

## 一种200 kV的多功能脉冲辐射系统研制

吕泽琦 谢彦召 苟明岳 陈晓宇 周金山 李梅 周熠

### Development of 200kV multi-function pulsed radiation system

Lü Ze-Qi Xie Yan-Zhao Gou Ming-Yue Chen Xiao-Yu Zhou Jin-Shan Li Mei Zhou Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 205206 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210583

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210583>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 多能复合谱电子束与X射线能量沉积剖面的等效性

Equivalence of energy deposition profile in target between electron beam of multi-energy composite spectrum and X-ray

物理学报. 2017, 66(2): 025202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.025202>

#### 1000 V p-GaN混合阳极AlGaIn/GaN二极管

p-GaN hybrid anode AlGaIn/GaN diode with 1000 V operation

物理学报. 2018, 67(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181208>

#### 吉瓦级强流相对论多注电子束二极管的优化设计与实验研究

Optimal design and experimental research of several-gigawatt multiple electron beam diode

物理学报. 2021, 70(3): 038401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201336>

#### 高能脉冲C6+离子束激发Ni靶的K壳层X射线

K-shell X-ray emission from high energy pulsed C6+ ion beam impacting on Ni target

物理学报. 2017, 66(14): 143401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.143401>

#### 多能量量子远程传态网络

A multifunctional quantum teleportation network

物理学报. 2021, 70(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201749>

#### 一种编码式宽带多功能反射屏

A wideband coding reflective metasurface with multiple functionalities

物理学报. 2017, 66(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064203>

# 一种 200 kV 的多功能脉冲辐射系统研制

吕泽琦 谢彦召<sup>†</sup> 苟明岳 陈晓宇 周金山 李梅 周熠

(西安交通大学电气工程学院, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2021 年 3 月 29 日收到; 2021 年 5 月 24 日收到修改稿)

研制了一套峰值电压 200 kV 的多功能脉冲辐射系统, 该系统具有产生脉冲电子束和脉冲 X 射线的功能, 在两种运行状态中可以灵活切换. 系统包括脉冲功率驱动源、真空二极管和实验腔体, 其中, 脉冲功率驱动源由 Marx 发生器、高储能的水介质传输线和脉冲压缩开关组成. 系统负载等效阻抗  $2\ \Omega$ 、负载电流半高宽 30 ns, 产生的脉冲电子束束流 83 kA, 产生的脉冲 X 射线平均能量 67 keV, 均匀性较好, 辐射场中的电子份额不超过 0.02%. 为监测系统运行状态和输出指标, 建立了包括运行参数和效应参数的全套测量系统, 克服了强电磁场环境的干扰问题. 研制了法拉第筒用于脉冲电子束的测量, 既可以获得电子束的束流强度, 也可以获得电子束总能量. 脉冲 X 射线的测量系统包括能谱仪、剂量片、法拉第筒等, 实现了能谱、剂量、均匀性、X 射线中电子份额等多参数的同时测量. 多功能脉冲辐射系统为脉冲功率技术、生物辐射效应、系统电磁脉冲效应等提供了一个多功能的实验平台.

**关键词:** 多功能, 二极管, 脉冲电子束, 脉冲 X 射线**PACS:** 52.59.-f, 52.70.La, 41.85.Qg**DOI:** 10.7498/aps.70.20210583

## 1 引言

脉冲电子束和脉冲 X 射线在越来越多的领域发挥了重要作用, 如辐射效应、辐射成像、材料加工改性等<sup>[1-4]</sup>. 脉冲电子束和脉冲 X 射线作用于效应物时都会发生能量的传递, 对其表面或内部造成影响, 而两者的作用机理不同, 迫切需要一套既能产生电子束又能产生 X 射线的辐射系统. 本文研制了一套峰值电压 200 kV、负载等效阻抗  $2\ \Omega$ 、负载电流半高宽 30 ns 的脉冲电子束和脉冲 X 射线产生系统, 仅更换阴极和阳极即可完成工作状态的转换, 利用此系统可以对脉冲电子束和脉冲 X 射线的产生机理、作用效应等方面进行研究. 目前对系统电磁脉冲效应的研究主要集中于理论研究<sup>[5]</sup>, 本模拟系统可以为理论结果和物理模型的验证提供实验平台.

为全面监测系统的运行状态和效应参数, 需要建立包括电压电流等运行参数以及脉冲电子束和

脉冲 X 射线状态参数的测量系统, 并克服强电磁干扰环境的影响. 系统工作在脉冲电子束状态时, 为了获得电子束的束流强度和总能量, 需要研制全吸收法拉第筒, 实现对电子束参数监测; 在脉冲 X 射线工作模式中, 为了在后续实验中更好的研究 X 射线效应, 应降低辐射场中电子数目占比, 需要研制复合型阳极靶, 并配备罗氏线圈测量, 达到减少电子并在复杂电磁环境中测量电子数目的效果; 为全面掌握 X 射线输出参数, 需要配备能谱测量系统、剂量测量系统等, 获取 X 射线辐射场的强度和均匀性. 本文将从系统的总体结构、参数选取、二极管材料及结构优化、测量系统设计、实验结果及分析等方面介绍.

## 2 系统总体结构及参数优化

### 2.1 系统总体结构及工作原理

脉冲 X 射线和脉冲电子束辐射系统主要由脉冲功率驱动源、脉冲功率负载以及测量控制系统三

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yzxie@xjtu.edu.cn

大部分组成, 脉冲功率驱动源包括 Marx 发生器和脉冲压缩系统, 脉冲功率负载包括真空二极管系统和实验腔体. 测量控制系统中运行参数测试包括传输线电压、二极管电压和二极管电流等, 实时判断系统的运行状态; 效应参数即脉冲电子束和脉冲 X 射线的输出指标, 包括电子束的束流强度和总能量、X 射线的能谱、剂量、均匀性、电子数目占比等参数, 系统结构示意图见图 1.

系统的工作原理为: Marx 发生器为初级储能单元, 产生百纳秒脉宽、百千伏峰值的高压脉冲, 对中储传输线充电, 经主开关和脉冲形成开关压缩后形成半高宽约 30 ns 的电压脉冲, 加载到二极管阴极阳极间. 在高压脉冲电场的作用下, 二极管阴极发射电子并在间隙中被加速, 轰击阳极, 由阳极靶引出强流电子束或转换为 X 射线, 仅更换二极管阴极、阳极即可完成工作状态的切换. 在中储传输线首端、脉冲形成线末端和输出线末端分别设置了贴片式电容分压器, 监测 Marx 发生器输出电压、脉冲形成线电压和二极管间隙电压; 在二极管间隙布置 B-dot 微分探头, 监测二极管运行电流, 获得设备的运行参数. 为得到系统输出的束流参数和 X 射线参数, 研制了全吸收法拉第筒, 放置在二极管阳极膜后, 测量电子束的束流强度和总能量; 研制了基于 PIN 探测器的能谱仪、罗氏线圈、剂量测量系统等, 既可以实现 X 射线能谱、剂量的测量, 又可以判断辐射场的均匀性、电子束占比等, 实现对系统的全方位监测.

## 2.2 传输线的绝缘结构设计

脉冲形成系统由中储传输线、脉冲形成线、输出线、主开关和脉冲形成开关构成, 为减小系统体积, 采用介电常数大、储能密度高、绝缘强度好的去离子水作为传输线的储能介质. 考虑传输线阻抗和绝缘强度设计传输线内筒直径为 360 cm, 外筒直径为 480 cm, 水线内外筒间电场分布如图 2 所示. 内外筒之间最大场强小于 80 kV/cm, 水中的三结合点电场小于 60 kV/cm.

主开关和脉冲形成开关配合, 压缩电压脉冲, 开关的绝缘介质采用去离子水, 与传输线一体化. 主开关采用环-板结构, 通过旋转环状阴极固定螺纹的方式改变开关间隙, 实现免拆卸在线调节. 脉冲形成开关陡化脉冲, 对电感要求较高, 选用低电感的多通道开关, 控制电感在 15 nH 内, 保证快脉冲前沿.

## 2.3 系统参数仿真优化

脉冲功率驱动源和二极管的等效电路如图 3 所示, 传输线阻抗与二极管等效阻抗匹配, 以实现最大的能量转换效率. 设计 Marx 发生器的输出电压为 400 kV, 脉冲形成线和输出线长为 50 cm, 中储线长为 100 cm, 经过传输线和两级开关的压缩后, 形成 200 kV, 30 ns 的电压波加载到二极管上. 仿真选取合适的 Marx 发生器储能电容、主开关和脉冲形成开关电感参数.

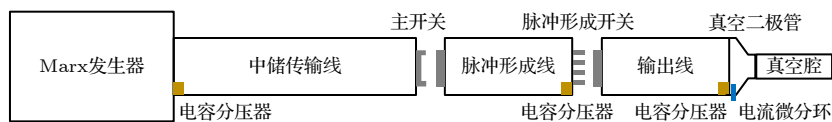


图 1 多功能脉冲辐射系统结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of multi-function pulsed radiation system.

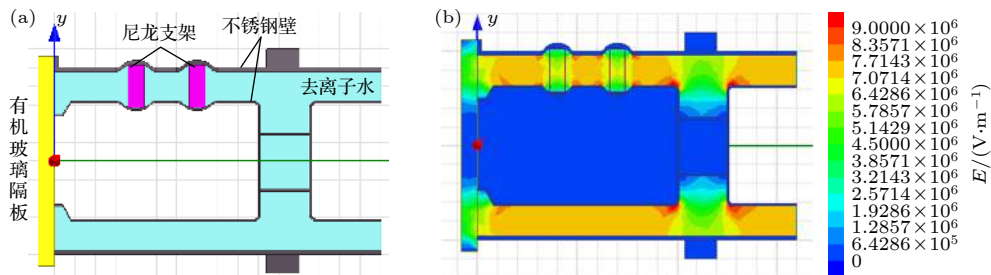


图 2 传输线结构及电场分布 (a) 传输线结构图; (b) 电场分布

Fig. 2. Structure and electric field distribution of transmission line: (a) Structure of transmission line; (b) distribution of the electric field.

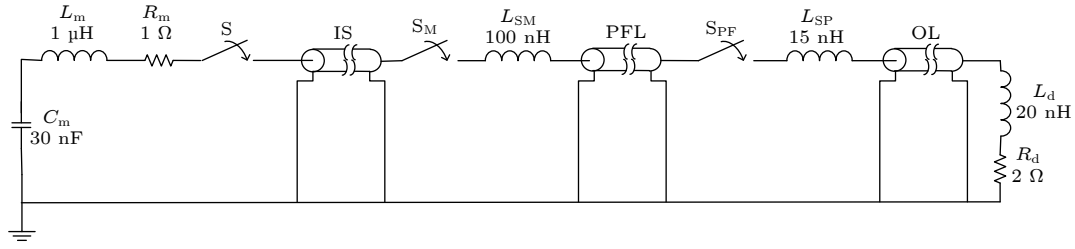


图3 脉冲功率驱动源和二极管的等效电路

Fig. 3. Equivalent circuit of pulse power source and diode.

图3中  $C_m$ ,  $L_m$ ,  $R_m$  和  $S$  分别为 Marx 发生器的储能电容、等效电感、内阻和等效开关;  $IS$ ,  $PFL$ ,  $OL$  分别为中储传输线、脉冲形成线、输出线;  $S_M$ ,  $S_{PF}$ ,  $L_{SM}$  和  $L_{SP}$  分别为主开关、脉冲形成开关及其电感;  $L_d$  和  $R_d$  为负载二极管的等效电感和电阻。

电路模拟结果如图4所示, 根据模拟结果, 当 Marx 发生器总电容为 30 nF、主开关电感为 100 nH、脉冲形成开关为 15 nH、水介质传输线和二极管等效阻抗为 2 Ω 时, 二极管电压为 250 kV, 电流为 125 kA, 电流半高宽为 31 ns。由于二极管阴极发射电子及电子穿过阳极时会产生能量损失, 一般脉冲电子束和脉冲 X 射线的能量略小于脉冲功率驱动系统的输出脉冲能量。

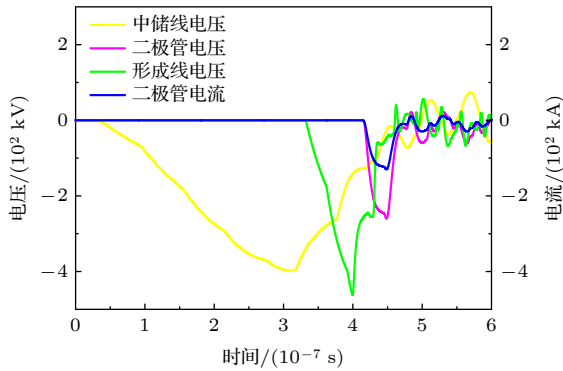


图4 电路模拟结果

Fig. 4. Circuit simulation results.

### 3 二极管阴阳极与间隙距离设计

#### 3.1 二极管整体结构

二极管阴极发射电子, 阳极将电子束直接引出或转换为 X 射线, 系统工作在脉冲电子束和脉冲 X 射线状态时二极管结构相同。对于 2 Ω 的低阻抗二极管, 径向绝缘结构可以有效地控制电感<sup>[6]</sup>。优化设计二极管结构, 控制电场, 使三结合点电场不大于 10 kV/cm, 整个结构中除电子发射部分外场强均小于 50 kV/cm, 如图5所示。

#### 3.2 电子束二极管工作过程分析及结构设计

脉冲功率驱动源产生高压脉冲加在二极管上, 二极管阴极发射电子, 不同阴极材料的电子发射机理不同。为提升阴极的发射性能, 产生均匀的电子束, 选择爆炸发射启动快、发射延迟时间较短、均匀性较好的材料作为阴极。爆炸发射理论和实验证明, 石墨作为低阻抗电子束二极管的阴极可以产生较大面积均匀的电子束<sup>[7]</sup>, 本系统采用圆盘结构的石墨阴极使电子尽量在大面积内均匀发射。

二极管阻抗与二极管阴极半径  $r$  和阴阳极间隙  $d$  之比有关,  $r/d$  越大, 二极管阻抗越小。脉冲信号下, 二极管阻抗会随电压变化而改变, 取施加在

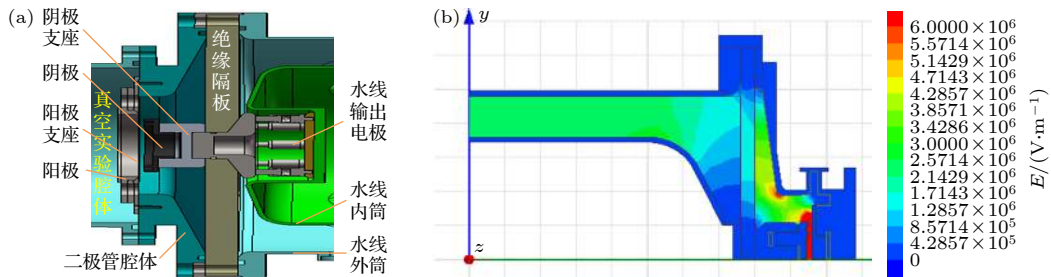


图5 二极管结构及电场 (a) 二极管结构; (b) 二极管间隙电场

Fig. 5. Structure and electric field distribution of diode: (a) Structure of diode; (b) distribution of the electric field.

二极管上的峰值电压与阴极发射的峰值电流之比为阻抗值. 仿真电子运动得到, 对于阴阳极间隙施加峰值 200 kV、半高宽 30 ns 的电压信号,  $r/d = 12$  时二极管阻抗为  $2 \Omega$ , 二极管间隙的电子图像如图 6 所示, 电子从阴极尖端开始发射, 而后大面积发射, 均匀性较好.

系统工作在电子束状态时, 电子束直接穿透阳极膜到达真空实验腔体. 镀铝的聚酯膜作为阳极钳制电位, 材料较轻薄, 减少电子束的能量损失.

### 3.3 X 射线均匀性优化

高能电子束轰击高原子序数材料时发生韧致辐射, 产生 X 射线, 分布在全空间  $4\pi$  角中, 前向辐射略强于其他方向. 脉冲电压到达二极管后, 阴极石墨发射电子, 在电场中加速后轰击阳极靶, 通过韧致辐射产生脉冲 X 射线. 阴极形状决定了脉冲 X 射线的均匀性, 圆盘状阴极上所有点均可能发射电子, 电子束的均匀度较高. 但产生 X 射线时, 圆盘上各点发射的电子产生的 X 射线会在中心处叠

加, 导致中心能量明显强于四周, 均匀性较差, 如图 7(c) 所示. 圆环阴极将环设置在阴极外侧, 环处电场集中, 仅环发射电子, 有效抑制中心处 X 射线能量, 提高均匀性. 仿真计算相同阴极尺寸和相同阻抗下圆盘阴极和圆环阴极产生 X 射线的均匀性, 在阳极靶后 10 cm 处 X 射线能注量分布如图 7(c) 所示, 圆环阴极产生 X 射线的均匀性优于圆盘阴极. 考虑二极管绝缘问题和产生脉冲 X 射线的均匀性, 设计二极管阴极为双环结构, 通过增加表面电场增强系数, 提高阴极表面发射均匀性. 圆盘阴极与双环阴极如图 7(a) 和图 7(b) 所示.

### 3.4 X 射线二极管的阳极靶选择

电子入射阳极靶, 与阳极材料的原子核接近, 速度会迅速降低, 发生韧致辐射, 产生 X 射线. 由韧致辐射引起的电子辐射能量损失率可由下式计算 [8]:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_e^2c^4} \left( 4 \ln \frac{2E}{m_e c^2} - \frac{4}{3} \right), \quad (1)$$

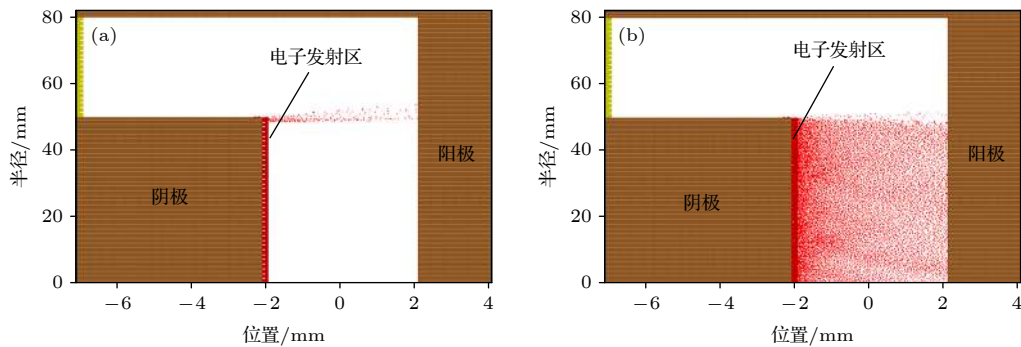


图 6 二极管间隙电子图像 (a) 电子初始发射; (b) 电子大面积均匀发射

Fig. 6. Electron image of diode gap: (a) Initial emission; (b) large-area uniform emission.

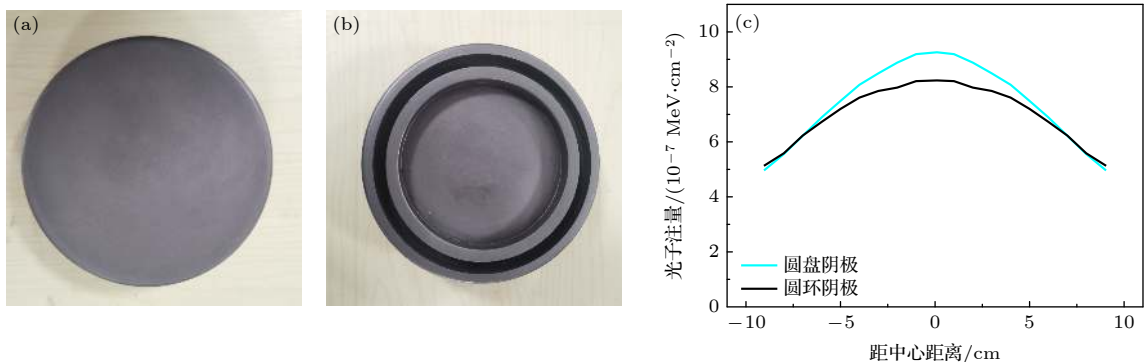


图 7 两种阴极结构及两种结构产生 X 射线的均匀性 (a) 用于产生电子束的圆盘阴极; (b) 用于产生 X 射线的双环阴极; (c) 阳极靶后 10 cm 处由圆盘和圆环阴极产生 X 射线的均匀性

Fig. 7. Two kinds of cathode structure and the uniformity of X-ray: (a) Disk cathode for electron beam; (b) double-ring cathode for X-ray; (c) uniformity of X-ray generated by disk and ring cathode at 10 cm behind the anode.

其中  $dx$  为电子入射阳极靶的单位长度;  $E$  为入射电子能量, 单位 MeV;  $Z$  为阳极靶材料的原子序数;  $N$  为阳极靶材料单位体积内的原子数;  $m_e$  为电子质量;  $e$  为电子电荷;  $c$  为光速. 由 (1) 式看到, 对于固定入射能量的电子, 阳极靶材料原子序数越大, 由韧致辐射引起的电子辐射能量损失越大, 产生 X 射线的强度越高, 靶的转换效率越高. 阳极靶厚度同样对 X 射线转换效率影响较大, 厚靶会吸收更多能量, 降低转换效率, 因此, 将靶厚度控制在微米量级. 靶材料需要具有良好的延展性和耐高温性能, 常用的靶材料有金属钽等<sup>[9]</sup>, 仿真得到金属钽不同厚度时韧致辐射产生的光子总能量如图 8 所示.

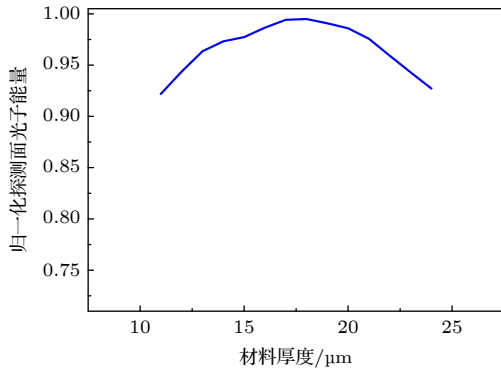


图 8 韧致辐射产生的光子总能量随钽靶厚度的变化  
Fig. 8. Curve of photon energy by bremsstrahlung with tantalum target thickness.

根据仿真结果, 钽厚为 17  $\mu\text{m}$  时, 韧致辐射的转换效率最大, 同时在厚度为 15—20  $\mu\text{m}$  的范围内, 效率相近, 考虑到加工技术原因, 选用 20  $\mu\text{m}$  的钽作为阳极转换靶. 在钽膜后加聚乙烯膜, 在不影响 X 射线强度的前提下吸收辐射场中的电子. 在后续 X 射线的效应研究中, 可以有效地减小电子对效应物的作用, 便于考察 X 射线的影响.

#### 4 运行参数和脉冲电子束、脉冲 X 射线测量系统

为了获得系统各部分的运行状态, 建立了全套的测量系统. 研制了贴片式电容分压器和微分电流环, 对 Marx 输出电压、脉冲形成线电压、二极管电压和二极管电流实时监测, 获得系统的运行参数. 测量系统的标定决定测量数据的准确性, 贴片式电容分压器分压比、微分电流环系数与结构参数有关, 搭建在线标定系统, 得到三个电容分压器的分

压比分别为  $60.5 \times 10^3$ ,  $60.2 \times 10^3$  和  $80.6 \times 10^3$ , 微分环灵敏度为  $14.3 \text{ A} \cdot \text{nV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 标定中引入的不确定度小于 10%.

为获取脉冲电子束和脉冲 X 射线的效应参数, 指导后续实验设计, 研制了可以同时获得电子束总能量和束流强度的全吸收法拉第筒, 用来获取 X 射线能谱的基于 PIN 探测器的能谱仪, 测量辐射场中电子数目占比的罗氏线圈, 监测 X 射线剂量和均匀度的剂量测量系统等. 测量系统工作在大电流、强电磁干扰的环境中, 具有衰减倍数大、信噪比大、抗电磁干扰等特点.

##### 4.1 脉冲电子束总能量和束流强度测量

电子束在传输过程中, 受到阳极膜吸收、传输损失等影响, 实验腔中的电子束流小于二极管电流. 实验腔中的电子束流强度和电子束总能量采用全吸收法拉第筒测量, 法拉第筒放置在阳极膜后, 吸收体收集穿过阳极膜的所有电子, 吸收体温度升高且与地电位之间产生电势差, 经信号电阻和热敏电阻得到束流强度和电子束能量, 测量原理如图 9 所示. 搭建标定系统, 对法拉第筒整体标定, 得到信号电阻阻值为 45.2  $\text{m}\Omega$ , 标定中引入的不确定度小于 10%.

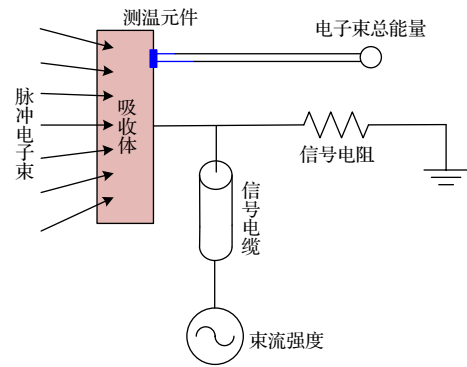


图 9 电子束流和总能量测量原理示意图  
Fig. 9. Schematic diagram of electron beam current and total energy measurement.

热敏电阻实时监测吸收体温度, 由实验前后的温度变化, 根据 (2) 式计算得到总能量,

$$Q_e = mC\Delta T, \quad (2)$$

其中  $Q_e$ ,  $m$ ,  $C$  和  $\Delta T$  分别为电子束总能量、吸收体质量、吸收体比热容和温升.

##### 4.2 基于吸收法的脉冲 X 射线能谱测量

吸收法是 X 射线能谱测量中一种代表性方法,

其测量原理是不同能量 X 射线穿过不同材料、不同厚度的吸收片后, 强度有一定衰减, 依据衰减程度得到能谱分布<sup>[10]</sup>. PIN 探测器的灵敏度高、时间响应快、动态范围大, 可以用于 X 射线能谱的测量<sup>[11]</sup>, 本系统中利用 PIN 探测器记录透过吸收片后的能量沉积, 结合不同能段 X 射线透过相应吸收片后能量沉积的理论值解谱.

能谱测量精度取决于吸收片的数量和厚度选取, 根据仿真计算, 系统产生的脉冲 X 射线能量在 200 keV 以内且大部分光子能量小于 100 keV, 能量较低, 采用对较低能量 X 射线分辨能力较好的铝吸收片<sup>[12]</sup>, 选择厚度 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 和 6.0 mm, 使其具有较好的分辨能力. 吸收片放在 PIN 探测器前端, 探测器采集经过不同吸收片衰减后的 X 射线强度数据<sup>[13]</sup>, 一个吸收片和一个探测器构成一个测量单元, 多个测量单元并列排列可以记录到一组衰减程度不同的 X 射线强度数据, 经过数值计算解谱, 得到能谱分布.

能谱测量探头放置于铅屏蔽盒中, 屏蔽二极管工作过程中产生的电磁波对测量信号的干扰. 屏蔽盒共有 9 个准直孔, 其中 2 个备用, 准直孔内依次放置吸收片、探测器、探测器的电路连接和电缆座, PIN 测量系统如图 10 所示.

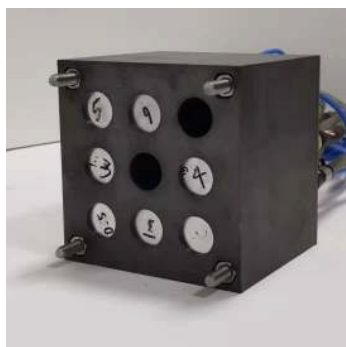


图 10 基于 PIN 的能谱测量系统

Fig. 10. Spectrometric system based on PIN.

### 4.3 脉冲 X 射线剂量和辐射场中电子数目的测量

X 射线总剂量、均匀性、能注量和辐射场中电子数目是了解系统性能的重要指标, 为此, 研制了剂量测量系统和罗氏线圈.

剂量测量系统主要由热释光剂量片组成, 在实验腔中径向平面内间隔 2 cm 呈辐射状布置, 既能得到 X 射线的剂量最大值和总剂量, 又能测量剂量的面分布, 判断 X 射线的均匀性. 由剂量和能谱

求得辐射场内单位面积的能量, 即能注量.

高能电子束打靶产生 X 射线的同时, 会有少量电子直接穿过阳极, 在对效应物进行 X 射线辐照时, 可能会受到光子与电子的共同作用, 干扰实验结果, 影响判断. 为更好地指导后续实验设计, 研制了罗氏线圈测量辐射场中电子数目. 由于辐射场中电子束流较小, 容易受到环境中电磁辐射的影响, 因此, 采用差分型罗氏线圈, 外加不锈钢外壳屏蔽, 消除由于 X 射线辐照产生电流的影响, 并将罗氏线圈的信号引出端与设备外壳绝缘, 抑制电磁辐射干扰. 搭建标定系统, 得到罗氏线圈灵敏度为 0.35 V/A, 标定中引入的不确定度小于 10%.

## 5 实验结果与分析

### 5.1 脉冲电子束测试结果与分析

二极管阴极安装圆盘状石墨阴极, 阳极安装镀铝的聚酯膜, 使系统工作在脉冲电子束状态. 三个电压探头分别测量 Marx 发生器对传输线的充电电压波形、脉冲形成线电压波形和输出线电压波形, 输出线电压扣除二极管电感压降后得到二极管电压, 微分探头 B-dot 测量二极管电流波形, 监测系统的运行状态. 阳极膜后安装全吸收法拉第筒, 测量电子束流强度和总能量, 系统的总体结构和探头布局如图 11 所示.

调节二极管阴阳极间距使阻抗达到 2  $\Omega$ . 示波器采集系统的运行数据, 依据数据特性初步处理, 实现对电压、电流、电子束流和电子束能量参数的有效识别和处理, 扣除本底噪声, 得到电压、电流、束流波形如图 12 所示.

实验中, 中储传输线充电达到 400 kV, 主开关和脉冲形成开关分别在中储传输线和脉冲形成线电压峰值处击穿, 形成二极管电压峰值 260.5 kV, 二极管电流峰值为 110.8 kA, 二极管电流半高宽为 31 ns, 二极管等效阻抗为 2.3  $\Omega$ . 电子束流强度峰值为 83.5 kA, 透过阳极膜后电流有一定损失.

测温装置采集的吸收体温度随时间变化如图 13 所示, 本系统中选用 PT100 热电阻作为测温元件, 该器件的温度分辨率为 0.1  $^{\circ}\text{C}$ , 热响应时间为 100 ms. 电子束入射后会通过石墨吸收体散热, 因此将实验后测得温度拟合回推, 得到实际温度最高值为 29.6  $^{\circ}\text{C}$ , 电子束入射前后温度变化为 4.9  $^{\circ}\text{C}$ , 根据吸收体的直径、厚度、密度和比热容, 依据 (2) 式计算电子束总能量为 629.5 J.



图 11 系统总体结构和测量探头布局

Fig. 11. Structure and probe layout of the system.

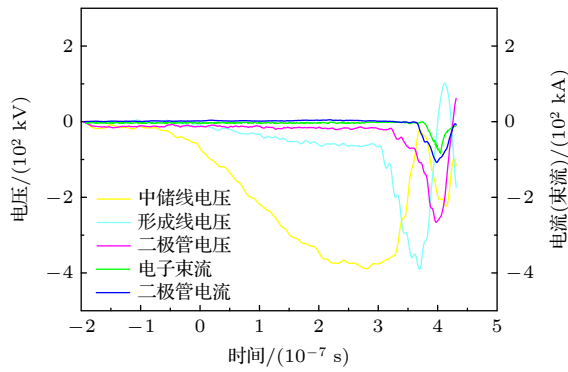


图 12 脉冲电子束状态的电压、电流、束流波形

Fig. 12. Voltage, current and beam of pulsed electron beam.

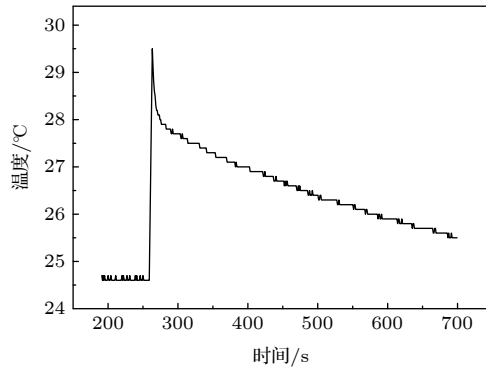


图 13 吸收体温度变化

Fig. 13. Absorber temperature.

## 5.2 脉冲 X 射线测试结果与分析

二极管阴极安装双环石墨阴极, 阳极安装钽膜, 并配合聚乙烯膜吸收电子, 工作在脉冲 X 射线状态. 剂量片放置在阳极靶后 20 cm 处, 在径向平面中呈一条直线放置, 每个剂量片间隔为 2 cm, 共 11 片, 监测剂量的面分布. 罗氏线圈放置在与剂量片同一位置处, 测量辐射场中的光子数与电子数之比. 能谱仪放置在真空腔外距离阳极靶后 1.5 m 处, 防止 PIN 探测器饱和, 系统总体结构和测量布局如图 11 所示.

能谱仪记录经吸收片衰减后的 X 射线强度数据如图 14 所示, 随着吸收片厚度的增加, 探测器测到的信号峰值、半高宽随之减小, 说明厚吸收片吸收低能光子更多, 符合光子在物质中的衰减规律.

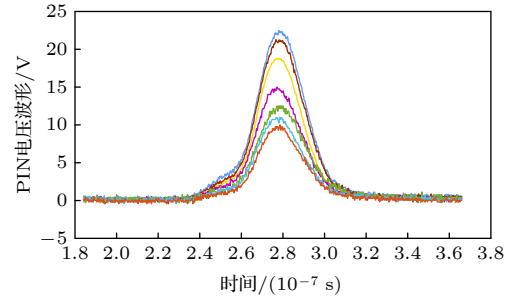


图 14 能谱仪测得波形

Fig. 14. Waveform measured by spectrometric system.

选取合适的能段离散化能谱为  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_m$ , 根据测得的探测器能量沉积  $T_i$  计算能谱分布, 有如下方程组<sup>[12]</sup>:

$$A_{11}I_1 + A_{12}I_2 + A_{13}I_3 + \dots + A_{1m}I_m = T_1,$$

$$A_{21}I_1 + A_{22}I_2 + A_{23}I_3 + \dots + A_{2m}I_m = T_2,$$

$$A_{31}I_1 + A_{32}I_2 + A_{33}I_3 + \dots + A_{3m}I_m = T_3,$$

...

$$A_{n1}I_1 + A_{n2}I_2 + A_{n3}I_3 + \dots + A_{nm}I_m = T_n, \quad (3)$$

$A_{ij}$  是仿真计算得到的能段  $m$  的光子在第  $n$  个探测器上产生的能量沉积, 将所有能段的光子在某一探测器上的能量沉积相加, 对应于实验测得的该探测器上能量沉积, 求解方程组得到能谱. 测量用 PIN 探测器的灵敏区域半径为 5 mm, 厚度为 0.3 mm, 记录实验中射线的能量沉积情况  $T_i$ .

根据能谱仪模型和吸收片厚度的选取, 利用蒙特卡罗程序计算不同能段光子透过不同厚度吸收片后在 PIN 探测器的能量沉积, 计算时设定 PIN

探测器半径为 5 mm, 厚度为 0.3 mm, 与实际的灵敏区域相同. 实验中选用的吸收片为 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 和 6.0 mm 的铝, 计算得到能量 200 keV 以内的光子透过吸收片后在 PIN 探测器中的平均能量沉积如图 15 所示, 在低能部分光子衰减后能量沉积的区分度较大, 形成了良好的衰减梯度.

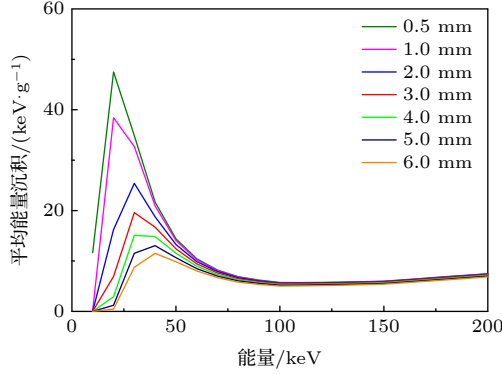


图 15 计算得到 PIN 探测器中平均能量沉积

Fig. 15. Energy deposition averaged over PIN detector by calculated.

在高压区吸收片对 X 射线的衰减随能量变化不明显, 因此 (3) 式的方程组是高度病态的, 不能直接求解得到能谱<sup>[14]</sup>. 采用 Waggner 等<sup>[15]</sup>提出的迭代扰动法求解能谱, 给定一个初始能谱, 对各能谱分量不断正负扰动改变, 将 (3) 式计算出的沉积能量  $T_{\text{calc}}$  与测量得到的沉积能量  $T_{\text{meas}}$  进行比较, 两者相对偏差  $D$  表示为

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\text{abs}[T_{\text{calc}}(i) - T_{\text{meas}}(i)]}{T_{\text{meas}}(i)}, \quad (4)$$

其中  $N$  为吸收片个数. 每次能谱的扰动  $\Delta I_j = I_j 2^k$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $k$  为扰动次数,  $I_j$  表示第  $j$  个能段, 当  $D$  最小时, 计算值与测量值的曲线最接近, 误差最小. 经反复迭代, 得到一组离散能谱分布如图 16 所示.

系统产生的 X 射线能量分布在 200 keV 以内, 平均能量为 67.2 keV. 能谱相对较软, 满足系统电磁脉冲的模拟研究.

X 射线剂量随半径的分布如图 17 所示, 测量面直径为 20 cm, 剂量片在实验腔中径向平面内间隔 2 cm 呈辐射状布置.

X 射线剂量在距离中心点 2 cm 附近具有最大值, 为 64.07 mGy, 在测量面边缘较小, 最小值 41.26 mGy, 最小值为最大值的 64.3%, 均匀性较好.

用测量面的平均剂量表征设备产生 X 射线的总剂量, 通过面积加权求出 X 射线的总剂量为 50.47 mGy, 依据能谱分布得到能注量为 1.1 mJ/cm<sup>2</sup>, 辐射场光子数目为  $3.4 \times 10^{13}$ .

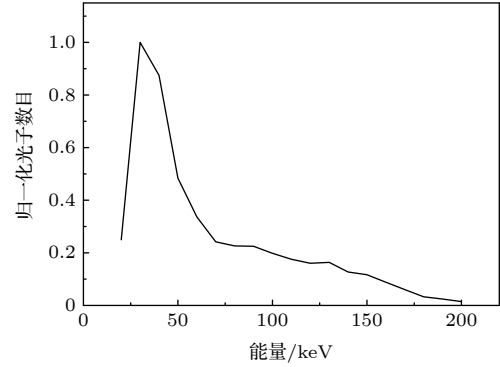


图 16 解谱得到的 X 射线能谱

Fig. 16. X-ray spectrum by spectrum unfolding.

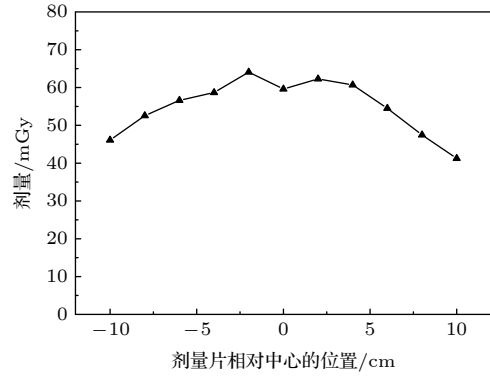


图 17 剂量随半径分布

Fig. 17. Distribution of dose with radius.

电子打靶发生韧致辐射产生 X 射线时, 会有少量电子透过阳极靶, 使辐射场中光子和电子并存. 为减小辐射场中的电子数目, 在钨膜后加聚乙烯膜, 吸收透过阳极膜后的电子<sup>[16]</sup>. 罗氏线圈测得透过阳极靶后的电子电流如图 18 所示, 在射线产生的 60 ns 内均可以测得较小的电流信号, 对该时间段内的电流积分得到总电荷量为 1.14 nC, 辐射场内电子数目为  $7.1 \times 10^9$ , 电子数占比仅 0.02%, 说明辐射场内的电子极少, 达到预期目的. 对效应物进行辐射实验时, 有效减小电子带来的影响, 有利于考察 X 射线的效应.

当 X 射线照射电子系统的金属外壳时, 由于光电效应、康普顿效应等物理过程会产生大量电子, 形成空间电流, 激发出一个强瞬变电磁场, 产生系统电磁脉冲<sup>[3,4,17,18]</sup>. 系统电磁脉冲效应会影响

系统中的电缆及各种元器件, 干扰和破坏系统正常工作 [19,20]. 然而研究仍多停留在数值模拟, 理论结果和模型需要进行实验验证 [5]. 本系统光子平均能量小于 100 keV, 辐射场的均匀性良好, 电子份额较小, 可以用于系统电磁脉冲效应的模拟中 [21,22].

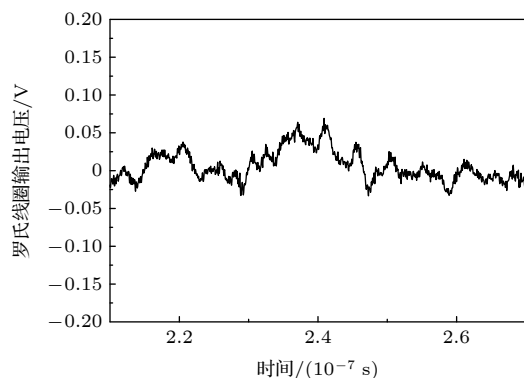


图 18 辐射场内电子电流波形  
Fig. 18. Current in radiation field.

## 6 结 论

本文研制了一套电压峰值 200 kV 的脉冲电子束和脉冲 X 射线辐照系统, 负载二极管等效阻抗  $2\ \Omega$ , 实现了对系统运行参数和效应参数的全方位监测. 系统采用对 Marx 发生器输出脉冲信号二次压缩的方式, 配合径向绝缘型二极管和不同的阴极、阳极结构, 产生脉冲电子束或脉冲 X 射线. 本系统为单次工作模式, 产生的脉冲电子束束流强度达到 83.5 kA, 总能量为 629.5 J, 通过简便的更换阴极和阳极, 即可在脉冲电子束和脉冲 X 射线工作状态中灵活切换. 本系统产生的脉冲 X 射线平均能量为 67.2 keV, 总剂量为 50.47 mGy, 在直径 20 cm 的辐射区域内剂量最小值为最大值的 64.3%, X 射线辐射场内电子占比仅为 0.02%.

系统配套设计了全吸收法拉第筒, 实现了电子束束流强度和总能量的测量, 研制了基于吸收法的能谱测量系统和剂量监测系统, 获得脉冲 X 射线的能谱、剂量、均匀性、能注量等关键指标. 通过差分式罗氏线圈的设计, 解决了复杂电磁环境中电子束流的测量问题. 在钽阳极靶后配合聚乙烯膜吸收电子, 使辐射场中的电子数占比极小, 有效避免 X 射线效应实验中电子的影响.

该辐射系统结构紧凑, 工作方式切换灵活, 系统的成功研制为脉冲功率技术、系统电磁脉冲效应、生物辐射效应等提供了多功能的实验平台. 后

续将基于该系统开展应用研究, 针对具体研究内容需求对系统进行完善, 并进一步优化脉冲电子束和脉冲 X 射线的参数, 研制重频脉冲 X 射线和脉冲电子束辐射系统, 提升总能量, 使其更好地应用于生物效应、辐射成像、材料加工与改性、消毒灭菌等领域的研究中.

## 参考文献

- [1] Wang J J 2016 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [王晶晶 2016 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [2] Wang B, Liu H L, Qi Z W, Zhang G P, Wang X Y 2018 *Hot Working Technology* **47** 19 (in Chinese) [王波, 刘海浪, 祁正伟, 张国培, 王小宇 2018 *热加工工艺* **47** 19]
- [3] Ribiere M, Dortan F D G D, Delaunay R, Aubert D, Dalmeida T 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 1722
- [4] Higgins D F, Lee K S H, Marin L 1978 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **26** 14
- [5] Chen J, Wang J, Tao Y, Chen Z, Wang Y, Niu S 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 820
- [6] Liu X S 2007 *High Pulsed Power Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) pp178–183 (in Chinese) [刘锡三 2007 高功率脉冲技术 (北京: 国防工业出版社) 第 178—183 页]
- [7] Qiu A C 2016 *Pulsed Power Technology Application* (Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press) p39 (in Chinese) [邱爱慈 2016 脉冲功率技术应用 (西安: 陕西科学出版社) 第 39 页]
- [8] Wu Z H 1997 *Experimental methods of nuclear physics* (Beijing: Atomic Energy Press) p49 (in Chinese) [吴治华 1997 原子核物理实验方法 (北京: 原子能出版社) 第 49 页]
- [9] He H, Yu H J, Wang Y, Dai W H 2019 *High Pow. Las. Part. Beam.* **31** 125102 (in Chinese) [何辉, 禹海军, 王毅, 戴文华 2019 *强激光与粒子束* **31** 125102]
- [10] Manciu M, Manciu F S, Teodor V, Nes E, Waggenger R G 2009 *J. X-Ray Sci. Technol.* **17** 85
- [11] Ouyang X P, Li Z F, Zhang G G, Huo Y K, Zhang Q M, Zhang X P, Song X C, Jia H Y, Lei J H, Sun Y C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1502 (in Chinese) [欧阳晓平, 李真富, 张国光, 霍裕昆, 张前美, 张显鹏, 宋献才, 贾焕义, 雷建华, 孙远程 2002 *物理学报* **51** 1502]
- [12] Su Z F, Lai D G, Qiu M T, Ren S Q, Xu Q F, Yang S 2020 *High Pow. Las. Part. Beam.* **32** 035005 (in Chinese) [苏兆锋, 来定国, 邱孟通, 任书庆, 徐启福, 杨实 2020 *强激光与粒子束* **32** 035005]
- [13] Su Z F, Yang H L, Qiu A C, Sun J F, Cong P T, Wang L P, Lei T S, Han J J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7729 (in Chinese) [苏兆锋, 杨海亮, 邱爱慈, 孙剑锋, 丛培天, 王亮平, 雷天时, 韩娟娟 2010 *物理学报* **59** 7729]
- [14] Baird L C 1981 *Med. Phys.* **8** 319
- [15] Waggenger R G, Blough M M, Terry J A, Chen D, Lee N E, Zhang S, McDavid W D 1999 *Med. Phys. (Lancaster)* **26** 1269
- [16] Lai D G, Zhang Y M, Li J X, Su Z F, Zhang Y Y, Ren S Q, Yang L, Yang S 2013 *High Pow. Las. Part. Beam.* **25** 1396 (in Chinese) [来定国, 张永民, 李进玺, 苏兆峰, 张玉英, 任书庆, 杨莉, 杨实 2013 *强激光与粒子束* **25** 1396]
- [17] Meng C, Xu Z, Jiang Y, Zheng W, Dang Z 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **10** 2618
- [18] Xu Z, Meng C, Jiang Y, Wu P 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 425

- [19] Zhou K M, Wang Y, Deng J H 2014 *High Pow. Las. Part. Beam.* **26** 073207 (in Chinese) [周开明, 王艳, 邓建红 2014 强激光与粒子束 **26** 073207]
- [20] Ma L, Cheng Y H, Wu W, Li J X, Zhu M, Li B Z, Zhao M, Guo J H 2012 *High Pow. Las. Part. Beam.* **24** 2915 (in Chinese) [马良, 程引会, 吴伟, 李进玺, 朱梦, 李宝忠, 赵墨, 郭景海 2012 强激光与粒子束 **24** 2915]
- [21] Summa W J, Gullickson R L, Hebert M P, Rowley J E, Leon J F, Vitkovitsky I 1995 *Pulsed Power Conference* (New Mexico: Albuquerque)
- [22] Ware K D, Bell D E, Gullickson R L, Vitkovitsky I 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1733

## Development of 200 kV multi-function pulsed radiation system

Lü Ze-Qi   Xie Yan-Zhao<sup>†</sup>   Gou Ming-Yue   Chen Xiao-Yu  
Zhou Jin-Shan   Li Mei   Zhou Yi

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

( Received 29 March 2021; revised manuscript received 24 May 2021 )

### Abstract

A multi-functional pulsed radiation system with a peak voltage of 200 kV, an impedance of 2  $\Omega$ , and a full width at half maximum (FWHM) of 30 ns is developed. The system can be switched flexibly in two states of generating pulsed electron beam and pulsed X-ray by changing the cathode and anode. It consists of a pulse power driving source, a vacuum diode, and an experimental cavity. A Marx generator, a high energy storage water transmission line, and two pulse compression switches are utilized to generate a high voltage on diode. An effector can be placed in the experimental cavity which has the same vacuum as diode. An insulation structure of transmission line and a diode are optimized to guide in system design. The system can provide a multi-functional experimental platform for investigating pulse power technology, system-generated electromagnetic pulse, biological radiation effect, etc.

The Marx generator generates a high-voltage pulse with hundreds of nanoseconds in FWHM and hundreds of kilovolts in peak value. The pulse is compressed by the main switch and pulse forming switch and then loaded to the diode. Electrons are emitted from diode cathode under the high-voltage pulse and accelerated in the gap. The electrons are extracted directly or converted into X-ray through the anode. Aluminized polyethylene is used as an anode when pulsed electron beam is generated, and tantalum film is used when pulsed X-ray is generated. Working state can be switched by changing the cathode and anode of diode.

The result shows that a current of 83 kA pulsed electron beam and an average energy of 67 keV X-ray are generated. Pulsed X-ray has good uniformity and low electron proportion (0.02%). In order to monitor the operation state and output parameter of the system comprehensively, a complete measurement system is established. Three capacitive voltage dividers are set at the beginning of transmission line, the end of pulse forming line, and the end of output line, while a B-dot current monitor is set at the diode. A Faraday cup is developed to measure the current intensity and the total energy of pulsed electron beam. For energy spectrum, dose and electron proportion, the measurement system composed of pulsed X-ray including spectrometric system, dose system and Rogowski Coil is build.

**Keywords:** multi-function, diode, pulsed electron beam, pulsed X-ray

**PACS:** 52.59.-f, 52.70.La, 41.85.Qg

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210583

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yzxie@xjtu.edu.cn