cm, 过渡法兰由两部分组成, 之所以设计成这种结构, 目的是减小负载电感以兼顾加速器的其它运行状态; 外筒也是一段带有过渡法兰的圆柱, 圆柱内径 $\phi 6.4$ cm。组件 III 是 POS 之后的一段同轴线, 外筒分成两段, 一段内径 $\phi 6.4$ cm, 另一段内径 $\phi 20$ mm, 内筒直径 $\phi 2.5$ cm。总电感约 115 nH。

表征真空磁绝缘传输线磁绝缘性能的主要参数是满足磁绝缘的最小电流, 即磁绝缘临界电流^[4]

$$I_{cr} = 8.5 \times 10^3 \times g(\gamma^2 - 1)^{1/2} \tag{2}$$

$$\gamma = 1 + \frac{U_M}{0.511 \times 10^6 V} \tag{3}$$

式中: I_{cr} 是磁绝缘临界电流; g 是 MITL 的几何形状因子; γ 是相对论因子; U_M 是工作电压。根据公式 (2) 可以估算出不同工作电压下的磁绝缘临界电流, 见表 2, 表中同时给出了相应工作电压下的磁绝缘传输线的实际工作电流值 I_M 。由此可知, MITL 基本满足磁绝缘条件。

表 2 不同工作电压下的磁绝缘临界电流

Table 2 Critical current of MITL under different voltage

MITL	U_M/MV	I_{cr}/kA	I_M/kA
I	1.5	558.4	600~780
II	1.5	34.5	600~780
III	5.5	106.0	110~160

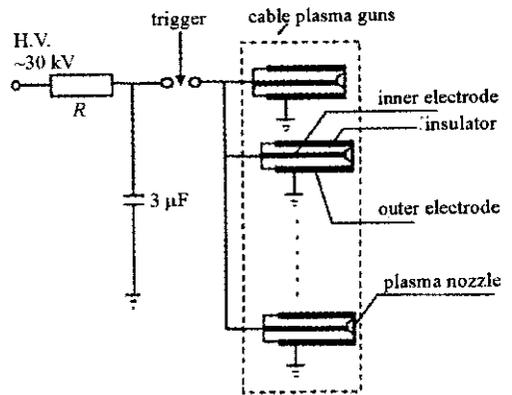


Fig. 4 Schematic of plasma guns pulse power source

图 4 等离子体枪脉冲驱动源示意图

2 POS 性能简介

POS 的作用是陡化高压强流电子束二极管电压脉冲前沿、倍增其幅值, 从而提高韧致辐射 γ 射线的剂量率。“强光一号”加速器的等离子体断路器结构参数如下: 92 个等离子体枪对称分布在直径 $\phi 60$ mm 的不锈钢同轴线外筒 (阳极) 上, 同轴线内筒 (阴极) 直径 $\phi 20$ mm; 等离子体枪驱动脉冲电源由电容器、气体触发开关

和电感器组成(见图4),电容器的充电电压约30 kV,放电脉冲持续时间约1.7 μs ,在此参数下测得的等离子体峰值密度约为 10^{15} cm^{-3} [5];初级脉冲功率源与 POS 等离子体源之间的延时为 $(190 \pm 10) \text{ ns}$ 。

3 二极管特性

3.1 阴极材料选取

由于“强光一号”加速器等离子体断路开关产生的脉冲电压脉宽通常在25~35 ns,作用在电子束二极管上的电压脉冲持续时间短,因此要求电子束二极管的阴极启动时间短。经过综合分析多种阴极材料的性能之后,选取天鹅绒布作为短脉冲二极管的阴极材料,并将它粘在不锈钢底座上。天鹅绒布的结构参数如下:绒毛长度约1.6 mm,绒毛直径约 $\phi 25 \mu\text{m}$ 。一簇天鹅绒纤维中约有10根绒毛,簇底半径为0.3 mm,簇与簇之间间距约0.9 mm。

3.2 阻抗特性

短脉冲 γ 射线二极管是一种强流高阻抗二极管。由于要求产生的短脉冲 γ 射线参数有3种,同时要保证等离子体断路开关和二极管的最佳匹配,因此,在短脉冲 γ 射线二极管的结构设计中,基本保证3种状态的二极管阻抗特性变化不大。其中,对应于获得小面积(小于 30 cm^2)短脉冲 γ 射线状态,二极管应设计成强流弱箍缩型电子束二极管,相应的二极管阻抗可用聚焦流模型近似定标[6],即

$$R_d = V_0 / \{8.5 \times 10^3 \times \gamma^{1/2} \ln[\gamma + (\gamma^2 - 1)^{1/2}]\} (r/d) \quad (4)$$

式中: V_0 为二极管电压; r 为阴极半径; d 为阴阳极间距。此时,二极管的阻抗设计值为25~45 Ω 。

对应于获得大面积(100 cm^2)短脉冲 γ 射线状态,二极管应设计成强流非箍缩型电子束二极管,以保证具有较好的辐射均匀性。相应的二极管阻抗可用下列模型近似定标[7],即

$$R_d \cong V_0 / \{4.266 \times 10^3 \times [\xi(1 + \frac{1}{6\xi^4}) - 1.2]^2 (\frac{r}{d})^2\} \quad (5)$$

式中: $\xi = \sqrt{\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}}$ 。此时,二极管的阻抗设计值为45~60 Ω 。

3.3 辐射转换靶的设计

针对二极管产生的电子束的电子能谱,利用 ITS 程序计算了电子能量为4~6 MeV的韧致辐射产生效率与辐射转换靶厚度的关系,其中韧致辐射产生效率定义为产生的 γ 射线能量与入射电子能量的比值。图5给出了典型的计算结果。由计算可知,在入射电子能量为4~6 MeV时,钽靶的最佳厚度为0.8~1.2 mm。

4 实验结果

实验调试主要是调整等离子体断路开关的工作电压、滑闪开关的长度、二极管的阴极结构、半径和阴阳极间距等参量,以获得所需 γ 射线参数。最终获得了3种典型的负载工作状态,分别产生辐射面积为2~3,30和 100 cm^2 的强 γ 射线。表3给出这3种状态下的二极管性能参数。图6给出了反映等离子体断路开关工作性能的电流波形。图7给出典型的二极管电子束电流波形。

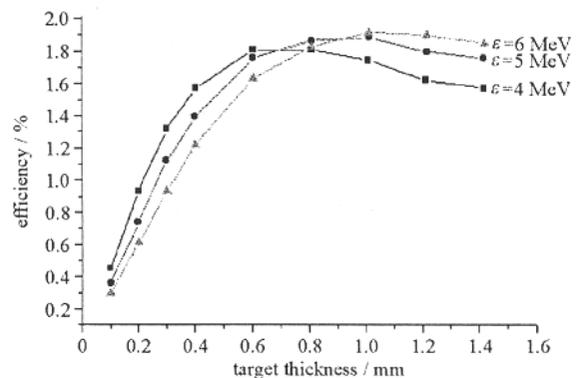


Fig. 5 Relation of bremsstrahlung efficiency and tantalum target thickness

图5 入射电子韧致辐射产生效率与钽靶厚度之间的关系

表3 二极管性能参数表

Table 3 Parameters of diode

number	current /kA	radiation area/cm ²	pulse duration/ns	dose rate/(Gy · s ⁻¹)	non-uniformity
1	145	2~3	15~20	10^{11}	
2	125	30	15~25	0.7×10^{10}	2.9 : 1
3	120	100	20~25	10^{10}	2.3 : 1

5 结 论

本文介绍了强光一号加速器产生不同参数的短脉冲 γ 射线的工作过程和基本结构。结合具体的工作条

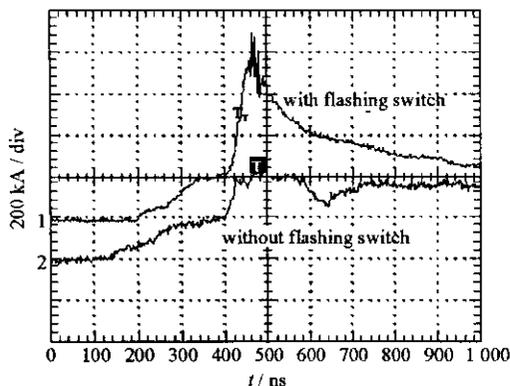


Fig. 6 Comparison between load currents

图 6 负载电流的比较波形

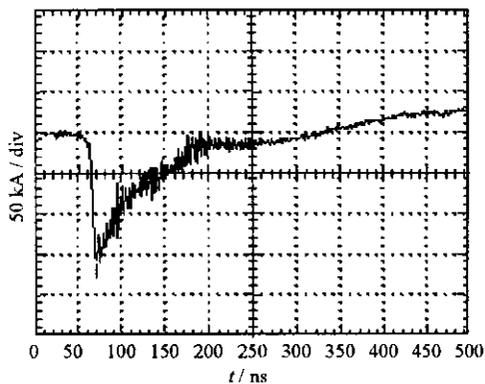


Fig. 7 Electron beam current measured by Rogowski coil

图 7 用罗戈夫斯基线圈测得的电子束电流波形

件,研究分析了电子束二极管的管绝缘体电绝缘性能,以及磁绝缘真空传输线的磁绝缘特性;简要说明了 POS 的工作特性;分析了电子束二极管的设计原理,确定了阴阳极的材料及其参数;给出了 3 种不同的短脉冲 γ 射线源的实验结果:脉冲宽度约 20 ns,辐射面积为 2,30,100 cm^2 时,相应的辐射剂量率分别为 10^{11} , 0.7×10^{11} 和 10^{10} Gy/s。

参考文献:

- [1] 蒯斌,曾正中,邱爱慈,等. 产生不同宽度脉冲 γ 射线源技术[R]. 西北核技术研究所, 2001. (Kuai B, Zeng Z Z, Qiu A C, et al. Technology of source for generating high intensity gamma-ray with different pulse durations[R]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2001)
- [2] Лучинский А В, Ратахин Н А, Федущак В Ф, и др. Многоцелевой импульсный генератор трансформаторного типа[J]. *Изв вузов Физика*, 1997, (12): 67.
- [3] 蒯斌,邱爱慈,曾正中,等. 长脉冲高阻抗强流电子束二极管[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(11):1133—1136. (Kuai B, Qiu A C, Zeng Z Z, et al. Long-pulse high-impedance intense e-beam diode. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11):1133—1136)
- [4] Edward L R V. Theory of magnetic insulation[J]. *The Phys of Fluid*, 1974, **17**(6):85.
- [5] 陈玉兰. POS 等离子体源密度及其时空分布测量[D]. 西安:西北核技术研究所, 2003. (Chen Y L. Characterization of plasma density and its distribution of a cable plasma for POS. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2003)
- [6] Goldstein S A, Davidson R C, Siambis J G, et al. Focused-flow model of relativistic diodes[J]. *Phys Rev Lett*, 1974, **33**(25):1471.
- [7] Беспалов В И, Петин В К, Ратахин Н А, и др. Рентгеновское излучение установки СНОП-1[J]. *Изв вузов Физика*, 1995, (12):79.

Research on source of high dose rate gamma-ray with short pulse duration

KUAI Bin^{1,2}, QIU Ai-ci^{1,2}, ZENG Zheng-zhong², CONG Pei-tian², WANG Liang-ping², LIANG Tian-xue²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

Abstract: One of the important building blocks on Qiangguang- I accelerator is the short-pulse high dose rate gamma-ray source, which is mainly used to generate short pulse intense bremsstrahlung. In this paper, the process of generating high dose rate gamma-ray with about 20 ns pulse duration on Qiangguang- I accelerator was introduced. The insulating characteristics of insulator and MITL of short-pulse high-impedance intense electron beam diode were analyzed in detail. The characterization of plasma opening switch(POS) was presented. The design approach for diode operating parameters including the diode impedance, cathode and anode was described. The experimental results show that the pulse duration of bremsstrahlung is about 20 ns, and the dose rates at areas of 2,30 and 100 cm^2 are 10^{11} , 0.7×10^{11} and 10^{10} Gy/s respectively.

Key words: Short pulse gamma-ray; Plasma opening switch; Diode