

# 阳极杆箍缩二极管产生 X 射线能谱的模拟计算\*

张鹏飞<sup>1)2)</sup> 苏兆锋<sup>2)</sup> 孙剑锋<sup>2)</sup> 杨海亮<sup>2)</sup> 李永东<sup>1)†</sup> 高屹<sup>2)</sup>  
孙江<sup>2)</sup> 王洪广<sup>1)</sup> 尹佳辉<sup>2)</sup> 梁天学<sup>2)</sup> 孙凤举<sup>2)</sup> 王志国<sup>2)</sup>

1) (西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2010 年 8 月 25 日收到; 2011 年 1 月 25 日收到修改稿)

采用粒子模拟, 得到了阳极杆箍缩二极管阳极钨针上电子的空间分布和入射角分布, 分析二极管工作状态得到了电子的能量分布. 在此基础上建立阳极杆箍缩二极管的蒙特卡罗模型, 模拟得到了阳极杆箍缩二极管的辐射能谱和 X 射线的平均能量, 并与实验结果进行了比较. 结果表明: 09006 炮光子平均能量为 0.441 MeV, 计算该能谱射线经过不同厚度铅衰减片后的剂量衰减情况, 与叠片法 PIN 探测器所测的实验数据基本一致.

**关键词:** 阳极杆箍缩二极管, 粒子模拟, 蒙特卡罗方法, X 射线能谱

**PACS:** 02.60.Cb, 41.50.+h, 52.59.Mv

## 1. 引言

阳极杆箍缩二极管 (rod-pinch diode, RPD) 能够稳定聚焦、可产生高剂量率、小焦斑的高能脉冲 X 射线, 具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>. RPD 所产生 X 射线的能谱是表征其辐射特性的重要参数, 文献[4]通过焦斑尺寸和二极管工作状态来提取参数建立蒙特卡罗模型, 数值模拟得到 X 射线能谱. 本文通过分析二极管电压、电流波形, 得到轰击阳极钨针电子的能量分布; 采用 PIC (particle-in-cell, PIC) 方法分析电子在阳极钨针上的空间分布和入射角分布情况. 在此基础上, 建立蒙特卡罗模型, 模拟得到 RPD 二极管的射线能谱.

## 2. 基本物理分析

阳极杆箍缩二极管的常见结构是利用一个薄环形阴极环绕着一根小直径阳极杆, 阳极杆向外延伸并逐渐变细, 超出阴极平面一段距离. 当馈入脉冲电压波时, RPD 的工作过程大致分为三个阶段: 空间电荷限制阶段 (space-charge limited, SCL)、弱箍缩阶段 (weakly pinched, WP) 和磁绝缘强箍缩阶

段 (magnetically limited and strongly pinched, ML)<sup>[5]</sup>. 不同阶段电流发展过程如下:

1) 开始时, 二极管工作电压较低, 电流较小, 阴极发射电子沿径向运动, 电子的运动基本上由电场力决定, 属于空间电荷限制阶段, 产生少量 X 射线;

2) 随着电压和电流的增大, 电子的运动受到磁场力的影响越来越大, 运动轨迹偏离原来的轨道发生偏转, 属于弱箍缩阶段, 产生少量 X 射线;

3) 当电压和电流足够大时, 空间电荷受到的力中自磁场力开始占主导地位, 带电粒子不再服从空间电荷限制流模式, 电子发生磁绝缘并沿阳极杆运动, 聚焦轰击阳极杆末端, 属于磁绝缘强箍缩阶段, 产生很强的韧致辐射 X 射线.

阳极杆箍缩二极管三阶段模型的电子分布图像如图 1 所示.

## 3. 实验描述

西北核技术研究所已成功研制感应电压叠加器 (inductive voltage adder, IVA) 驱动 RPD 型脉冲 X 射线源<sup>[6]</sup>, 其结构如图 2 所示, 主要由低电感 Marx 发生器、水介质脉冲形成线、平板传输线、IVA 感应腔、真空绝缘传输线和阳极杆箍缩二极管构成.

\* 国家自然科学基金 (批准号 10775112, 50807045) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: leyond@mail.xjtu.edu.cn

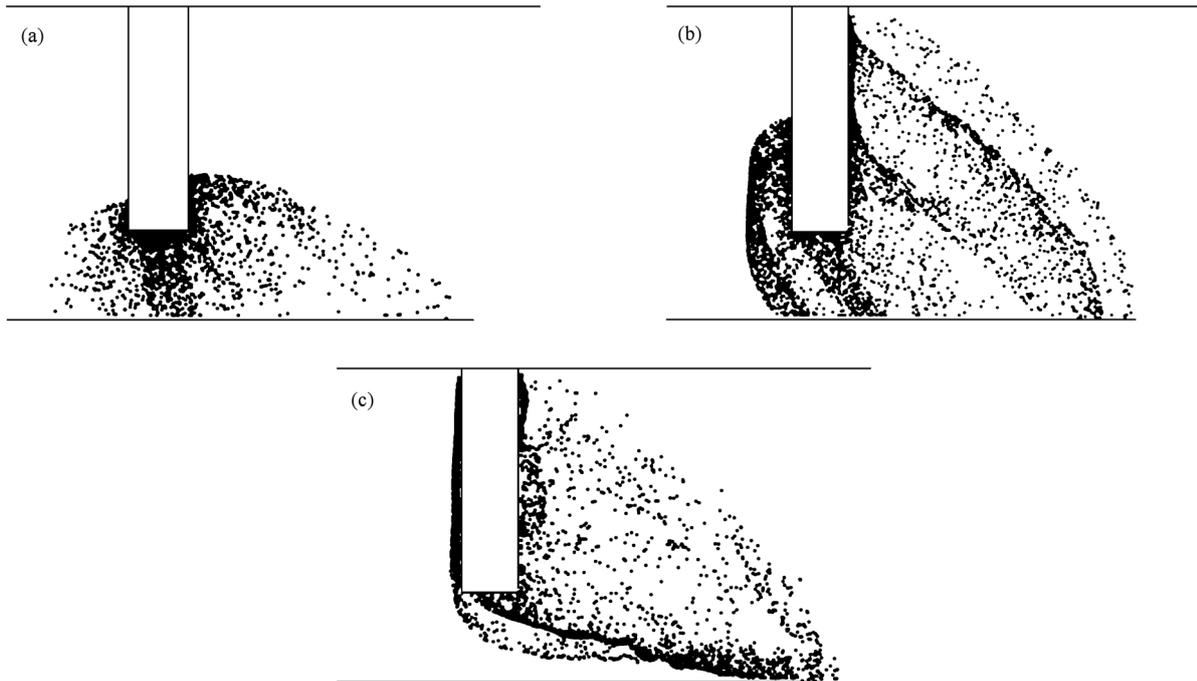


图1 RPD不同阶段电子束空间分布状态 (a)空间电荷限制阶段;(b)弱箍缩阶段;(c)磁限制阶段



图2 IVA/RPD 实验平台结构示意图

在该装置上进行的 09006 炮实验,RPD 阴极为 3.2 mm 厚环形石墨圆盘,圆盘外半径 74 mm,孔半径 8 mm,阳极采用直径 1.2 mm 钨针,钨针末端 10 mm 均匀磨尖,阳极杆伸出圆盘表面 14 mm. 二极管区域电感值为 192 nH,对实验测得的二极管电压进行电

感修正. 图 3(a) 中灰色曲线是电感修正后的电压波形,黑色曲线是 09006 炮实验中二极管位置的电流波形. 图 3(b) 是该炮实验二极管阻抗曲线. 由图知:二极管电压峰值为 2.0 MV,半宽 75 ns,电流峰值 44 kA,半宽 76 ns,二极管稳定工作阻抗约 40  $\Omega$ .

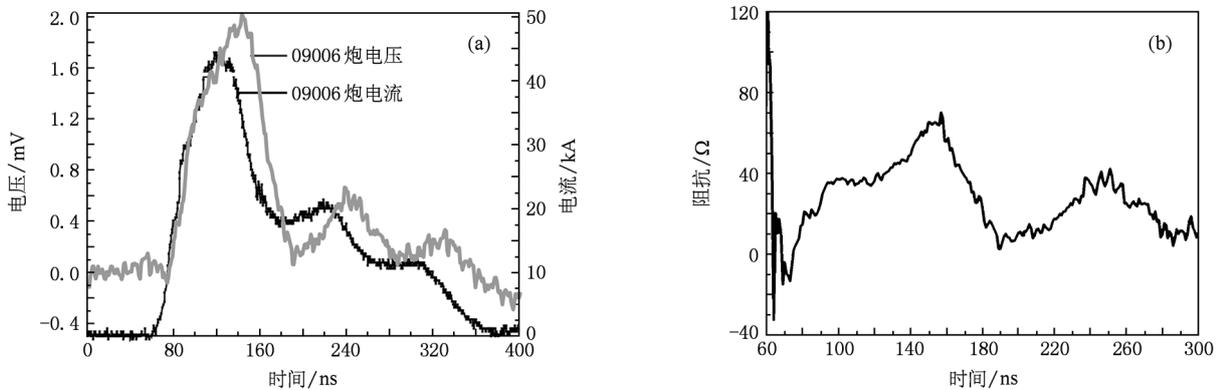


图3 (a) IVA/RPD 实验平台 09006 炮实验二极管电压电流波形;(b)阻抗曲线

IVA/RPD 实验平台产生的高能 X 射线,采用叠片法进行测量. 实验中采用 7 个独立的 PIN 探测器组成阵列<sup>[7]</sup>,探测器准直孔前铅衰减片厚度分别为 0, 4.4, 8.7, 12.0, 16.0, 20.0 和 24.0 mm. 实验测得 09006 炮 X 射线波形如图 4 所示. 由图可知,随铅衰减片厚度增加,射线强度减弱. 这种现象是由于铅衰减片对光子的屏蔽作用造成的,衰减片越厚,到达 PIN 探测器的光子越少.

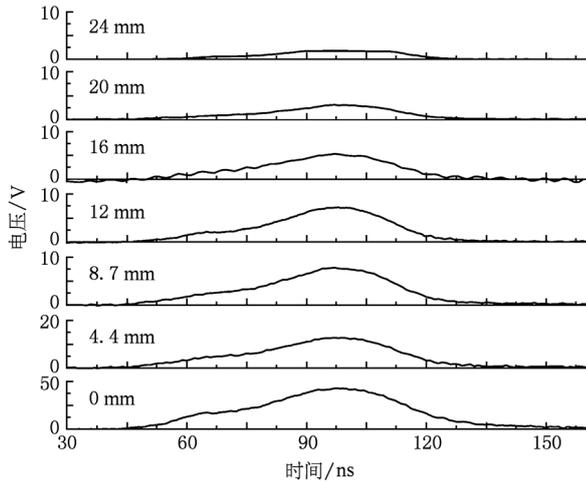


图 4 叠片法测量 09006 炮获得不同衰减的 X 射线

## 4. 数值模拟

### 4.1. RPD 的 PIC 模拟

使用西安交通大学和西北核技术研究所联合开发的 PIC 模拟软件 UNIPIC 2D<sup>[8]</sup>对 RPD 进行模拟. 对应于 09006 炮实验,RPD 二极管计算模型如图 5 所示. 结构参数为:石墨阴极厚 3.2 mm,阴极盘外半径 74 mm,孔半径 8 mm,电子发射阈值为 230 kV/cm;阳极钨针直径 1.2 mm,伸出阴极盘前表面(接近针尖的表面)14 mm. 输入电压对应于图 3(a)所示的电压波形. 设定阳极质子电流为 18 kA,质子发射区域为距离针尖 22 mm 范围内<sup>[3, 9-11]</sup>.

模拟得到不同阶段电子的相空间分布如图 1 所示,到达阳极杆上的电子分布如图 6 所示,对应图 5 所示的 PIC 模型,横轴表示钨针的轴向位置,0 点表示针尖处,纵坐标表示箍缩电子在阳极钨针上的相对分布. 结果表明,针尖位置电子最多,97% 的电子分布在距离针尖 14 mm 的范围内(阴极圆盘下游区域). 到达阳极钨阵的电子受到电场力和磁场力的

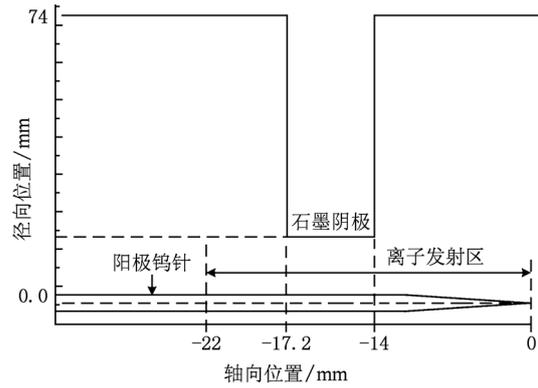


图 5 09006 炮 RPD 实验的 PIC 模型

共同作用,运动轨迹十分复杂,统计电子到达钨阵表面时的角度分布情况,如图 7 所示.

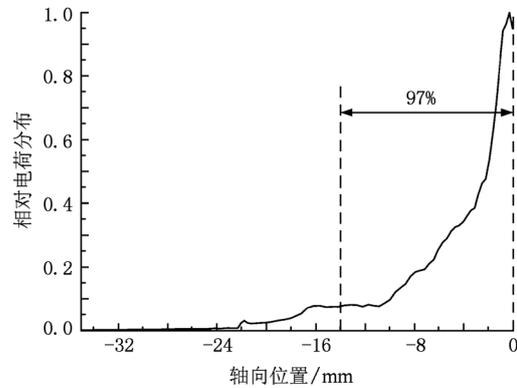


图 6 电子到达阳极钨针时的轴向分布

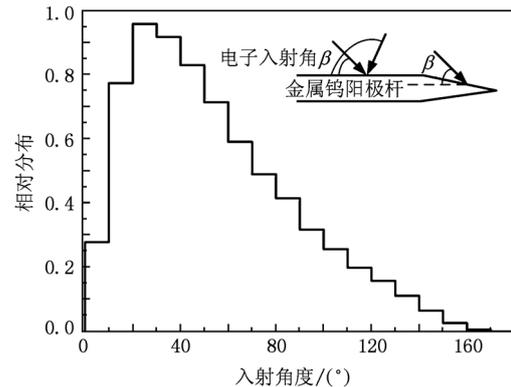


图 7 电子到达阳极钨阵时的角分布

### 4.2. 电子能谱的近似求解

电流对时间的积分即为电荷,电荷大小表征了电子数目的多少. 对于 RPD,通过二极管的电压、电

流信号,然后利用电压电流在时间上的对应关系可以换算得到电子能谱函数  $g(E)$ . 计算公式为

$$g(E) = \sum_d I_d(U) \Delta t_d / e, \quad (1)$$

其中  $E$  为电子能量,  $g(E)$  表示能量为  $E$  的电子数目,  $E = eU$ ;  $e$  为一个电子的电荷值;  $U$  为电压;  $I_d$  表示该分段时间内的电流值;  $\Delta t$  表示电压电流曲线上的时间间隔,取较小的  $\Delta t$ ,可认为在该时间段内电压恒定.

分析如图 3 所示 09006 炮的二极管电压、电流数据. 电压间隔取 0.1 MV,得到电子能量分布如图 8 所示. 由图 8 可知电子在较高能量(1.3—2.0 MeV 附近)时电子数目较多,1.3—2.0 MeV 范围的电子占总数的 68%. 分析认为是由于电压较高时,电流处于最大值附近,电流对时间的积分值相对较大. 所以表现为能量较高(1.3—2.0 MeV 附近)的电子较多.

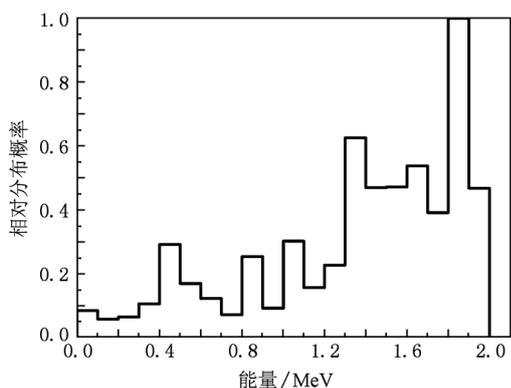


图 8 09006 炮电子能量分布

### 4.3. RPD 的蒙特卡罗模型

对应于 RPD 工作过程,建立电子轰击钨针产生 X 射线的蒙特卡罗模型,如图 9 所示. 电子源的主要参数是空间分布函数  $f(z)$ 、电子的入射角和能量分布函数  $g(E)$ . 空间分布函数  $f(z)$  如图 6 所示,电子入射角如图 7 所示,电子的能量分布函数  $g(E)$  如图 8 所示.

由于 97% 的电子分布在距离针尖 14 mm 的范围内,所以在蒙特卡罗模型中取钨针长度为 14 mm,其末端 10 mm 区域为均匀锥状. 对应于实验中的屏蔽条件,在针尖正前方分别放置有机玻璃板(20 mm 厚)、铜网(2 mm 厚)和胶木片(10 mm 厚),忽略 4.2 m 空气的作用. 计算得到高能脉冲 X 射线的能谱如图 10 所示,图中采用对数坐标系,横轴为光子

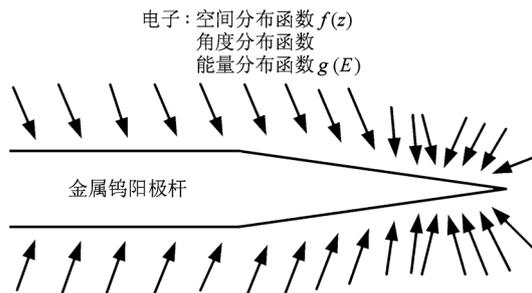


图 9 RPD 蒙特卡罗模型示意图

的能量,纵轴表示单个电子轰击钨针时,韧致辐射产生的不同能量光子的相对个数. 结果表明:09006 炮实验中光子平均能量为 0.441 MeV.

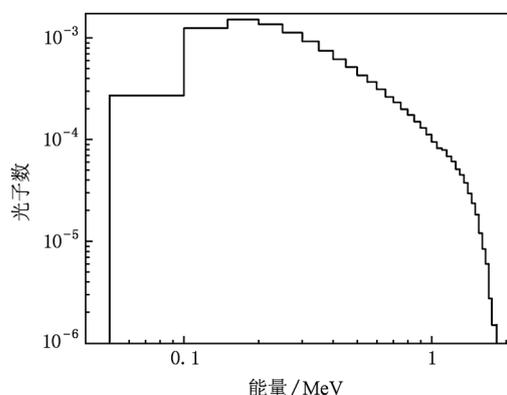


图 10 高能脉冲 X 射线能谱

对应于实验中测量 X 射线的叠片法,采用蒙特卡罗方法建立数值模型. 射线源能量分布为图 10 所示的模拟结果,假设射线垂直入射层叠放置的衰减片(1 mm 厚,铅)和剂量片(0.3 mm 厚,硅). 模拟得到射线经过不同厚度铅衰减片后的相对剂量衰减如图 11 中虚线所示. 对图 4 中采用叠片法测量的脉

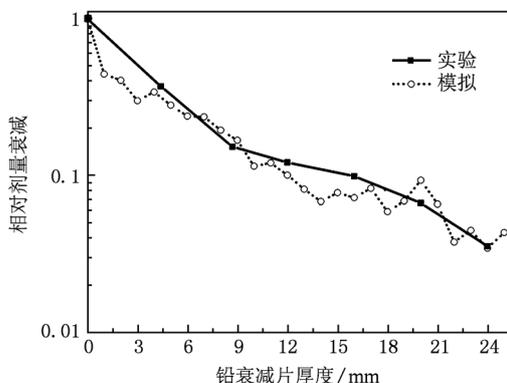


图 11 X 射线经过不同厚度铅衰减片后的剂量变化

冲 X 射线波形进行积分,获得 09006 炮脉冲 X 射线经过不同衰减后的相对剂量值,如图 11 中实线所示. 对比相对剂量衰减情况,实验和模拟结果基本一致.

## 5. 结 论

采用粒子模拟得到了电子在阳极杆上的空间分布,结果表明 97% 的电子分布在距离针尖 14 mm

的范围内;分析二极管工作状态得到电子的能谱分布,表明 1.3—2.0 MeV 范围内的电子占总电子数的 68%. 在获得电子能量和空间分布的基础上建立 RPD 的蒙特卡罗模型,获得了二极管辐射能谱. 模拟结果表明:09006 炮光子平均能量为 0.441 MeV. 计算该能谱射线经过不同厚度铅衰减片后的剂量衰减情况,对比叠片法 PIN 探测器所测的实验结果,模拟结果与实验结果基本一致.

- [1] Cooperstein G, Boller J R, Comisso R J, Hinshelwood D H, Mosher D, Ottinger P F, Schumer J C, Stephanakia S J, Swanekamp S B, Weber B V, Young F C 2001 *Phys. Plasmas* **8** 4618
- [2] Young F C, Comisso R J, Allen R J, Mosher D, Swanekamp S B, Cooperstein G, Bayol F, Charre P, Garrigues A, GONZALES C, Pompier F, Vezinet R 2002 *Phys. Plasmas* **9** 4815
- [3] Comisso R J, Cooperstein G, Hinshelwood D H, Mosher D, Ottinger P F, Stephanakia S J, Swanekamp S B, Weber B V, Young F C 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 338
- [4] Weber B V, Allen R J, Comisso R J, Cooperstein G, Hinshelwood D D, Mosher D, Murphy D P, Ottinger P F, Phipps D G, Schumer J W, Stephanakis S J, Swanekamp S B, Pope S, Threadgold J, Biddle L, Clough S, Jones A, Sinclair M, Swatton D, Carden T, Oliver B V 2007 *Proceeding of Pulsed Power and Plasma Science Conference*, Albuquerque, New Mexico. p591
- [5] Ma C G, Deng J J, Xie M 2007 *High Power and Laser and Particle Beams* **19** 348 (in Chinese) [马成刚、邓建军、谢敏 2007 强激光与粒子束 **19** 348]
- [6] Sun F J, Qiu A C, Yang H L, Zeng J T, Gai T Y, Liang T X, Ying J H, Sun J F, Cong P T, Huang J J, Su Z F, Gao Y, Liu Z G, Jiang X F, Li J Y, Zhang Z, Song G Z, Pei M J, Niu S L 2010 *High Power and Laser and Particle Beams* **22** 936 (in Chinese) [孙凤举、邱爱慈、杨海亮、曾江涛、盖同阳、梁天学、尹佳辉、孙剑锋、丛培天、黄建军、苏兆锋、高屹、姜晓锋、李静雅、张众、宋颀周、裴明敬、牛胜利 2010 强激光与粒子束 **22** 936]
- [7] Su Z F, Yang H L, Qiu A C, 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]
- [8] Li Y D, Wang H G, Liu C L, Zhang D H, Wang J G, Wang Y 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 1866 (in Chinese) [李永东、王洪广、刘纯亮、张殿辉、王建国、王玥 2009 强激光与粒子束 **21** 1866]
- [9] Chen L, Jiang W, Xie W P, Deng J J 2007 *High Power and Laser and Particle Beams* **19** 1747 (in Chinese) [陈林、姜巍、谢卫平、邓建军 2007 强激光与粒子束 **19** 1747]
- [10] Gao Y, Qiu A C, Zhang Z, Zhang P F, Wang Z, Yang H L 2010 *Phys. Plasmas* **17** 073108
- [11] Qan L, Zhang Y M, Tu J, Chen Z H, Lai D G, Fan Y J, Shao H 2006 *High Power and Laser and Particle Beams* **18** 317 (in Chinese) [全林、张永民、屠荆、陈志华、来定国、樊亚军、邵浩 2006 强激光与粒子束 **18** 317]

## Numerical investigation of x-ray energy spectrum of rod-pinch diode\*

Zhang Peng-Fei<sup>1)2)</sup> Su Zhao-Feng<sup>1)</sup> Sun Jian-Feng<sup>2)</sup> Yang Hai-Liang<sup>1)</sup> Li Yong-Dong<sup>1)†</sup> Gao Yi<sup>2)</sup>  
Sun Jiang<sup>2)</sup> Wang Hong-Guang<sup>1)</sup> Yin Jia-Hui<sup>2)</sup> Liang Tian-Xue<sup>2)</sup> Sun Feng-Ju<sup>2)</sup> Wang Zhi-Guo<sup>2)</sup>

1) (*Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

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

(Received 25 August 2010; revised manuscript received 25 January 2011)

### Abstract

By particle-in-cell (PIC) simulation and theoretically analysis, electron spatial distribution and energy distribution in the rod surface of rod-pinch diode (RPD) are obtained separately, as input parameters for Monte Carlo simulation of photon energy spectrum of X-ray emitted from RPD. The Monte Carlo simulation results show that the average photon energy of shot 09006 is 0.441 MeV. Taking account of Pb attenuator, the simulation results accord with experiment data detected by PIN detectors array.

**Keywords:** rod-pinch diode, particle-in-cell, Monte Carlo, energy spectrum

**PACS:** 02.60.Cb, 41.50.+h, 52.59.Mv

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10775112, 50807045).

† Corresponding author. E-mail: leyond@mail.xjtu.edu.cn