

多路并联二极管辐射场剂量均匀性研究

李进玺 吴伟 刘逸飞 赵墨 聂鑫

(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 多路并联二极管结构是实验室获取低能量、大面积、高剂量率X射线的有效途径之一。本文采用点源数值积分的方法开展了单环和五环并联结构二极管的辐射场剂量均匀性研究。结果表明:距离圆环很近的平面上,辐射场主要集中于圆环在该平面的投影位置,随着距离的增大,辐射逐渐向其他区域分散;对于单环结构二极管,当距离 $z < 15$ cm时,随着距离的增大,剂量均匀性 $> 80\%$ 的面积先增大后减小,而计算区域内的总剂量逐渐减小;综合考虑剂量均匀性和总剂量,单环结构二极管辐射场最佳实验区域为 $z = 7 \sim 9$ cm;圆环内径减小只会增强环中心投影点附近的剂量,而平面上剂量均匀性会变差,当圆环外径为10 cm时,最佳内径为 $8 \sim 9.5$ cm;相比单环,五环并联结构二极管能够大幅增强辐射剂量,明显改善辐射场剂量均匀性和显著增大有效实验区域, z 为11~17 cm范围内,五环结构二极管剂量均匀性没有出现大的波动。

关键词 X射线, 并联二极管, 辐射场, 均匀性

中图分类号 TL501

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0001

引用该文:

李进玺, 吴伟, 刘逸飞, 等. 多路并联二极管辐射场剂量均匀性研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(5): 050703. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0001.

LI Jinxi, WU Wei, LIU Yifei, *et al.* Study on the dose uniformity of multi-channel parallel diode[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(5): 050703. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0001.



Study on the dose uniformity of multi-channel parallel diode

LI Jinxi WU Wei LIU Yifei ZHAO Mo NIE Xin

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

ABSTRACT The multi-channel parallel diode structure is effective in obtaining X-ray with low energy, large area coverage, and high dose rate in laboratory conditions. In this study, the dose uniformity of single- and five-ring structures was studied based on a point source model. The results showed that the radiation field was primarily focused on the projection position of the ring in the plane near the ring; as the distance increased, the radiation was gradually dispersed to other regions. In the case of single ring structure diodes and $z < 15$ cm, 80% of the area of the dose homogeneously increased and then decreased with the increasing distance, whereas the total dose in the calculated region decreased gradually. Considering the dose uniformity and total dose, the optimal experimental region of single ring diode radiation field was $z = 7 \sim 9$ cm. A smaller inner ring radius will only enhance the dose

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: lijnxi@nint.ac.cn

收稿日期: 初稿 2023-01-13; 修回 2023-03-27

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 focused on the research of radiation simulation and intense electromagnetic pulse effect, associate professor, E-mail: lijnxi@nint.ac.cn

Received 13 January 2023; accepted 27 March 2023

near the projection point of the ring; however, the uniformity of the dose on the plane will decrease. A larger inner ring radius will also decreased the dose near the projection point of the ring center. When the outer radius of ring was 10 cm, the optimal inner radius was 8–9.5 cm. Compared with the single ring diode, the dose uniformity of the five ring diode can be greatly enhanced, and the dose uniformity of radiation field and effective experimental region can be improved. Moreover, in $z = 11\text{--}17$ cm, the five-ring dose uniformity did not exhibit significant fluctuations.

KEYWORDS X-ray, Parallel diode, Radiation field, Uniformity

CLC TL501

辐射模拟装置是开展辐射探测和辐射效应技术研究的重要平台^[1]，随着研究的逐渐深入，对模拟装置辐射场参数的要求也在不断提高。X射线辐射热力学效应^[2]、半导体器件剂量效应^[3]，尤其是X/γ射线引起的系统电磁脉冲效应^[4-6]等研究中对X射线源的能量、面积、剂量均匀性以及剂量率都有相应的要求。脉冲功率装置驱动二极管产生强流电子束，利用强流电子束轰击高原子序数阳极靶发生韧致辐射是当前国内外普遍采用的产生X射线的技术路线^[7-9]。为了得到低能量的X射线，二极管电压应尽可能低；为了获得较高的剂量率，在电压一定的情况下，应尽可能提高二极管的工作电流，减小二极管阻抗；为了实现大面积均匀辐照，通常采用球板或者环板结构作为二极管阴极的基本构型^[10]。环形结构的韧致辐射二极管可以在较大面积内提供均匀性比较好的辐射场环境，通过多环的并联能够进一步增大辐照面积，提高剂量，降低X射线能量^[11-12]。目前，用于产生大面积韧致辐射的低阻抗真空二极管主要有平面二极管和并联式二极管。国内西北核技术研究所“闪光二号”采用的就是平面二极管结构^[13]，这种结构的缺点是容易产生箍缩，从而使得电子发射趋于集中。美国Sandia实验室的Saturn装置采用并联式二极管结构^[10]，它能够同时将多个二极管的辐射叠加来获得大面积且均匀的X射线输出。本文在文献[12]工作的基础上，首先计算了单路二极管的辐射场特性，然后开展了五路并联二极管的辐射场特性研究，研究结果对于优化多路并联二极管结构设计、获取最优辐射场以及效应实验设计具有指导意义。

1 计算方法

文献[12]计算四路并联二极管的辐射时，圆环只是按照半径方向进行了网格划分，环的内外径相差较大时，这种网格划分的计算误差较大。本文将二极管在圆周和半径两个方向划分为若干

小面元，数值积分每一个小面元的辐射剂量就可以得到整个二极管的辐射剂量；小面元向外辐射时，可以看作是点源，计算每一个小面元的辐射剂量时，需要计算小面元在测量点的投影面积。不考虑衰减时，强度为 S_0 (rad)的小面元以球面波的形式向外辐射，其向外辐射的剂量 ϕ (rad/cm²)见式(1)。

$$\phi = \frac{S_0 \cos \theta}{4\pi a^2} \quad (1)$$

式中： a 为小面元与测量点的距离，cm； θ 为小面元和测量点的连线与被测平面法线的夹角。

本文数据均按测量平面的最大值进行了归一化处理，定义剂量均匀性为当前剂量与该平面最大剂量的比值，因此，剂量均匀性即为当前剂量。

2 单路二极管辐射场

2.1 计算模型

如图1所示，圆环在 xoy 平面上，圆心坐标(0, 0)，圆环内径 $R_1=9$ cm，外径 $R_2=10$ cm。划分小面元时，圆周方向网格数3 000，半径方向网格数10。圆环按照圆周方向对称，为了表述方便，以 $y=0$ 为其对称轴，测量点在边长为26 cm的正方形平面上。

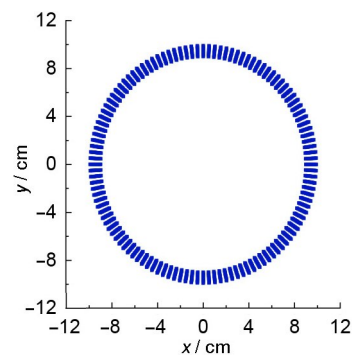


图1 单路圆环模型
Fig.1 Single ring model

2.2 不同平面上归一化剂量分布

图2给出了不同平面上 $y=0$ 方向的归一化剂量分布。图3分别给出了 $z=3$ cm和 $z=9$ cm平面上的归一化剂量分布。图4给出了剂量均匀性 $>80\%$ 的面积与距离 z 的关系；对不同距离 z 投影面正方形中总剂量的最大值进行了归一。图5给出了归一化剂量与距离 z 的关系。

由图2、3可知，对称轴方向归一化剂量分布由马鞍形逐渐过渡到梯形；距离圆环很近的平面上，辐射主要集中在圆环在该平面的投影位置；随着距离的增大，辐射向环中心投影区域逐渐分散，距离进一步增大时，环中心投影区域辐射最

大，环投影处的辐射逐渐减小。

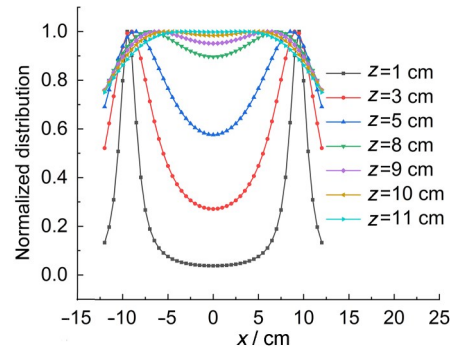


图2 不同平面上对称轴方向归一化剂量分布
Fig.2 Dose distribution of $y=0$ direction in different planes

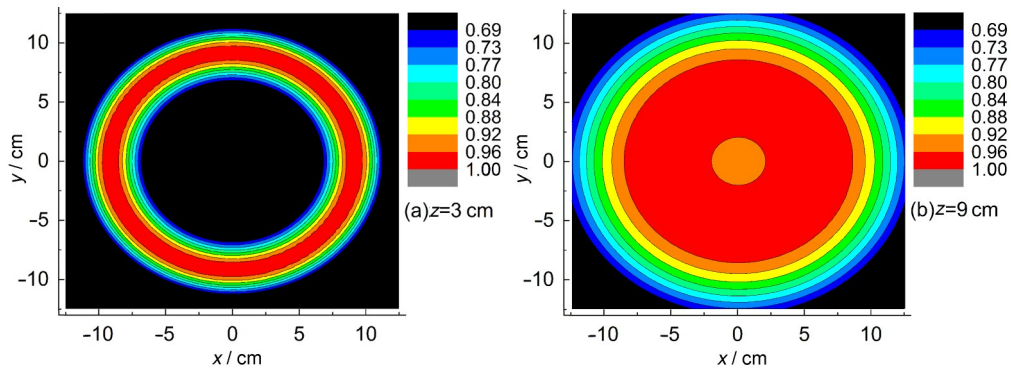


图3 不同平面上归一化剂量分布:(a) $z=3$ cm;(b) $z=9$ cm
Fig.3 Dose distribution of different planes: (a) $z=3$ cm; (b) $z=9$ cm

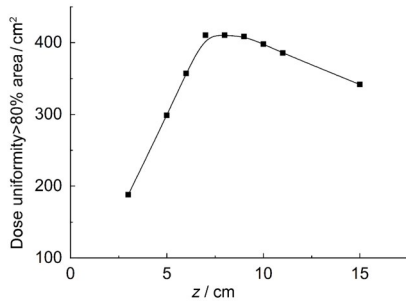


图4 剂量均匀性 $>80\%$ 的面积与距离的关系
Fig.4 Relationship between the dose and distance

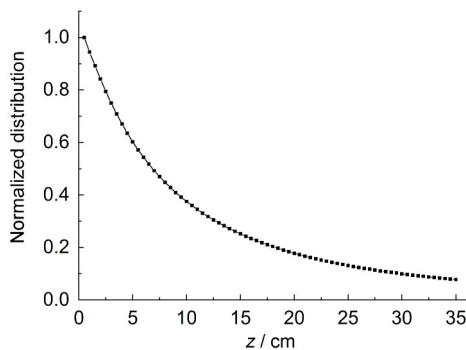


图5 归一化剂量与距离的关系
Fig.5 Relationship between the dose and distance

由图4、5可知，当 $z < 15$ cm时，随着距离的增大，剂量均匀性 $>80\%$ 的面积先增大后减小，计算区域内总剂量逐渐减小。因此，综合考虑剂量均匀性和总剂量， $z=7\sim 9$ cm为最佳实验区域。

2.3 圆环内径不同时归一化剂量分布

图6 (a) ~ (c) 给出了圆环外径 $R_2=10$ cm，内径 R_1 分别为4 cm、7 cm和9.5 cm时， $z=8$ cm平面上归一化剂量分布。图7给出了环外径 $R_2=10$ cm， $z=8$ cm平面上，均匀性 $>80\%$ 的面积与环内径 R_1 的关系。

由图6、7可知，计算区域内剂量均匀性随着环内径而增大，但是，环的内径继续增大时，环中心投影区域的剂量反而会逐渐减小； $R_1=4$ cm时，环的内圈对 $z=8$ cm平面上的剂量的贡献主要集中在环中心投影点附近。因此，内径变小只是增强了环中心投影点附近的剂量，而平面上的剂量均匀性反而会变差，但是，内径增大使得内外径之差变得较小时，也会进一步减小环中心投影点附近的剂量。

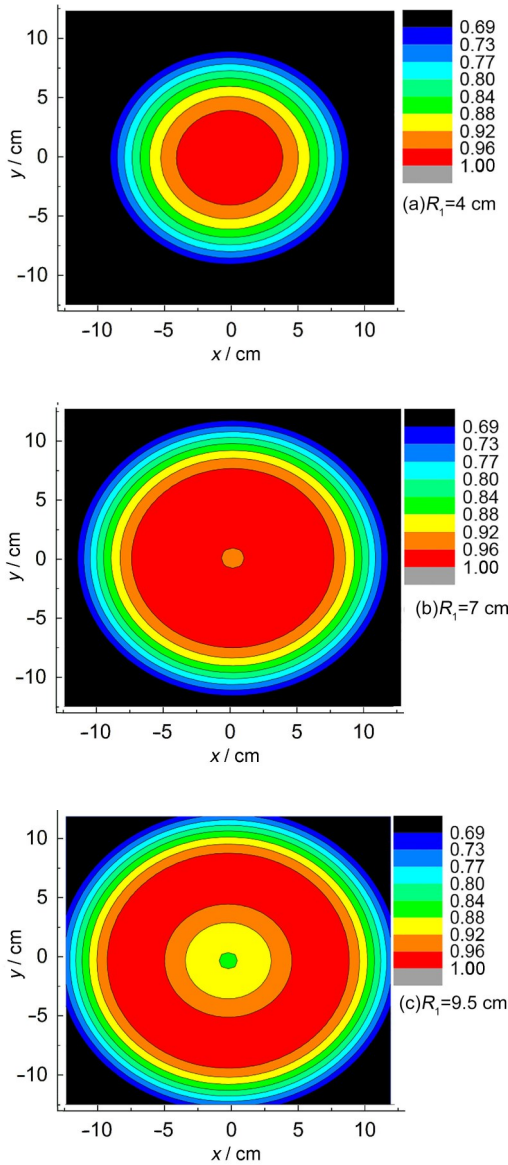


图6 $R_2=10$ cm, 内径不同时, $z=8$ cm 平面上归一化剂量分布: (a) $R_1=4$ cm; (b) $R_1=7$ cm; (c) $R_1=9.5$ cm
 Fig.6 Dose distribution with different inner radius of $z=8$ cm plane: (a) $R_1=4$ cm; (b) $R_1=7$ cm; (c) $R_1=9.5$ cm

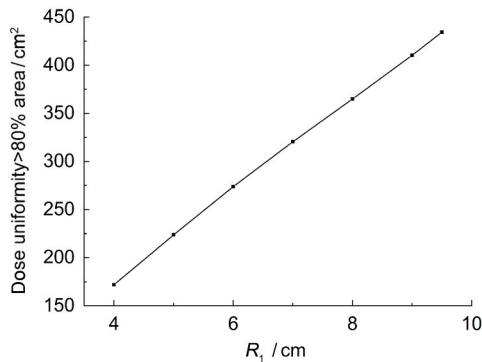


图7 均匀性 >80% 的面积与环内径的关系
 Fig.7 Relationship between the dose uniformity and ring radius

3 五路并联二极管辐射场

3.1 计算模型

如图8所示, 圆环在 xoy 平面上, 5个圆环的圆心坐标分别为(15,15)、(45,15)、(15,45)、(45,45)和(30,30), 圆环内径 $R_1=9$ cm, 外径 $R_2=10$ cm。划分小面元时, 圆周方向网格数3 000, 半径方向网格数10。对称轴和对角线方向的定义如图8所示, 测量点在边长为60 cm的正方形平面上。

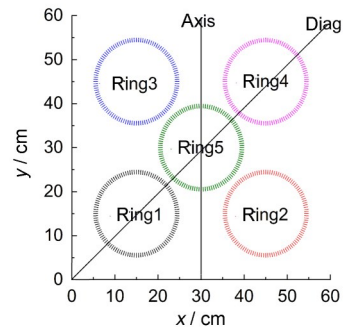


图8 五路圆环模型
 Fig.8 Fivering model

3.2 剂量分布结果

图9 (a) ~ (d) 分别给出了 z 为3 cm、7 cm、9 cm和11 cm平面上的归一化剂量分布。可以看出, 距离圆环很近的平面上, 辐射主要集中在圆环在该平面的投影位置; 随着距离的增大, 辐射向其他区域逐渐分散, 距离进一步增大时, 环中心投影位置的辐射最大, 环投影处的辐射逐渐减小; 由于叠加作用, 环5相邻区域的剂量最大。

图10 (a) ~ (d) 和图11 (a) ~ (d) 分别给出了 z 为3 cm、7 cm、9 cm和11 cm平面上对角线方向与中轴线方向的归一化剂量分布。由图10和图11可知: (1) 环2、环3对对角线上剂量的贡献相同, 环1、环4对对角线上剂量的贡献以点(30, 30)对称; (2) 环1与环2、环3与环4对中轴线上剂量的贡献相同; (3) 环5对中轴线和对角线上剂量的贡献相同, 出现这种情况的原因是中轴线和 diagonal 均为环5的对称轴; (4) 距离不同时, 环2、环3对对角线方向剂量贡献的分布大致相同, 而环1、环4、环5的贡献由马鞍形逐渐过渡为梯形; (5) 距离不同时, 环1、环2、环3、环4对中轴线方向剂量的贡献的分布大致相同, 而环5的贡献由马鞍形状逐渐过渡为梯形。

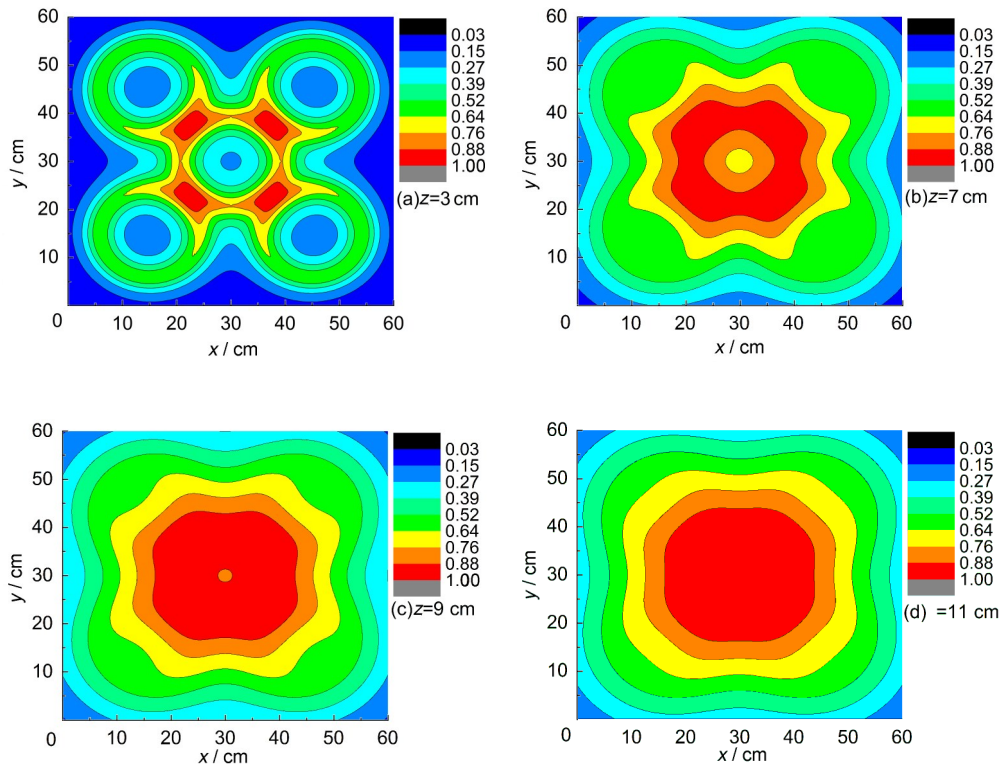


图9 不同平面上归一化剂量分布 $z=(a)3\text{ cm}$ 、 $(b)7\text{ cm}$ 、 $(c)9\text{ cm}$ 和 $(d)11\text{ cm}$
 Fig.9 Dose distribution of different planes of $z=(a)3\text{ cm}$, $(b)7\text{ cm}$, $(c)9\text{ cm}$, and $(d)11\text{ cm}$

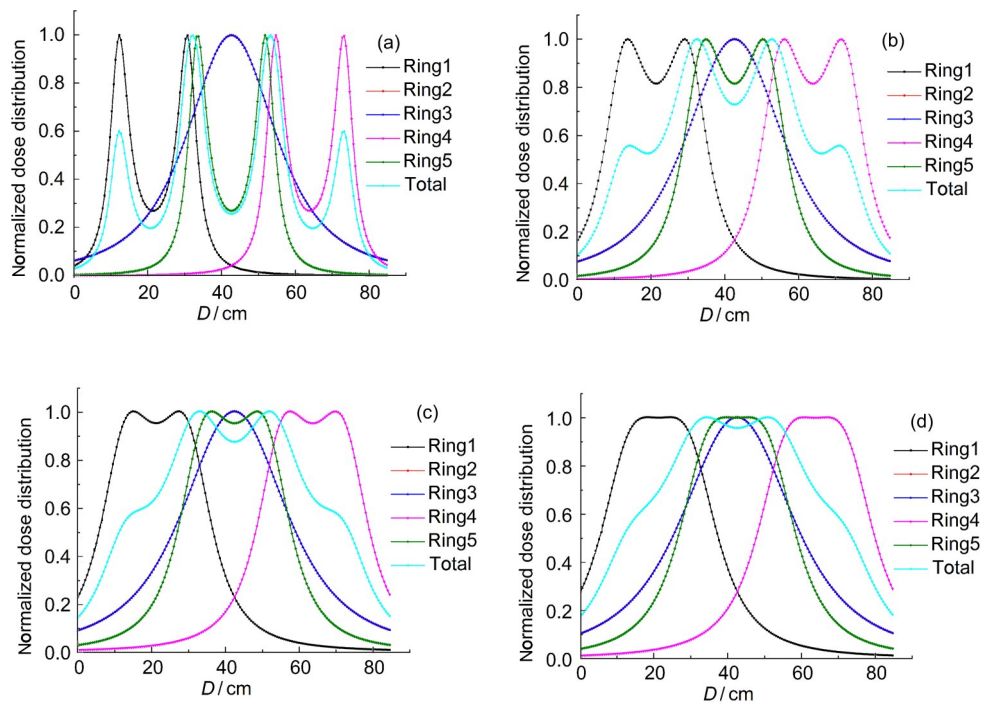


图10 不同距离处圆环对角线方向归一化剂量分布 $z=(a)3\text{ cm}$ 、 $(b)7\text{ cm}$ 、 $(c)9\text{ cm}$ 和 $(d)11\text{ cm}$
 Fig.10 Dose distribution in the diagonal direction at different distances of $z=(a)3\text{ cm}$, $(b)7\text{ cm}$, $(c)9\text{ cm}$, and $(d)11\text{ cm}$

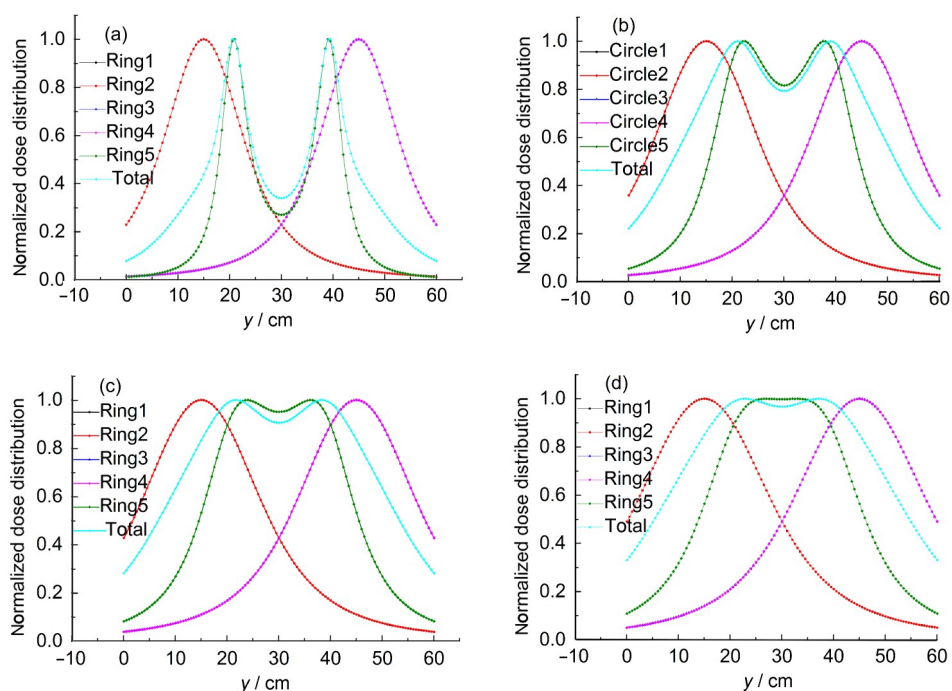


图 11 不同距离处圆环中轴线方向归一化剂量分布:(a) 3 cm、(b)7 cm、(c)9 cm、(d)11 cm(彩色见网络版)
Fig.11 Dose distribution in the axis direction at different distances of z =(a) 3cm, (b) 7cm, (c) 9 cm, and (d) 11 cm (color online)

图 12 给出了剂量均匀性 $>80\%$ 的面积与距离的关系。比较图 4、12 可以看出, $z=7$ cm 时, 单环剂量均匀性出现明显的向下拐点, 而在 $z=11\sim 17$ cm 范围内, 五环剂量均匀性也没有出现大的波动。

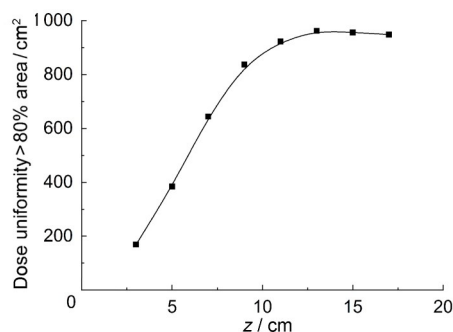


图 12 剂量均匀性 $>80\%$ 的面积与距离的关系
Fig.12 Relationship between the dose uniformity and distance

4 结论

采用点源数值积分的方法开展了单路二极管和五路并联二极管的辐射场剂量均匀性研究。结果表明: 随着距离的增大, 每一个环的辐射场由马鞍形到余弦形最后过渡到梯形, 圆环内径的大小对剂量均匀性的影响较大; 相比单环, 多环并联结构能够大幅增强辐射剂量、明显改善辐射场

剂量均匀性和显著增大有效实验区域。二极管优化设计中, 需要根据模拟装置对 X 射线光子能量、剂量率、辐射面积以及剂量均匀性的要求, 合理选择多路并联二极管的路数和环的内外径; 同时, 辐照实验中, 应根据模拟装置的特点和对辐射场参数的要求, 合理选择实验区域。

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; 吴伟和第一作者讨论提出研究思路、指导开展研究、初稿修改; 刘逸飞和赵墨参与了程序编写和数据处理、初稿修改; 聂鑫参与研究思路讨论与初稿修改。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

参考文献

- 刘锡三. 强流粒子束及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
LIU Xisan. Intense particle beams and it applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- 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.
- 3 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.
- 4 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 Yinhui, 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.
- 5 张含天, 周前红, 周海京, 等. 二次电子发射对系统电磁脉冲的影响[J]. 物理学报, 2021, **70**(16): 195-203. DOI: 10.7498/aps.70.20210461.
- ZHANG Hantian, ZHOU Qianhong, ZHOU Haijing, *et al.* Effect of secondary electrons on SGEMP response[J]. Acta Physica Sinica, 2021, **70**(16): 195-203. DOI: 10.7498/aps.70.20210461.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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 & Particle Beams, 2005, **17**(11): 1739-1743.
- 9 钦佩, 唐斌, 傅玉川, 等. 低能电子韧致辐射的蒙特卡罗模拟[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2009, **27**(6): 337-340.
- QIN Pei, TANG Bin, FU Yuchuan, *et al.* Monte Carlo simulation on the bremsstrahlung of low energy electrons [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2009, **27**(6): 337-340.
- 10 钟甜城, 陈林, 郭帆, 等. 耦合同轴磁绝缘传输线的低阻抗大面积韧致辐射二极管设计[J]. 强激光与粒子束, 2017, **29**(6): 30-35. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170004.
- ZHONG Tiancheng, CHEN Lin, GUO Fan, *et al.* Initial design of a low-impedance large-area-bremsstrahlung diode coupled with coaxial MITL[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, **29**(6): 30-35. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170004.
- 11 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.
- 12 李进玺, 邱孟通, 程引会, 等. 四路并联二极管辐射X射线场参数计算[J]. 原子能科学技术, 2015, **49**(8): 1460-1466. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.08.1460.
- LI Jinxi, QIU Mengtong, CHENG Yinhui, *et al.* Calculation of X-ray field parameters generated by four parallel diodes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(8): 1460-1466. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.08.1460.
- 13 邱爱慈, 李玉虎, 王知广, 等. 强流脉冲相对论电子束加速器: 闪光二号[J]. 强激光与粒子束, 1991, **3**(3): 340-348.
- QIU Aici, LI Yuhu, WANG Zhiguang, *et al.* Flash III- a relativistic electron beam accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1991, **3**(3): 340-348.