



·脉冲功率技术·

1 MV 阳极杆箍缩二极管数值模型实验研究*

冯元伟^{1,2}, 马 勋¹, 屈俊夫^{1,2}, 李洪涛¹

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 阳极杆箍缩二极管(RPD)具有小焦斑、高亮度的特点,是闪光 X 光机领域的研究热点。基于 Marx 发生器和脉冲形成线技术路线产生 1 MV 高电压脉冲驱动 RPD,开展了不同结构参数二极管实验研究。基于 RPD 物理过程的数值模型,分析了结构参数对箍缩物理过程的影响。研究表明在 1 MV 电压下,RPD 阴极等离子体平均扩散速度、阳极等离子体平均扩散速度分别为 2, 0.6 cm/ μ s 时,该模型可以较好地描述实验结果。在阳极杆直径一定的情况下,二极管数值模型表明减小阴极孔径可以使二极管更快进入强箍缩状态,但过小的阴极孔径会导致二极管间隙过早闭合。

关键词: 闪光照相; 闪光 X 光机; 阳极杆箍缩二极管; 阻抗模型

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210136

Experiment and analysis on mathematical model of 1 MV rod pinch diode

Feng Yuanwei^{1,2}, Ma Xun¹, Qu Junfu^{1,2}, Li Hongtao¹

(1. Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: Rod pinch diode (RPD) has the characteristics of small focal spot and high brightness, which is a research hotspot in the field of flash radiography. In this paper, based on the Marx generator and pulse forming line technology route, 1 MV high voltage pulse driving RPD is generated, and the experimental research of diode with different structure parameters is carried out. Based on the numerical model of RPD physical process, the ratio of cathode to anode aperture is a complex variable related to the average diffusion velocity of cathode and anode plasma, which is also the main parameter affecting the radiation performance of RPD. The results show that the average diffusion velocity of RPD anode plasma is about 0.6 cm/ μ s at 1 MV voltage. When the anode rod diameter is fixed, the diode numerical model shows that reducing the cathode aperture can make the diode enter the strong pinch state faster, but too small cathode aperture will lead to premature closure of the diode gap.

Key words: flash radiography; flash X-ray generator; rod pinch diode; numerical model

闪光 X 光机是获得物体高速运动过程中特定时刻准静态图像的重要手段^[1-4]。二极管是闪光 X 光机的核心单元,在高压脉冲加载下二极管阴极通过爆炸发射产生强流电子束,作用在阳极靶上以韧致辐射形式产生强辐射 X 射线。其中阳极杆箍缩二极管(RPD)具有光源焦斑小、亮度高等优点,成为国内外的研究热点^[5-6]。基于 PIC 方法开展 RPD 模拟,有助于研究电子束在二极管中箍缩发展过程,但该方法一般不考虑阴、阳电极等离子体扩散过程对二极管特性的影响,因此不能反应 RPD 阻抗的动态变化过程^[7-10]。一般认为阴、阳极表面的等离子体是具有无限发射能力的鞘层,在 RPD 工作过程中,随着阴、阳电极等离子体的扩散,阳极等效直径变大、阴极孔等效直径变小,基于现有的 RPD 数值模型,考虑到阴、阳电极等离子体扩散过程对二极管等效结构参数的影响,在 1 MV 脉冲功率装置上开展了 RPD 实验研究,验证并分析了结构参数对二极管箍缩转换时刻、间隙闭合、二极管能量耦合等过程的影响,为优化二极管设计提供数值计算依据。

* 收稿日期:2021-03-08; 修订日期:2021-05-01

基金项目:军科委基础加强计划技术领域基金项目(2019-JCJQ-JJ-422)

作者简介:冯元伟(1984—),男,硕士,工程师,研究方向为脉冲功率技术及其应用。

通信作者:李洪涛(1968—),男,博士,研究员,研究方向为脉冲功率技术及其应用。

1 阳极杆箍缩二极管数值模型

RPD 基本结构如图 1(a) 所示, r_a 为阳极杆半径, 单位 mm; r_c 为阴极孔半径, 单位 mm; D 为阴阳极间隙, 单位 mm; L 为阴极盘厚度, 单位 mm; L_{rod} 为阳极杆伸出阴极盘长度, 单位 mm。

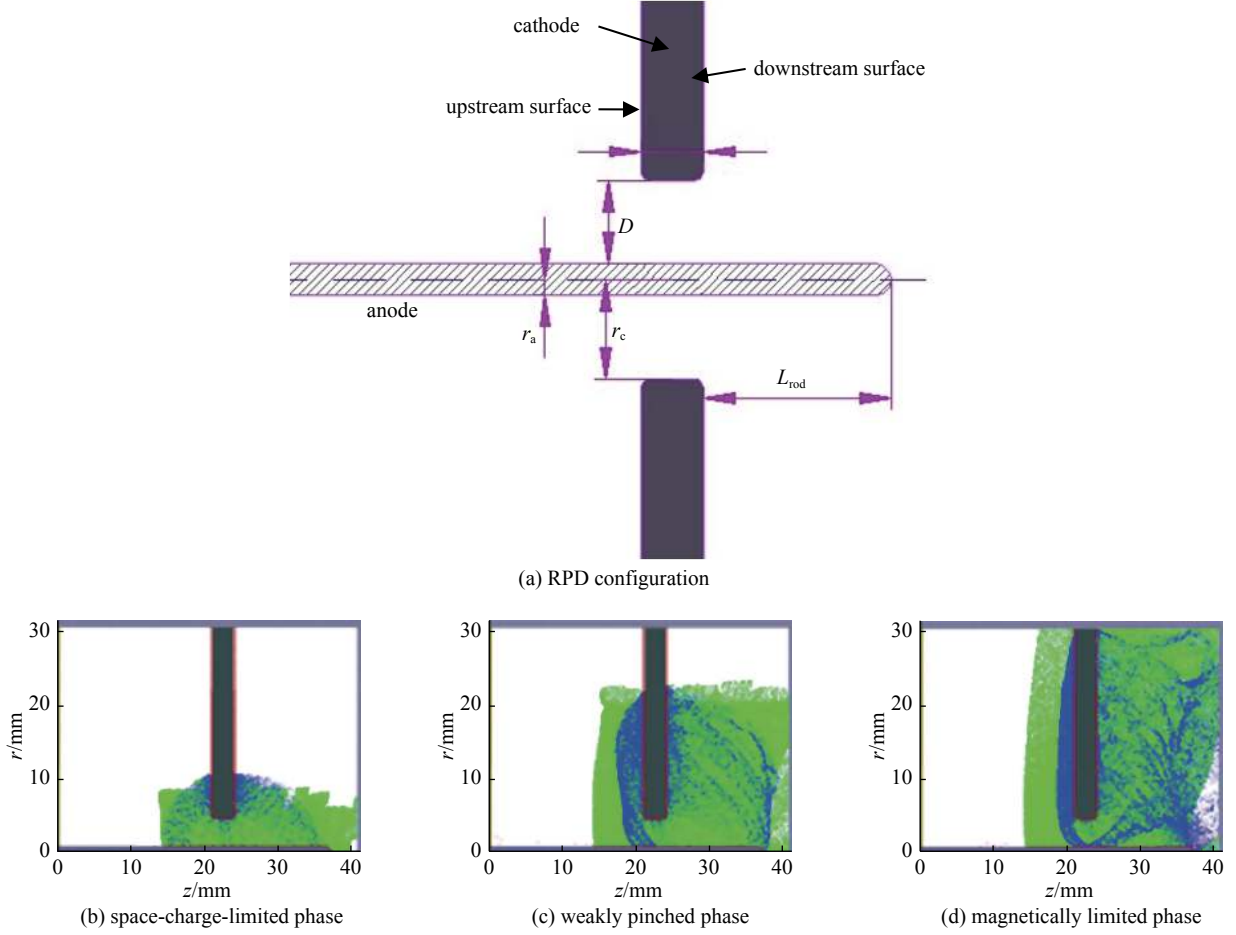


Fig. 1 Schematic illustration of the rod pinch diode (RPD)

图 1 RPD 基本结构及电子箍缩过程

RPD 的电子箍缩物理过程如图 1(b)~(d) 所示, 当阳极杆上加载足够强幅值的正极性电压并经过一定爆炸发射时延后, 阴极开始发射电子, RPD 进入非相对论空间电荷流阶段 (SCL)。由于阴、阳电极等离子体扩散效应以及加载电压的提高, RPD 电流开始增长的同时阳极杆沉积能量密度增大, 当阳极离子流达到足够浓度使得电子电流和 RPD 总电流显著提高, RPD 开始进入双向流 SCL 阶段 (bipolar SCL), 如图 1(b) 所示 (蓝色: 电子束, 绿色: 阳极离子流)。当 RPD 电流增长到一定程度时, 电子运动轨迹不仅受到 RPD 空间电场的影响, 在束流自磁场力作用下电子运动轨迹开始轴向偏转, RPD 进入弱箍缩阶段 (WP), 如图 1(c) 所示。随着磁场力的增大, 电子拉莫尔半径小于或与二极管电极间距 D 相当时, RPD 进入磁绝缘强箍缩阶段 (ML), 如图 1(d) 所示。

基于国外 RPD 数值模型研究结果^[11-15], RPD 物理过程数值模型进一步描述如下

$$I_{LB}(t) = I_\alpha \frac{2\sqrt{2}}{9} \frac{L_{eff}(t)}{r_a(t)\kappa(t)^2} U(t)^{3/2} \approx 5.36 \frac{L_{eff}(t)}{r_a(t)\kappa(t)^2} \left(\frac{V(t)}{0.511} \right)^{3/2} \quad (1)$$

$$\kappa = -z - 0.4z^2 - 0.0917z^3 - 0.0144242z^4 - 0.0016793z^5 - 0.00016122z^6 \quad (2)$$

$$z = \ln[r_c(t)/r_a(t)] \quad (3)$$

式中: I_{LB} 是由 Child-Langmuir (CL) 定律非相对论空间电荷流, 单位 kA。

$$I_c/I_{LB} = 1.865 - 0.128 \frac{V(t)}{0.511} + 0.0219 \left(\frac{V(t)}{0.511} \right)^{3/2} + 0.343z + 0.0328z^3 \quad (4)$$

$$I_i/I_e = 0.0233 \left(1 + 0.5 \frac{V(t)}{0.511} \right)^{1/2} + 0.00869 \left(1 + 0.102 \frac{V(t)}{0.511} \right)^{1/2} z \quad (5)$$

$$I_{SCL} = I_i + I_e \quad (6)$$

式中: I_e , I_i 分别是电子电流和离子电流, 单位 kA; I_{SCL} 为空间电荷电流, 单位 kA。

$$I_{crit} = \frac{8.5\alpha(t)[\gamma(t)^2 - 1]^{1/2}}{\ln[r_c(t)/r_a(t)]} \quad (7)$$

$$\alpha(t) = 2.1 + 0.033[r_c(t)/r_a(t) - 1] \quad (8)$$

$$\gamma(t) = 1 + \frac{V(t)}{0.511 \text{ MeV}} \quad (9)$$

$$r_c(t) = r_{c0} - v_c(t - \Delta\tau_1) \quad (10)$$

$$r_a(t) = r_{a0} + v_a(t - \Delta\tau_2) \quad (11)$$

式中: I_{crit} 为临界箍缩电流与结构因子 $\alpha(t)$ 的乘积, 单位 kA; $V(t)$ 为二极管电压, 单位 MV; L_{eff} 为阴极等效厚度 ($L_{eff} = 2D + L$), 表征阴极电流发射能力; r_{a0} 为阳极杆几何半径 (即 r_a), 单位 mm; r_{a0} 为阴极孔几何半径 (即 r_c), 单位 mm; v_a 为阳极等离子体平均扩散速度, 根据二极管工作电压和结构的不同, 其值一般为 $0.5 \sim 3 \text{ cm}/\mu\text{s}$; v_c 为阴极等离子体平均扩散速度; 对于工作电压在 1 MV 左右的 RPD, 阴极等离子体平均扩散速度一般为 $2 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ^[11]; $\Delta\tau_1$ 为阴极发射时延, 单位 ns; $\Delta\tau_2$ 为双向电流出现的时刻, 一般取 10 ns。

数值模型中, 随着 RPD 物理过程的发展, 阴阳极孔径比 $r_c(t)/r_a(t)$ 是一个与阴、阳极等离子体平均扩散速度有关的变量, 也是影响 RPD 电流特征的重要参数。

2 实验与讨论

2.1 实验装置介绍

在图 2 所示的脉冲驱动器上开展 RPD 实验。脉冲驱动器由 Marx 发生器、水介质脉冲形成线、油介质开关、水介质脉冲传输线, 以及充电、触发、控制、测量单元等组成。其中, Marx 发生器为正负充电结构, 包含 18 只 $1 \mu\text{F}/100 \text{ kV}$ 电容器和 9 只场畸变气体开关; 水介质形成线阻抗 4Ω , 电长度 54 ns, 水介质传输线阻抗 10Ω , 电长度 66 ns。

RPD 真空实验腔为径向绝缘结构, 如图 3 所示, 脉冲驱动源产生的高压脉冲通过脉冲传输线 (PTL) 直接驱动 RPD; 电压探头为 D-dot 结构, 位于水介质传输线外壳末端; 电流探头为 B-dot 结构, 共 3 个, 沿角向均匀布置在二极管的阴极支撑盘上。

2.2 实验结果分析

实验采用的 RPD 结构参数为: 阳极杆直径 1.5 mm, 阳极杆伸出阴极孔径距离 10 mm, 阴极厚度 3 mm, 阳极材料为高纯钨, 阴极材料为高密度石墨, 阴极孔径分别为 4.5, 9.0, 15.0, 18.0 mm, 实验获得二极管电压、电流波形以及在实验电压加载波形下由式 (6), (7) 计算获得的二极管空间电荷流、强箍缩阶段电流分别如图 4(a)~(d) 所示, 其中实验获得的电流波形为阴极支撑盘上 3 个角向均布电流探头的平均值。

数值计算中, 阴极等离子体平均扩散速度取值为 $2 \text{ cm}/\mu\text{s}$, 阳极等离子体平均扩散速度为 $0.6 \text{ cm}/\mu\text{s}$, 计算得到的 I_{SCL} 波形和 I_{crit} 波形式与实验测量得到的电流波形基本一致, 因此式 (1)~(11) 的数值模型较好地描述了 RPD 实验结果, 箍缩时刻结果如表 1 所示。

进一步地, 图 4 实验结果对应的二极管功率、阻抗波形如图 5(a)~(d) 所示, 二极管能量沉积及辐射剂量结果如表 1 所示。

由图 4 可见, RPD 电压加载初期为空间电荷流 I_{SCL} (红色), 随着加载电压和电流的增大, RPD 由空间电荷流向强箍缩状态 I_{crit} (绿色) 转变, 转变时刻 (pinch time) 是空间电荷流和强箍缩电流交点处, 即强箍缩开始时刻。

随着阴极孔径变大, 由于阴极表面电场强度变小, 阴极发射电流变小, 需要较长时间形成足够强度的阳极离子流, 并且随着阴阳电极等离子体扩散到一定程度才能在阴极上形成足够强场, 产生满足箍缩要求的强电流, 因此

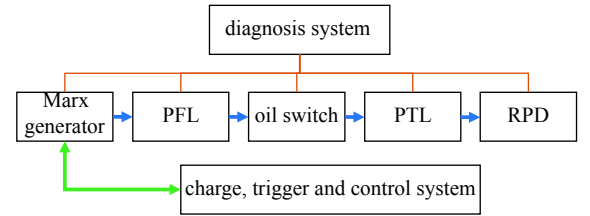


Fig. 2 Schematic illustration of the driver

图 2 脉冲驱动器组成框图

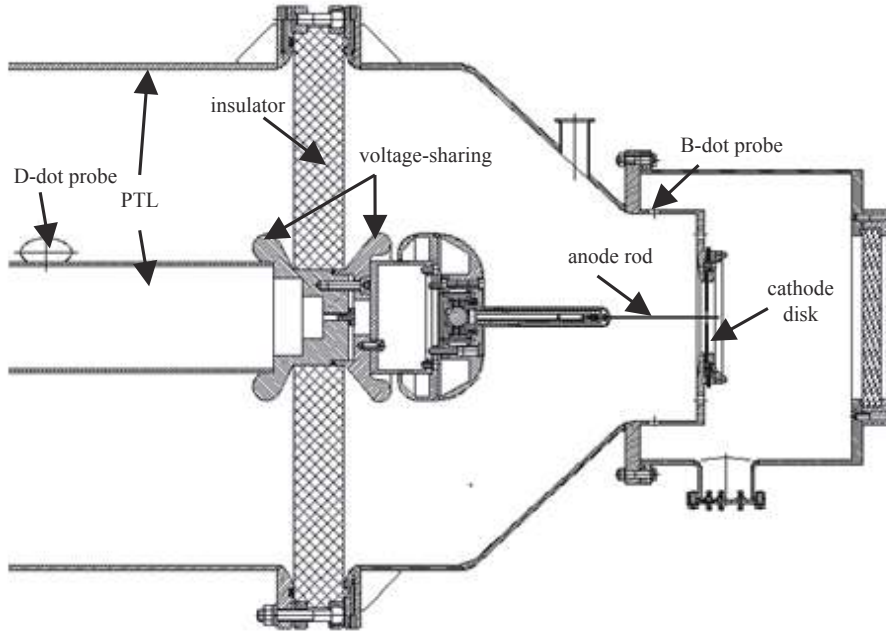


Fig. 3 Top view of the experimental RPD

图 3 实验 RPD 真空室结构

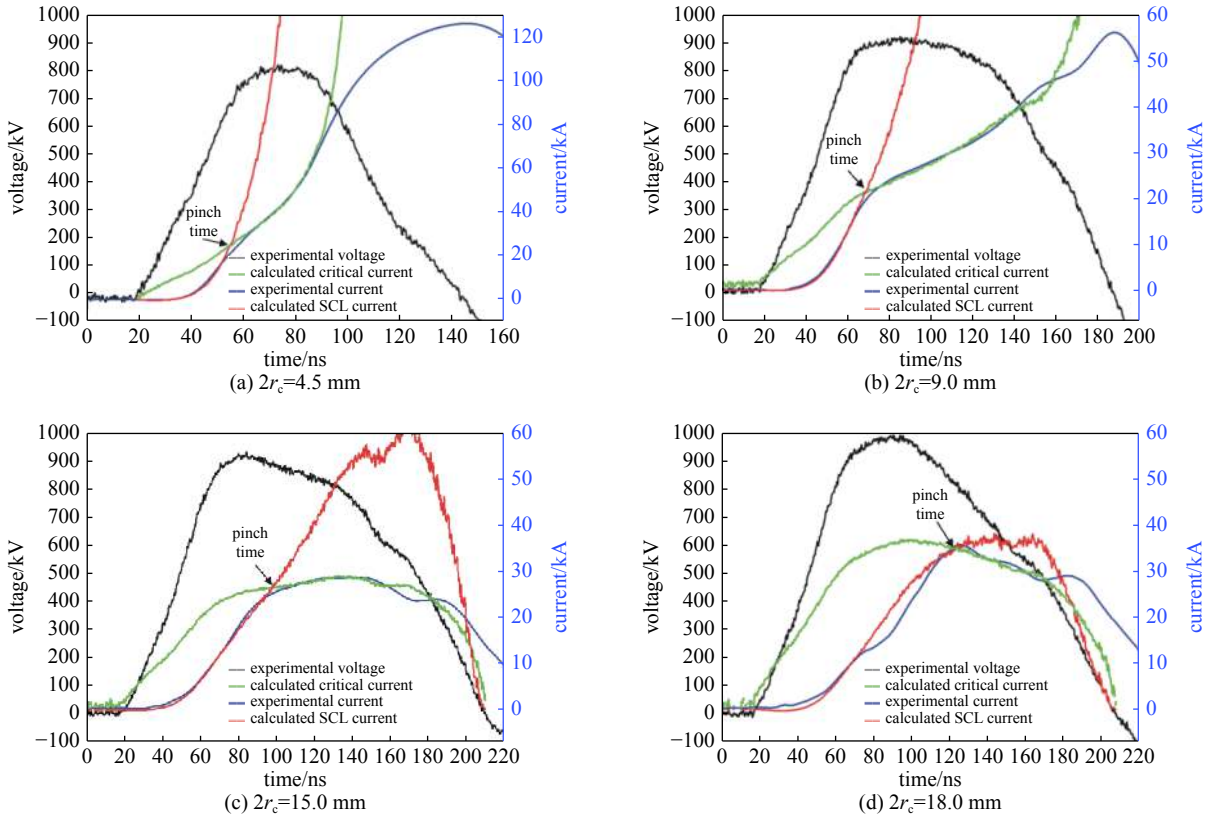


Fig. 4 Waveforms of RPD experiments and calculation with various parameters

图 4 RPD 实验和计算结果比较

RPD 达到强箍缩状态所需的时间变长。当阴极孔径分别为 4.5, 9.0, 15.0, 18.0 mm 时, RPD 从电压加载到进入箍缩状态所需时间分别约为 35, 50, 80, 105 ns, 相应的二极管电压脉冲底宽分别为 120, 160, 190, 190 ns。

减小阴极孔径虽然可以加快 RPD 进入箍缩状态的时间, 但由于阴阳电极等离子体的扩散, 过小的间隙容易导致二极管过早闭合。由图 1 可见, 二极管阴极进入爆炸发射状态后, 电子束能量主要沉积在阴阳电极间隙内, 使得二极管阻抗迅速下降, 如图 1(b) 所示。但随着二极管电流增加到一定程度, 电子束在磁场作用下开始沿着阳极杆

表 1 实验结果

Table 1 Results of experiments

type	$2r_c/\text{mm}$	$2r_a/\text{mm}$	L_{rod}/mm	pinch time/ns	pulse width of V_d/ns	coupling energy/kJ	dose@1 m/R
a	4.5	1.5	10	35	120	2.75	0.83
b	9.0	1.5	10	50	160	2.85	0.93
c	15.0	1.5	10	80	190	3.15	0.98
d	19.0	1.5	10	105	190	2.52	0.79

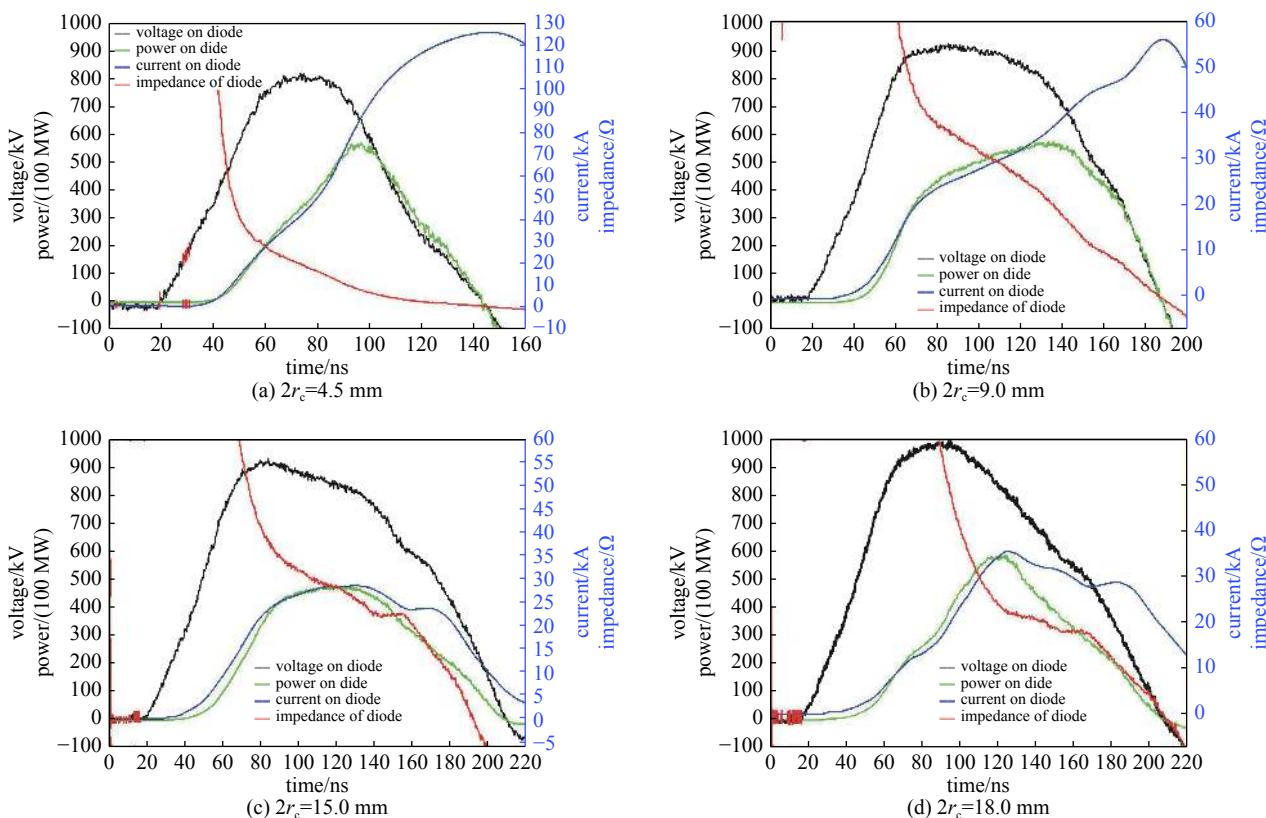


Fig. 5 Power and impedance of RPD with various parameters

图 5 RPD 功率和阻抗特性

轴向漂移,减小了在电极间隙内的等离子体密度,如图 1(c)所示,二极管阻抗下降明显变慢。

由图 5 的二极管动态阻抗波形可见二极管阻抗下降率由快变慢的转换时刻与图 4 分析的箍缩转换开始时刻基本一致。对功率曲线积分,耦合至二极管的能量分别约为 2.75, 2.85, 3.15, 2.52 kJ; 采用 LiF 热释光剂量片在光源正前方 1 m 处测量辐射剂量,对应的 1 m 处辐射剂量分别为: 0.83, 0.93, 0.98, 0.79 R, 从提高 RPD 辐射剂量的需求出发, 1 MV 级的 RPD 优化的孔径比范围是 6~10。由实验结果可知, 增强阴极发射能力使其快速进入箍缩状态, 同时保持二极管阻抗稳定性是进一步优化二极管设计的重要方向。

3 结论

阳极杆箍缩二极管具有小焦斑、高亮度特点,是闪光 X 光机领域的研究热点。深入理解其物理过程可以进一步提高其辐射性能,基于 PIC 方法有助于理解二极管电子运动过程,但该方法较难描述 RPD 阻抗的动态变化过程。本文考虑到阴、阳电极等离子体扩散对阻抗特性的影响,基于建立的 RPD 数值模型,并开展 1 MV 电压 RPD 实验研究,研究表明在 1 MV 电压下,RPD 阴极等离子体平均扩散速度、阳极等离子体平均扩散速度分别为 2, 0.6 cm/ μs 时。该数值模型很好地描述了 RPD 实验结果。在阳极杆直径一定的情况下,减小阴极孔径可以使二极管更快进入强箍缩状态,但过小的阴极孔径会导致二极管间隙过早闭合。结合实验结果,针对 RPD 二极管电流发射特点,下一步拟采取阴极局部电场增强、复合阳极等结构,使 1 MV 电压下二极管能更快的进入箍缩状态且保持阻抗稳定性。

参考文献:

- [1] Maenchen J, Cooperstein G, O'Malley J, et al. Advances in pulsed power-driven radiography systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(7): 1021-1042.
- [2] Ma Xun, Deng Jianjun, Liu Hongwei, et al. Development of all-solid-state flash X-ray generator with photo conductive semiconductor switches[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 093307.
- [3] Goldsack T J, Bryant T F, Beech P F, et al. Multimegavolt multiaxis high-resolution flash X-ray source development for a new hydrodynamics research facility at AWE Aldermaston[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(1): 239-253.
- [4] 袁建强, 刘宏伟, 马勋, 等. 基于光导开关的固态脉冲功率源及其应用[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1807-1817. (Yuan Jianqiang, Liu Hongwei, Ma Xun, et al. Development and application of solid state pulsed power generators based on photoconductive semiconductor switches[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1807-1817)
- [5] 孙凤举, 邱爱慈, 杨海亮, 等. 感应电压叠加器驱动阳极杆箍缩二极管型脉冲X射线源[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 936-940. (Sun Fengju, Qiu Aici, Yang Hailiang, et al. Pulsed X-ray source based on inductive voltage adder and rod pinch diode for radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 936-940)
- [6] 陈林, 谢卫平, 邓建军. X射线闪光灯相杆箍缩二极管技术最新进展[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(4): 643-647. (Chen Lin, Xie Weiping, Deng Jianjun. Development of rod-pinch diode for flash X-ray radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(4): 643-647)
- [7] Miller C L, Welch D R, Rose D V, et al. Detailed simulation of the CYGNUS rod pinch radiographic source[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2507-2513.
- [8] Kwan T J T, Berninger M, Snell C, et al. Simulation of the Cygnus rod-pinch diode using the radiographic chain model[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(4): 530-537.
- [9] 高屹, 邱爱慈, 吕敏, 等. Rod-pinch二极管箍缩特性的数值模拟[J]. *核技术*, 2010, 33(8): 575-579. (Gao Yi, Qiu Aici, Lv Min, et al. Numerical simulations of beam-pinching characteristics in a rod-pinch diode[J]. *Nuclear Techniques*, 2010, 33(8): 575-579)
- [10] Rose D V, Welch D R, Oliver B V, et al. Coupled particle-in-cell and Monte Carlo transport modeling of intense radiographic sources[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(5): 3328-3335.
- [11] Cooperstein G, Boller J R, Comisso R J, et al. Theoretical modeling and experimental characterization of a rod-pinch diode[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(10): 4618-4636.
- [12] Neira E, Vega F. Solution for the space-charge-limited current in coaxial vacuum diodes[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 052117.
- [13] Greenwood A D, Hammond J F, Zhang P, et al. On relativistic space charge limited current in planar, cylindrical, and spherical diodes[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 072101.
- [14] Oliver B V, Genoni T C, Rose D V, et al. The impedance characteristics of a rod-pinch diode[C]//PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers. 2001: 458-461.
- [15] Oliver B V, Ottinger P F, Genoni T C, et al. Magnetically insulated electron flow with ions with application to the rod-pinch diode[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(8): 3976-3991.