

## 透射式 X 光管研制

周 亮<sup>1</sup>, 王文川<sup>2</sup>, 周 林<sup>2</sup>, 李名加<sup>2</sup>, 梁 川<sup>2</sup>, 章法强<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100015; 2. 中国工程物理研究院核物理与化学所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** X 光管是 X 射线源的关键部件, 为了研制出便携式 X 射线标定源, 研制了一种透射式 X 光管。该 X 光管是一个密封的电子束真空二极管, 其阴极为竖直的梳齿状结构, 电子更容易发射; 靶窗为 100  $\mu\text{m}$  厚的钛片; 内部为真空腔, 使用 95 陶瓷作为真空界面绝缘体, 采用金属-陶瓷封接工艺, 真空度达到  $5 \times 10^{-5}$  Pa。实验结果表明, 所研制的 X 光管在距靶窗 20 cm 处剂量约为 20 mR, 此时 X 射线的脉冲宽度约为 5 ns。

**关键词:** X 光管; 透射式; 阴极; 靶窗

中图分类号: TN752.5; TL51

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190336

## Development of transmission target X-ray tube

Zhou Liang<sup>1</sup>, Wang Wenchuan<sup>2</sup>, Zhou Lin<sup>2</sup>, Li Mingjia<sup>2</sup>, Liang Chuan<sup>2</sup>, Zhang Faqiang<sup>2</sup>

(1. Twelfth Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China;

2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P.O. Box 919-212, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The X-ray tube is a key component of an X-ray source. An X-ray tube used for a compact nanosecond pulsed X-ray source is described in this paper. The X-ray tube is a sealed transmission target X-ray diode. Its cathode is a comb structure formed from thin tungsten sheets with thickness of 50  $\mu\text{m}$ , while its target is made of a 100  $\mu\text{m}$ -thick titanium film. The X-ray dose at a distance of 20 cm from the diode is 20 mR per pulse while the diode voltage is 512 kV. In this case, the full width at half maximum of the X-ray pulse is about 5 ns.

**Key words:** X-ray tube; transmission target; cathode; target

随着脉冲功率技术的发展, 脉冲辐射模拟装置在相关领域发挥了重要作用<sup>[1-4]</sup>。脉冲 X 射线源作为辐射模拟实验平台用以满足脉冲工况下 X、 $\gamma$  放射性测量探头的标定和溯源, 广泛应用于脉冲辐射测试系统研制及性能研究、脉冲电离辐射计量和电子元器件抗辐射效应研究等领域<sup>[5-7]</sup>。X 光管是 X 射线源的关键部件, 它的性能特征决定了所产生 X 射线的品质、产额以及整个设备的运行性能。X 光管一般有两种结构, 一是正高压加载到锥形阳极上, 刀口阴极发射电子轰击阳极产生韧致辐射 X 射线, 称为反射式 X 光管; 二是负高压加载到针形阴极上, 发射电子轰击阳极金属薄膜产生韧致辐射 X 射线, 称为透射式 X 光管。目前用于闪光照相的 X 光管主要以反射式 X 光管为主, 可以得到较小的焦斑, 有利于获取高速运动物体的瞬时图像, 但其阳极材料烧蚀严重, 寿命有限。而作为辐射探测标定用的 X 射线源对焦斑没有要求、只需要获得较高的 X 射线产额, 其缺点是 X 射线的焦斑大。本文研制了一种透射式 X 光管, 与反射式 X 光管相比, 同样功率条件下, 具有较高的射线产生效率和辐照通量密度。

### 1 透射式 X 光管工作原理

透射式 X 光管的阳极结构与反射式有明显的区别, 它主要包括阴极、阳极(靶)及绝缘支撑部分。工作原理如图 1 所示, 在高压强流的作用下, 阴极产生电子流, 电子轰击阳极产生韧致辐射, 根据阳极端靶材的不同, 因韧致辐射产生的 X 射线的特性也有所差异。与反射式相比, 其具有较高的 X 射线产生效率和辐照通量密度。

### 2 结构设计

为了使整个 X 射线源结构紧凑、灵活机动, 要求 X 光管能够具备脱离外界真空机组而维持高真空状态的能力, 因此本文所设计的 X 光管是一个密封的电子束真空二极管, 它包括阴极、阳极靶、陶瓷绝缘子和不锈钢外筒, 其具体结构如图 2 所示。

收稿日期: 2019-09-05; 修订日期: 2019-12-12

作者简介: 周 亮(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高功率脉冲气体开关研究; quartz0771@sina.com。

通信作者: 梁 川(1977—), 男, 硕士, 副研究员, 从事脉冲功率技术研究; lcjxm@sina.com。

X光管的阴极设计成竖直的梳齿状结构,以使电子更容易发射,具体而言,将不同长度的 $50\ \mu\text{m}$ 厚度的薄钨铁片按一定间距固定在直径 $34\ \text{mm}$ 的圆柱基座上,圆柱基座通过空心铜棒连接到X射线源的同轴传输线内电极上;韧致辐射阳极靶材料一般都采用高原子序数的材料,同时靶材厚度对X光参数的影响十分重要,本文的阳极靶为 $100\ \mu\text{m}$ 厚的钛片,与阴极的距离约为 $12.2\ \text{mm}$ ,为了防止钛片变形或破碎,使用镂空圆盘电铁基座支撑。

X射线管高压支撑绝缘结构一般有两种:轴向绝缘(绝缘堆结构)和径向绝缘(绝缘子结构)。径向绝缘子采用径向的单个绝缘子实现油气分隔,主要优点是结构简单,便于高压绝缘处理,有利于系统的小型化。设计绝缘支撑时一般遵循以下要点:(1)结构简单,工程上容易实现;(2)尽可能降低三结合点(真空、介质以及金属电极交界处)附近的场强值;(3)使绝缘支撑沿面电场分布均匀,避免产生局部强场。根据此原则,X光管绝缘子采用锥形结构,一方面可以延长绝缘子沿面距离,另一方面可以使磁力线尽量不与绝缘子表面相交,从而避免回流电子轰击绝缘子。由于陶瓷出气率低、耐高温烘烤,且具备与金属钎焊的能力,因此,本文使用95陶瓷作为X光管真空界面绝缘体,同时,金属化连接的实现有利于提高X光管的真空度、实现长时间保真空的目的。

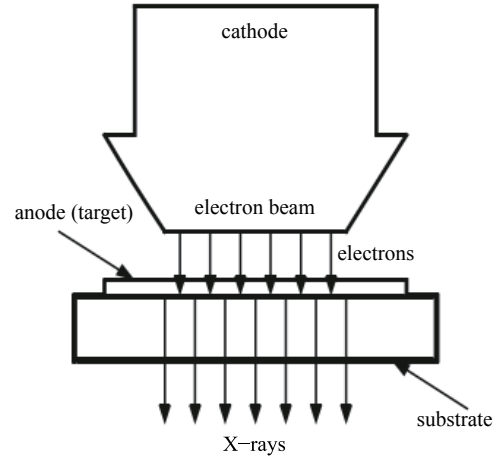


Fig. 1 Principle of transmission target X-ray tube

图1 透射式X光管工作原理图

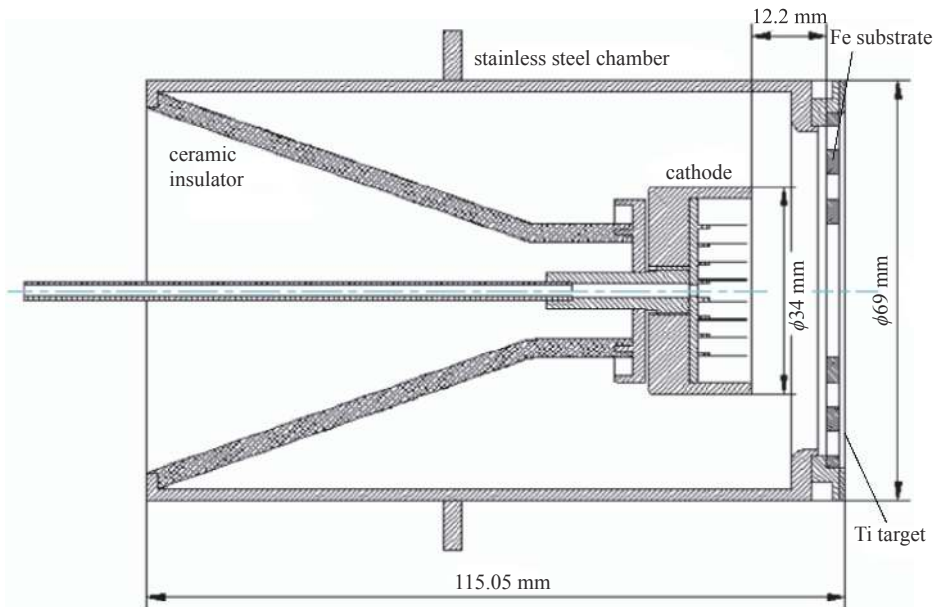


Fig. 2 Structure of X-ray tube

图2 X光管结构示意图

利用陶瓷-金属钎焊技术封闭完成的X光管如图3所示,其尺寸为 $\phi 69\ \text{mm} \times 115\ \text{mm}$ ,内部真空度可达 $5 \times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 。

### 3 实验研究

将研制的X光管安装于紧凑型纳秒X射线源上<sup>[8]</sup>,如图4所示。整个装置具有体积小、重量轻、结构紧凑、灵活机动等优点。采用电容分压器加二级电阻衰减器测量形成线电压及X光管电压;X射线由光电管进行探测,位于X光管正前方 $20\ \text{cm}$ 。

实验中调整油介质自击穿开关的间隙,使得脉冲形成线上的电压最大时开关击穿,所得典型的实验波形如图5所示,图中,通道1为形成线电压波形,通道2为X光管电压波形,通道3为X射线脉冲波形。当初级电容充电 $14.5\ \text{kV}$ ,二极管峰值电压为 $512\ \text{kV}$ ,半高宽为 $5.2\ \text{ns}$ 。光电管电压波形半高宽为 $5.6\ \text{ns}$ ,大于二极管上的电压脉宽,认为是电子束在传播过程中的时间展宽效应所导致。二极管束流大约为 $5\ \text{kA}$ 。X射线在轴线 $\pm 65^\circ$ 范围内分布,轴向方向最强。



Fig. 3 General view of the X-ray tube  
图 3 X 光管外形图

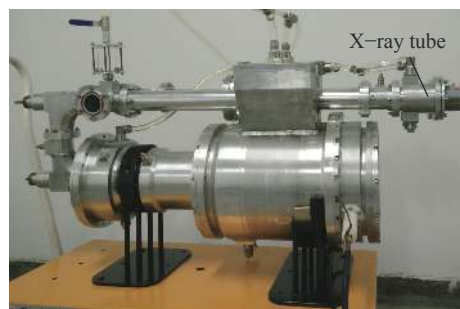


Fig. 4 Photograph of the nanosecond pulsed X-ray Source  
图 4 纳秒 X 射线源装置

测量了 X 光管的辐射剂量, 剂量计位于靶窗正前方 20 cm。图 6 为二极管辐射剂量分布图。根据电容  $C_0$  充电电压和自击穿开关状态的不同, 二极管电压在 350~500 kV 范围内变动, 相应剂量值范围 0~20 mR。实验时自击穿开关最佳工作点为 500 kV, 在 450 kV 下自击穿的晃动比较大, 在二极管阻抗一定的情况下, 输出剂量与加载到二极管上的实际电压成指数正比关系, 所以实验获得的剂量波动范围较大; 而在 500 kV 下自击穿的晃动比较小, 所以实验获得的剂量波动范围也较小。

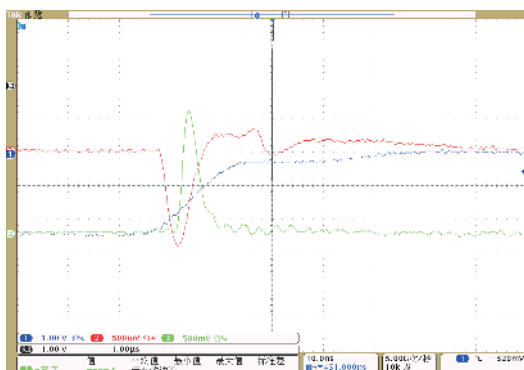


Fig. 5 Typical waveform of the X-ray source (10 ns/div)  
图 5 典型实验波形

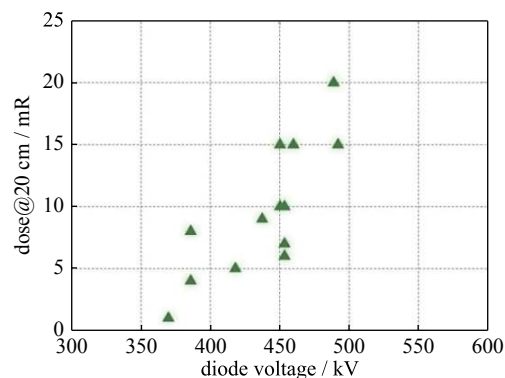


Fig. 6 Radiation dose versus diode voltage  
图 6 二极管辐射剂量分布图

## 4 结 论

本文研制了用于紧凑型 X 射线源的 X 光管, 其采用密封的电子束真空二极管结构。阴极设计成竖直的梳齿状结构, 以使电子更容易发射; 阳极靶为 100  $\mu\text{m}$  厚的钛片; 使用 95 陶瓷作为真空界面绝缘体, 采用金属-陶瓷封接工艺, 真空度达到  $5 \times 10^{-5}$  Pa。实验结果表明, 所研制的 X 光管在距靶窗 20 cm 处剂量约为 20 mR。

### 参考文献:

- [1] Mankowski J, Dickens J, Kristiansen M. High voltage subnanosecond breakdown[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1998, 26(3): 874-881.
- [2] Kovalchuk B M, Kremnev V V, Plisko V V, et al. High-power ultrawideband radiation source[J]. *Laser and Particle Beams*, 2003, 21: 211-217.
- [3] 邵涛, 章程, 李文峰, 等. 空气中纳秒脉冲介电阻挡放电高速摄影[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 612-616. (Shao Tao, Zhang Cheng, Li Wenfeng, et al. High speed imaging of nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in atmospheric air[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 612-616)
- [4] Lavrinovich I V, Zharova N V, Petin V K, et al. A compact pulsed X-ray source for high-speed radiography[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2013, 56(3): 329-334.
- [5] Hemberg O, Otendal M, Hertz H M. Liquid-metal-jet anode electron-impact X-ray source[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(7): 1483-1485.
- [6] 全林, 屠荆, 樊亚军, 等. 重复频率亚纳秒脉冲硬 X 射线发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(6): 1049-1052. (Quan Lin, Tu Jing, Fan Yajun, et al. Development of a sub-nanosecond rep-rate pulse hard X-ray generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(6): 1049-1052)
- [7] 张忠兵, 欧阳晓平, 王兰. ICI 探测器的时间响应特性研究[J]. *核技术*, 2008, 31(2): 142-146. (Zhang Zhongbing, Ouyang Xiaoping, Wang Lan. Time response of the ICI detector[J]. *Nuclear Techniques*, 2008, 31(2): 142-146)
- [8] Li M J, Chen D Y, Zhou L, et al. Development of compact nanosecond pulsed X-ray source[J]. *Laser and Particle Beams*, 2017, 35(2): 1-5.