

不同复合阳极靶韧致辐射场参数的数值模拟

李进玺 吴伟 程引会 郭景海

(西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室 西安 710024)

摘要 电子束辐照材料后发生韧致辐射可以产生脉冲 X 射线, 韧致辐射产生 X 射线的能谱、转化效率等参数与电子束能量, 靶材料及其结构相关。利用二极管的电压、电流波形计算了电子束参数, 建立了复合靶蒙特卡罗粒子输运计算模型, 模拟了电子和光子在不同材料中的输运规律, 研究了钽和有机玻璃组成的复合阳极靶对 X 射线辐射场的影响, 结果对于产生低能、高注量、高转化效率、低透射电子能量用复合阳极靶的设计具有指导意义。计算结果表明: 复合阳极靶中有机玻璃具有软化电子能谱、衰减透射电子的作用; 采用慢化电子靶比相同厚度薄靶产生的 X 射线能谱相对要硬; 减小钽的厚度有利于减小平均光子能量, 而增加钽的厚度有助于提高能量转化效率; 选用有机玻璃 2 cm、钽 10 μm 的薄靶时, X 射线平均能量为 133.22 keV, 光子能量转化效率为 0.055%。

关键词 粒子输运, 韧致辐射, X 射线

中图分类号 TL501

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0108

引用该文:

李进玺, 吴伟, 程引会, 等. 不同复合阳极靶韧致辐射场参数的数值模拟[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(03): 030701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0108.

LI Jinxi, WU Wei, CHENG Yin-hui, *et al.* Numerical simulation of the radiation field parameters of different composite anode targets[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(03): 030701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0108.



Numerical simulation of the radiation field parameters of different composite anode targets

LI Jinxi WU Wei CHENG Yin-hui GUO Jing-hai

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

ABSTRACT Bremsstrahlung radiation can produce pulsed X-ray, and the energy spectra and conversion efficiencies of X-ray produced by such radiation are related to the electron beam energy, target material, and structure of this material. In this study, electron beam spectra were obtained from the voltage and current waveforms of diodes, and the particle transport Monte Carlo calculation model of a composite target was established. Using the resulting model, the transport laws of electrons and photons in different materials were simulated, and the influence of composite targets was studied. The results were found to be useful in the design of composite anode targets to

第一作者: 李进玺, 男, 1978 年 9 月出生, 2005 年于西北核技术研究所获核技术及应用硕士学位, 主要从事辐射模拟与强电磁脉冲效应研究, 副研究员, E-mail: lijinxixi@nint.ac.cn

收稿日期: 初稿 2022-10-27; 修回 2023-01-10

First author: LI Jinxi (male) was born in September 1978, and obtained his master's degree of science in nuclear technology and applications from Northwest Institute of Nuclear Technology in 2005, mainly engages in the research of radiation simulation and intense electromagnetic pulse effect, associate professor, E-mail: lijinxixi@nint.ac.cn

Received 27 October 2022; accepted 10 January 2023

achieve low energy, high fluence, high conversion efficiency, and low transmission electron energy. The results also revealed that an organic glass softened the electron spectrum and attenuated transmission electrons in the composite anode target. The X-ray energy spectrum produced by the same thickness of a moderated target was found to be much harder than that produced by a thin target with the same thickness. Decreasing the thickness of tantalum was deemed to be good for reducing the average photon energy, while increasing the thickness was found to be good for improving the energy conversion efficiency. When a thin target with 2 cm organic glass and 10 μm tantalum was chosen, the average energy of the X-ray was 133.22 keV, and the conversion efficiency of the photon energy was 0.055%.

KEYWORDS Particle transport, Bremsstrahlung, X-ray
CLC TL501

电子穿过原子序数为 Z 、厚度一定的吸收材料时, 转化成的光子能量称为该物质的辐射阻止本领, 它与吸收材料厚度成正比。当吸收材料的厚度一定时, 辐射阻止本领与吸收材料原子序数 Z 的平方成正比, 随电子动能而增大^[1]。因此, 采用薄吸收材料、低 Z 材料或者低能电子束源都能达到产生较低能量X射线能谱的目的^[2-3]。

电子轰击靶材料时韧致辐射占主要部分, 也会产生特征X射线, 特征X射线的能量只与材料特性有关; 同时, 部分高能电子将直接穿透靶进入X射线场, 影响了辐射场的特性。为了降低辐射场中电子的份额, 必须在辐射靶后叠加吸收靶, 从而减小进入辐射场中电子的份额, 同时, 叠加的吸收靶对X射线的衰减要尽可能小。

理论上讲, 通过韧致辐射可以产生任意能段的X射线^[4-6], 韧致辐射产生X射线的能谱、转化效率与强流电子束的能量、靶材料等相关; 为了满足研究中对脉冲X射线辐射场能谱的需要^[7-9], 对韧致辐射靶的物理结构也提出了要求; 文献[2]、[3]中, 开展了电子轰击慢化阳极靶后的辐射场特性实验, 发现慢化阳极靶后的透射电子份额较大, 为了减小辐射场中透射电子的份额, 本文以加速器二极管的电流、电压为输入参数, 采用粒子输运模拟程序, 针对系统电磁脉冲(System generated electromagnetic pulse, SGEMP)对脉冲X射线环境的要求^[7, 10-11], 开展了慢化电子靶和薄靶两种结构的靶对韧致辐射X射线场中光子能量、注量、转化效率以及透射电子能量的影响研究。

1 电子束能谱计算

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。利用测量到的加速器二极管电压、电流在时间上的对应关系, 可以计算得到

电子能谱函数 $\varphi(E)$, 计算公式为式(1)^[2, 12]。

$$\varphi(E)=\sum I_d(U_d)\Delta t/e \quad (1)$$

式中: E 为在一定的电压 U_d 下出射电子的能量, 其值为 eU_d (eV), e 为一个电子的电量; $\varphi(E)$ 为具有能量 E 的电子注量; $I_d(U_d)$ 表示 I_d (A)是 U_d (V)对应的函数; Δt (s)为电流电压曲线上的时间间隔, 取较小的 Δt , 可认为在该时间段内电压恒定。一个电压值 U_d 可能对应一个或几个电流值 I_d 。图1给出了利用电压、电流计算得到的充电电压为60 kV时出射电子能谱分布。

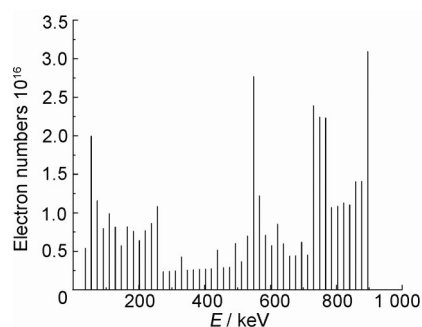


图1 充电电压为60 kV时电子能谱
Fig.1 Electron spectrum for charging voltage of 60 kV

2 靶参数对韧致辐射场的影响

2.1 靶结构尺寸及计算模型

阳极靶分两种类型: (1) 慢化电子阳极靶; (2) 薄靶结构。图2给出了慢化电子阳极靶结构示意图, 二极管阴极出射电子轰击低 Z 材料, 韧致辐射光子谱由高 Z 材料靶出射。图3给出了薄靶结构示意图, 二极管阴极出射电子轰击高 Z 材料, 韧致辐射光子谱由低 Z 材料靶出射。下面的计算结果中, 低 Z 材料均选取有机玻璃, 高 Z 材料选取钽。

图4给出了计算模型示意图, 表面7为源定义面, 表面6为电子辐照面, 表面5为高、低 Z 材料

界面，表面4为光子、电子出射面，表面3为关心区域平面。入射角指的是图2、3中 θ 角的对顶角，以下结果中，没有特别说明时电子束垂直靶材料入射，即入射角为 0° 。

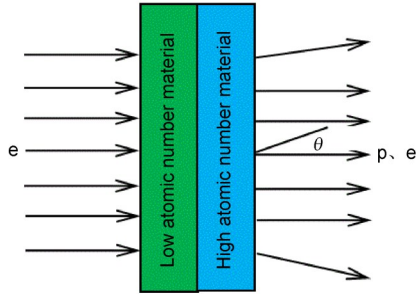


图2 慢化电子靶材料示意图
Fig.2 Structure of moderated target

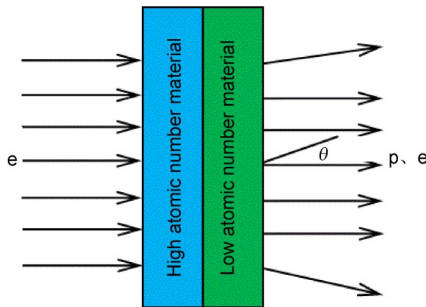


图3 薄靶材料示意图
Fig.3 Structure of thin target

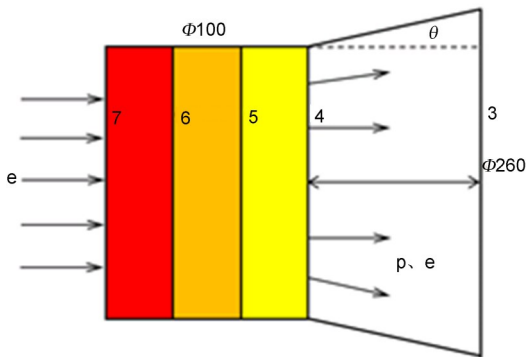


图4 计算模型示意图
Fig.4 Diagram of computational model

2.2 慢化电子靶计算结果

图5 (a)、(b) 分别给出了有机玻璃厚度不同、钽厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 两种厚度时的X射线能谱。图6、7分别给出了钽和有机玻璃厚度变化时的平均光子能量变化曲线和光子能量转化效率曲线，其中光子能量转化效率指的是韧致辐射X射线总能量与图1中所示的电子束总能量之比。

由图5~7可以得出：(1) 有机玻璃厚度在 $1\times$

$10^{-5}\sim 1\times 10^{-2}\ \text{cm}$ 之间变化时，辐射平均光子能量变化不大；(2) 有机玻璃厚度小于 $3\ \text{cm}$ 、钽厚度在 $0.5\sim 12\ \mu\text{m}$ 之间变化时，辐射光子平均能量不大于 $120\ \text{keV}$ ；(3) 有机玻璃厚度在 $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-2}\ \text{cm}$ 之间变化时，光子能量转化效率变化不大；有机玻璃厚度大于 $1\times 10^{-2}\ \text{cm}$ 时，厚度增大能量转化效率减小；(4) 钽厚度增大时，光子能量转化效率与辐射平均光子能量均增大。因此，选择的有机玻璃厚度小于 $3\ \text{cm}$ 、钽厚度在 $0.5\sim 12\ \mu\text{m}$ 之间变化时，辐射光子平均能量不大于 $120\ \text{keV}$ 。在此基础上，如果需要减小平均光子能量，需要减小钽的厚度；如果需要提高转化效率，则需要增加钽的厚度。

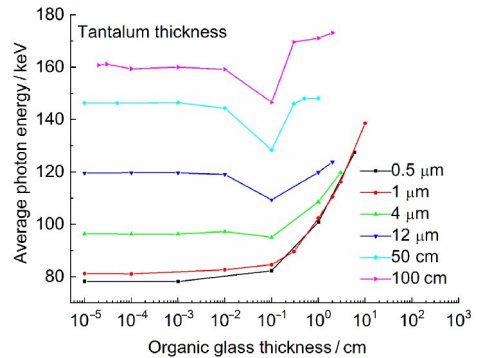


图6 平均光子能量变化曲线
Fig.6 Curves of average photon energy

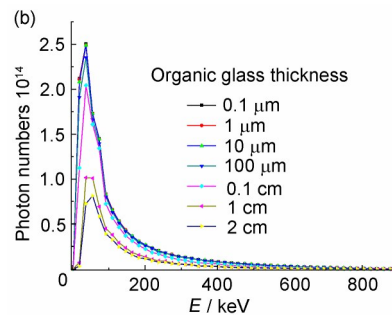
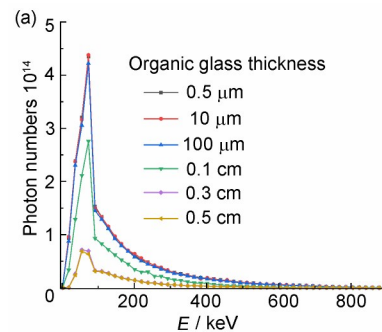


图5 有机玻璃厚度不同，钽厚度分别为 (a) $50\ \mu\text{m}$ 和 (b) $12\ \mu\text{m}$ 时的X射线能谱
Fig.5 X-ray energy spectra with different thickness of organic glass of $50\ \mu\text{m}$ (a) and $12\ \mu\text{m}$ (b) tantalum respectively

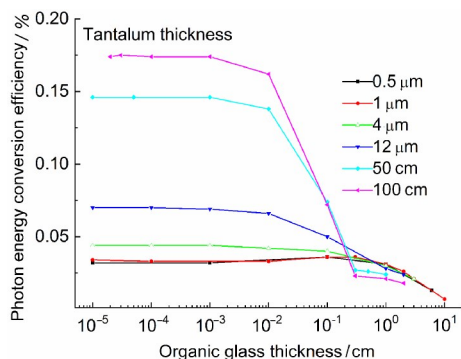


图7 光子能量转化效率曲线
Fig.7 Curves of photon energy conversion efficiency

2.3 薄靶计算结果

图8给出了钽厚度为10 μm、有机玻璃厚度不同的X射线能谱与透射电子谱,表1给出了钽厚度为10 μm时的辐射场参数。

由图8和表1可以看出,在薄靶的钽材料后面加有机玻璃,对韧致辐射X射线和透射电子均有一定的衰减作用,可以有效地减小韧致辐射场中的电子份额,但也会使得韧致辐射X射线变硬,能量转化效率降低。

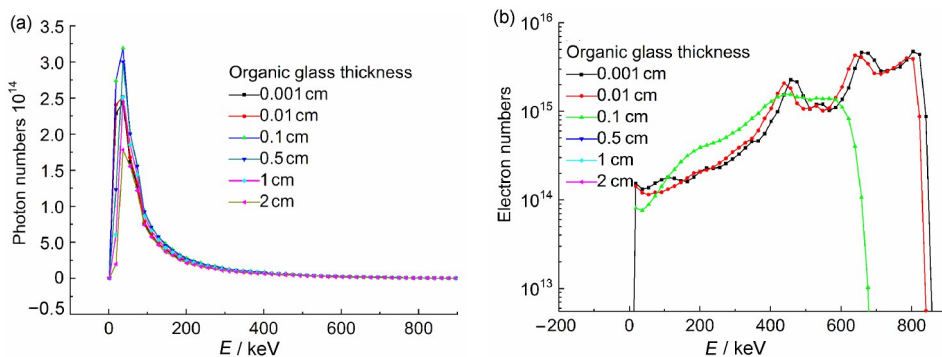


图8 钽厚度为10 μm时的计算结果:(a)X射线能谱;(b)透射电子谱
Fig.8 Calculation results in tantalum thickness of 10 μm: (a) X-ray spectra; (b) transmission electron spectra

表1 钽厚度为10 μm时的辐射场参数
Table 1 Radiation field parameters at 10 μm tantalum thickness

有机玻璃厚度 / cm Organic glass thickness	平均光子能量 / keV Average photon energy	光子总能量 / J Photons energy	光子能量转化效率 / % Photon energy conversion efficiency	总光子数 / 个 Photon numbers
0.001	115.37	23.50	0.064	1.27×10^{15}
0.010	114.58	24.12	0.066	1.31×10^{15}
0.100	109.01	26.97	0.074	1.54×10^{15}
0.500	118.31	25.66	0.070	1.35×10^{15}
1.000	125.02	23.53	0.064	1.17×10^{15}
2.000	133.22	20.02	0.055	9.37×10^{14}

图9~10分别给出了钽和有机玻璃厚度变化时的平均光子能量变化曲线和X射线能量转化效率曲线。

由图9~10可以得出:(1)有机玻璃厚度在 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1}$ cm之间变化时,辐射平均光子能量变化不大;有机玻璃材料厚度在 1×10^{-1} cm附近时,X射线能量转化效率最大;(2)钽材料厚度增大时,X射线能量转化效率增大,韧致辐射X射线能谱变硬;(3)有机玻璃厚度小于3 cm、钽厚度在0.5~12 μm之间变化时,辐射光子平均能量不大于120 keV。

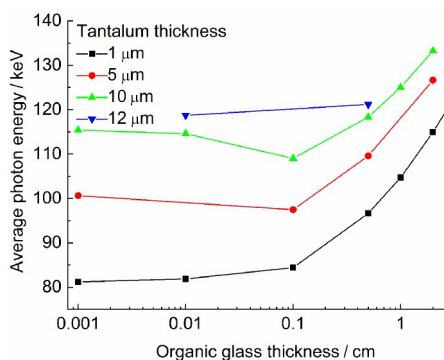


图9 平均光子能量变化曲线
Fig.9 Curves of average photon energy

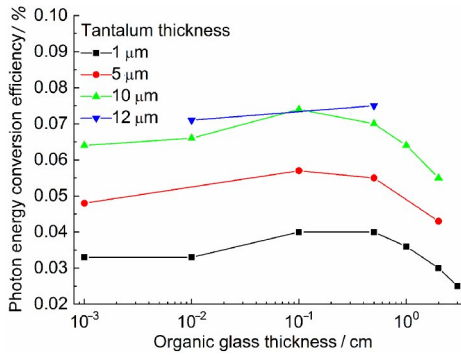


图10 光子能量转化效率曲线
Fig.10 Curves of photon energy conversion efficiency

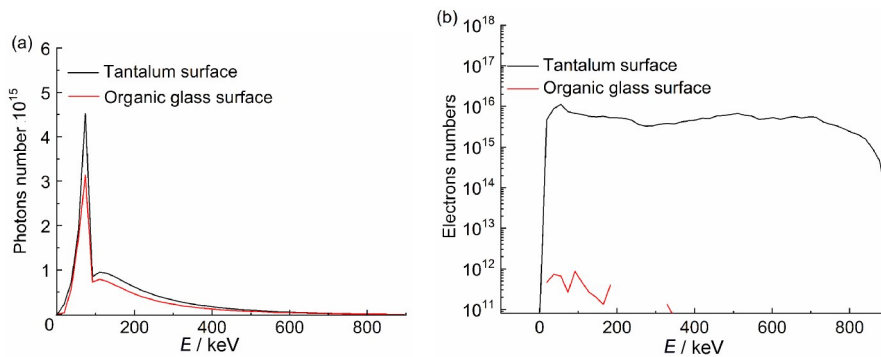


图11 入射角为30°时不同表面的(a)光子能谱;(b)电子能谱(彩色见网络版)
Fig.11 Surface parameters at an incident angle of 30° (a) photon spectra, and (b) electron spectra (color online)

表2 入射角不同时辐射场参数比较

Table 2 Comparison of radiation field parameters of different incident angle

入射角 $\theta / (^\circ)$ Incident angle	前向电子总能量 / J Forward electrons energy	前向光子总能量 / J Forward photons energy	光子能量转化效率 / % Photon energy conversion efficiency
0	0.11	365.94	0.995
30	0.10	343.99	0.936
60	0.09	267.69	0.728
80	0.07	176.96	0.481

由图11和表2可以看出，随着入射角的增大，电子和光子在材料中的运动路径增大，增大了材料对韧致辐射X射线和透射电子的衰减作用，也使得X射线能量转化效率降低。因此，为了提高X射线能量转化效率，应该尽可能地减小二极管电子在阳极靶材料上的入射角度。

3 结论

利用j加速器二极管的电压、电流计算得到了电子的能谱分布；采用粒子输运模拟程序研究了高Z材料和低Z材料组成的复合阳极靶对辐射X射线场的影响。从模拟结果可以看出，同等条件下，利用薄靶产生能量比较低的光子谱较慢化电子靶

2.4 入射角不同时结果的比较

从前面的分析可以看出，薄靶更容易产生能量比较低的光子谱，因此，下面只分析了薄靶结构时入射角对辐射场参数的影响。靶结构采用如图3所示薄靶，钽厚度12 μm，有机玻璃厚度1.0 cm。图11(a)、(b)分别给出了入射角为30°时，不同表面的光子、电子能谱，表2给出了入射角度不同时的辐射场参数。

更容易实现；复合材料阳极靶中，低Z材料主要用来软化电子能谱，衰减辐射场中的透射电子份额，而高Z材料主要用来产生韧致辐射光子；减小高Z材料厚度能够减小平均光子能量，增加高Z材料厚度可以提高能量转化效率，阳极靶优化设计中，选用有机玻璃3 cm、钽12 μm的薄靶时，辐射光子平均能量满足SGEMP效应研究需求。

作者贡献声明 李进玺实施研究过程、开展理论计算、数据分析、文章撰写；吴伟和程引会提出研究思路、指导开展研究、修改初稿；郭景海参与了文献调研和资料收集、修改初稿。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

参考文献

- 1 余稳. 厚靶韧致辐射谱的角分布计算[J]. 中南工学院学报, 1998, **12**(1): 18-22. DOI: 10.19431/j.cnki.1673-0062.1998.01.004.
YU Wen. Calculation of angular distribution of thick target bremsstrahlung spectrum[J]. Journal of Central-South Institute of Technology, 1998, **12**(1): 18-22. DOI: 10.19431/j.cnki.1673-0062.1998.01.004.
- 2 李进玺, 吴伟, 来定国, 等. 电子束与复合靶作用后辐射特性的数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(3): 506-511. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.03.0506.
LI Jinxi, WU Wei, LAI Dingguo, *et al.* Numerical simulation on radiation characteristic of composite target [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(3): 506-511. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.03.0506.
- 3 来定国, 张永民, 李进玺, 等. 脉冲硬X射线能谱软化方法数值分析[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(2): 336-340. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.02.0336.
LAI Dingguo, ZHANG Yongmin, LI Jinxi, *et al.* Numerical analysis of spectrum degradation methods of pulsed hard X-ray[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(2): 336-340. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.02.0336.
- 4 邱爱慈. 脉冲X射线模拟源技术的发展[J]. 中国工程科学, 2000, **2**(9): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2000.09.004.
QIU Aici. The development of technology for pulsed X-ray simulators[J]. Engineering Science, 2000, **2**(9): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2000.09.004.
- 5 蒯斌, 邱爱慈, 王亮平, 等. 强脉冲超硬X射线产生技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11): 1739-1743.
KUAI Bin, QIU Aici, WANG Liangping, *et al.* Generation of intense pulsed super-hard X-ray[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(11): 1739-1743.
- 6 何辉, 禹海军, 王毅, 等. 4 MeV 闪光X光机韧致辐射靶设计[J]. 强激光与粒子束, 2019, **31**(12): 94-98. DOI: 10.11884/HPLPB201931.190273.
HE Hui, YU Haijun, WANG Yi, *et al.* Design of bremsstrahlung target of 4 MeV flash X-ray machine[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, **31**(12): 94-98. DOI: 10.11884/HPLPB201931.190273.
- 7 李进玺, 程引会, 吴伟, 等. 系统电磁脉冲综合环境中导线响应的计算[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(7): 1615-1618. DOI: 10.3788/HPLPB20102207.1615.
LI Jinxi, CHENG Yin-hui, WU Wei, *et al.* Calculation of wires responses caused by SGEMP comprehensive environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, **22**(7): 1615-1618. DOI: 10.3788/HPLPB20102207.1615.
- 8 林鹏, 王肖钧. 强脉冲X射线辐射热力学效应的数值模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, **37**(7): 732-737. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.07.008.
LIN Peng, WANG Xiaojun. Numerical simulation of thermal-mechanical effects by intense pulsed X-ray irradiation[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, **37**(7): 732-737. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.07.008.
- 9 郭红霞, 陈雨生, 张义门, 等. 稳态、瞬态X射线辐照引起的互补性金属-氧化物-半导体器件剂量增强效应研究[J]. 物理学报, 2001, **50**(12): 2279-2283. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2001.12.001.
GUO Hongxia, CHEN Yusheng, ZHANG Yimen, *et al.* Study of relative dose-enhancement effects on cmos device irradiated by steady-state and transient pulsed X-rays[J]. Acta Physica Sinica, 2001, **50**(12): 2279-2283. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2001.12.001.
- 10 程引会, 周辉, 李宝忠, 等. 光电子发射引起的柱腔内系统电磁脉冲的模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(8): 1029-1032.
CHENG Yin-hui, ZHOU Hui, LI Baozhong, *et al.* Simulation of system-generated electromagnetic pulse caused by emitted photoelectron in cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(8): 1029-1032.
- 11 Zhou Y F, Cheng Y H, Zhu Z Z, *et al.* Simulation study of air effects on SGEMP based on swarm model[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2022, **69**(1): 26-34. DOI: 10.1109/TNS.2021.3132628.
- 12 全林, 张永民, 屠荆, 等. 强流二极管产生脉冲X射线能谱场稳定性研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(2): 317-320.
QUAN Lin, ZHANG Yongmin, TU Jing, *et al.* Stability of pulse X-ray spectrum field generated by intense diode [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(2): 317-320.