

# 基于自生磁场约束效应的脉冲 调制 X 射线源用转换靶

冯兆鹏<sup>1,3</sup>, 汤晓斌<sup>1,2,3†</sup>, 刘云鹏<sup>1,2,3</sup>, 田 锋<sup>1,2</sup>, 苗 恺<sup>1,2</sup>, 赖 生<sup>1,2</sup>

- (1. 南京航空航天大学 核科学与技术系;  
2. 空间核技术应用与辐射防护工业和信息化部重点实验室: 南京 211106;  
3. 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

**摘 要:** 提出了一种基于自生磁场约束效应的调制 X 射线源结构设计方案, 采用蒙特卡罗方法模拟计算了几种后端 X 射线转换靶常见靶材(铬、镍、铜、铑、钯、银、镉、钨、金), 不同转换靶厚度下的 X 射线产额; 计算了在最佳靶厚情况下的 X 射线能谱、空间角度分布及焦点大小; 针对单色 X 射线的应用背景, 计算了几种常见靶材条件下, 不同转换靶厚度对应的特征 X 射线的产额和特征信噪比大小。计算结果表明, 基于自生磁场约束效应的调制 X 射线源具有调制速率快、光子产额高及焦斑尺寸小等优点, 结合单色晶体使用, 可获得强度高及单色性好的 X 射线。

**关键词:** 调制 X 射线源; X 射线转换靶; 蒙特卡罗方法; 最佳靶厚; 特征 X 射线

**中图分类号:** TN14; TL99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12061/j.issn.2095-6223.2022.020601

## Conversion Target for Modulated Pulse X-ray Source Based on Self-Generated Magnetic Field Confinement Effect

FENG Zhaopeng<sup>1,3</sup>, TANG Xiaobin<sup>1,2,3</sup>, LIU Yunpeng<sup>1,2,3</sup>,  
TIAN Feng<sup>1,2</sup>, MIAO Kai<sup>1,2</sup>, LAI Sheng<sup>1,2</sup>

- (1. Department of Nuclear Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics;  
2. Key Laboratory of Nuclear Technology Application and Radiation Protection in Astronautics,  
Ministry of Industry and Information Technology: Nanjing 211106, China;  
3. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In this paper, a structural design scheme of modulated X-ray source based on self-generated magnetic field confinement effect is proposed. The characteristic X-ray yields of conversion targets with different thickness are simulated by Monte Carlo method when several common target materials, such as Cr, Ni, Cu, Rh, Pd, Ag, Cd, W, Au, are used as back-end X-ray conversion targets. The characteristic X-ray energy spectra, the spatial angle distribution, and the size of focus at the optimum conversion target thickness are

**收稿日期:** 2021-05-13; **修回日期:** 2021-08-13

**基金项目:** 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金资助项目(SKLIPR1813)

**†通信作者:** 汤晓斌(1978—), 男, 江苏常州人, 教授, 博士, 主要从事核技术应用相关研究。

**E-mail:** tangxiaobin@nuaa.edu.cn

calculated. According to the application background of monochromatic X-rays, the yields and the characteristic signal-to-noise ratio (CSNR) corresponding to different conversion target thickness of several common target materials are calculated. The results show that the modulated X-ray source based on the self-generated magnetic field confinement effect has the advantages of fast modulation rate, high photon yield, and small focal spot size. Combined with monochromatic crystals, X-rays with high intensity and good monochromaticity can be obtained.

**Keywords:** modulated pulse X-ray source; X-ray conversion target; Monte Carlo method; optimum thickness; characteristic X-ray

X 射线广泛应用于辐照加工、无损检测、工业探伤<sup>[1-2]</sup>及生物医学研究<sup>[3]</sup>等领域。随着 X 射线脉冲技术的进步,脉冲 X 射线的时间分辨率可达到 fs 量级<sup>[4]</sup>,经调制的脉冲 X 射线序列可作为信息载体,用于空间<sup>[5-6]</sup>及特殊屏蔽环境下的通信<sup>[7]</sup>;高时间分辨率的 X 射线脉冲可对高速运动和快速变化的物体进行实时的内部结构成像<sup>[8]</sup>,为医学、工业和科学研究中的实时诊断和连续观测<sup>[9-10]</sup>提供有效手段。

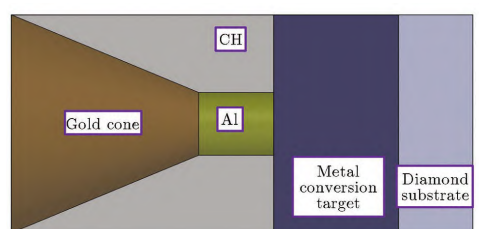
当前,单色性好及强度高的短脉冲调制 X 射线源是 X 射线光源研究的重点方向之一。实验使用的调制 X 射线源主要包括真空热阴极 X 射线管<sup>[11]</sup>和大型 X 射线科学研究装置<sup>[10]</sup>。前者出射的 X 射线亮度小,产生效率小于 1%,调制频率最大仅为百千赫兹量级,难以满足工业生产或科学研究的需求;后者以先进的第 3 代同步辐射光源和 X 射线自由电子激光为代表,受体积大及价格高等因素的限制,难以在实验室中普及。综上,亟需探索新型台面式 X 射线脉冲调制发射技术。

得益于啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)技术<sup>[12]</sup>的发展,如今台面式超快激光驱动光源的峰值亮度可达到第 3 代光源的水平。本文研究团队基于激光等离子体相互作用的机理,提出了一种基于材料数密度梯度和电阻率梯度诱导界面自生磁场约束效应的新型激光等离子体调制的脉冲 X 射线源方案<sup>[13]</sup>,产生的脉冲 X 射线具有时间分辨率高及光子产额大等特点,是一种结构简单及体积小的台面式 X 射线光源。在前期研究中,借助日本大阪大学激光工程研究所的 LFEX 激光装置开展了验证性试验<sup>[13]</sup>。在此基础上,本文根据激光等离子体相互作用时产生的聚焦电子束特性的测量结果,研究了聚焦电子束与 X 射线转换靶作用产生 X 射线的过程,提出了高性能调制 X 射线源的设计方案,并对阳极转换靶的材料和结构进行了优化。

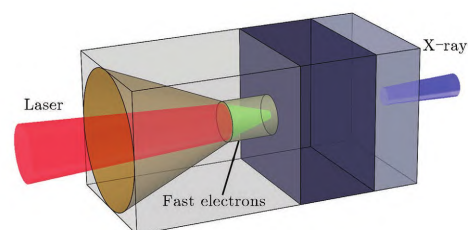
## 1 基于自生磁场约束效应的调制 X 射线源设计

基于自生磁场约束效应的调制 X 射线源主要分为激光源和结构靶 2 部分。利用高亮脉冲激光源照射结构靶,在结构靶中激发快电子并诱发自生磁场,获得自聚焦电子束脉冲,电子束与金属靶材相互作用产生韧致辐射,发射 X 射线。

图 1 为结构靶模型,主体分为前端的自聚焦靶和后端的金属转换靶 2 部分。



(a) 2D view



(b) 3D view

图 1 结构靶模型示意图

Fig. 1 Model of structural target

X 射线源的调制过程其实就是对电子运输的控制过程。超短超强激光与等离子体固体靶相互作用过程中会产生大量快电子,并使靶材迅速升温,然后快电子进一步向靶内输运,最终与金属转换靶作用,以韧致辐射的方式产生连续分布的 X 射线。因此,

通过调控调制激光的强度和脉冲周期等参数,便可控制输出 X 射线的光子数和脉冲周期等关键性参数,产生调制 X 射线<sup>[13]</sup>。

自聚焦靶整体由金锥和自聚焦结构组成,自聚焦结构连接在开口金锥的后面,用于将大多数激光能量沉积到锥尖,与靶区作用产生快电子。在金锥顶尖后面连接着插入铝(Al)块中的塑料(CH)结构,铝和塑料形成材料数密度梯度和电阻率梯度,诱导产生巨大的自生磁场<sup>[13-14]</sup>,实现对快电子的自聚焦。当一束波长 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$ ,能量 $E = 350 \text{ J}$ ,焦斑大小 $r = 30 \mu\text{m}$ (半高宽),脉冲宽度 $\tau = 1.5 \text{ ps}$ (半高宽),时间与空间均为高斯分布的 LFEX 激光入射时,测量获得自聚焦电子束的横向空间分布尺寸为 $76.3 \pm 4.1 \mu\text{m}$ (半高宽)<sup>[13]</sup>。较小的电子束空间尺寸保证了后端产生 X 射线的微焦点特性,而 ps 量级的脉冲宽度使调制 X 射线源的理论调制速率可达到 GHz 量级。后端的 X 射线转换靶用于将前端产生的自聚焦电子束转换为 X 射线射出,X 射线强度的大小主要由电子束能量、转换靶材质及转换靶结构决定。通过对后端转换靶的材质和厚度进行优化,可提升射线源的 X 射线发射强度<sup>[15-16]</sup>。鉴于前端自聚焦靶产生的电子束能量较高,采用反射式阳极靶的设计存在散热困难和 X 射线产额低等问题,本文将金属转换靶选为透射结构,利用金刚石高硬度和快散热的特性,将金属阳极镀于 $300 \mu\text{m}$ 厚的金刚石石片上,以满足阳极靶的结构强度和散热需求。

## 2 金属转换靶设计

### 2.1 最佳靶厚

对于透射式转换靶而言,转换靶的材料和厚度是决定 X 射线产额和空间分布的关键因素。因此,本文首先对快电子在转换靶中的输运过程进行蒙特卡罗模拟。本文采用 MCNP 程序,建立了基于自生磁场约束效应的调制 X 射线源后端转换靶仿真模型。在仿真过程中,电子源根据实验测量获得的快电子参数进行简化设置,在出射平面上为平面高斯分布,半高宽为 $76.3 \mu\text{m}$ ,电子能量为 $4.855 \text{ MeV}$ <sup>[13]</sup>,出射方向垂直于转换靶的靶面。将转换靶的材料和厚度选取为可控变量,计算二者对 X 射线产额、空间分布和焦斑大小等性能参数的影响。表 1 列出了本文考虑的 9 种常见金属转换靶材料。

表 1 常见 X 射线转换靶材料

Tab. 1 Common X-ray conversion target material

Material	Atomic number	Density/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
Cr (chromium)	24	7.19
Ni (nickel)	28	8.902
Cu (copper)	29	8.96
Rh (rhodium)	45	12.41
Pd (palladium)	46	12.023
Ag (silver)	47	10.53
Cd (cadmium)	48	8.65
W (tungsten)	74	19.35
Au (gold)	79	19.32

MCNP 会对光子计数的结果进行归一化,因此,X 射线光子数的统计计算结果即为相同电子源条件下的 X 射线光子产额。图 2 为不同转换靶材料下,X 射线产额  $Y$  随转换靶厚度  $H$  的变化关系。X 射线产额为产生的 X 射线光子数与入射电子数的比值,已由 MCNP 自动归一化处理。由图 2 可见,不同转换靶的仿真结果具有相同的规律:随着转换靶厚度的上升,产生 X 射线的强度出现先上升后下降的趋势;转换靶的原子序数越大,X 射线产额峰值就越高,达到 X 射线产额峰值时的转换靶厚度越小。将获得 X 射线光子产额峰值时对应的转换靶厚度称为该种靶材的最佳靶厚  $H_{\text{opt}}$ ,其中,金靶的  $H_{\text{opt}}$  最小,为 $576 \mu\text{m}$ ,铜靶的  $H_{\text{opt}}$  最大,为 $1596 \mu\text{m}$ 。此外,得益于较高的电子束能量,转换靶在最佳靶厚下得到的 X 射线光子产额比传统小型实验室调制 X 射线源( $Y < 1\%$ )最大提高了约 60 倍。

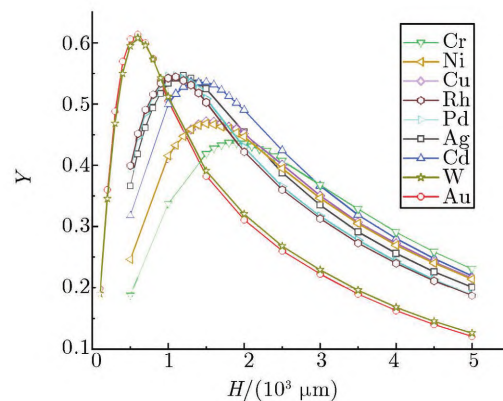
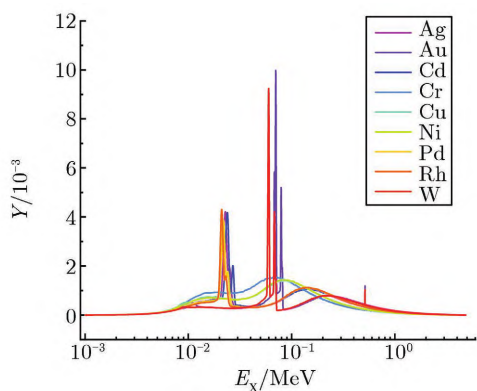


图 2 不同转换靶材料下,X 射线产额随转换靶厚度的变化关系

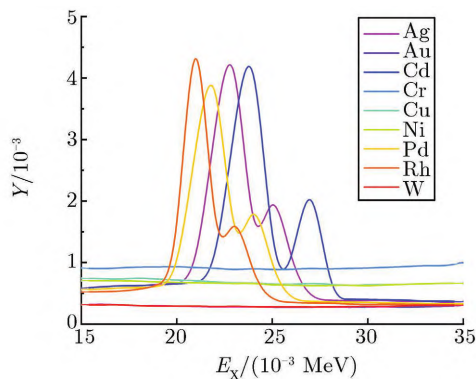
Fig. 2 The yield of X-ray vs. the thickness of different conversion target materials



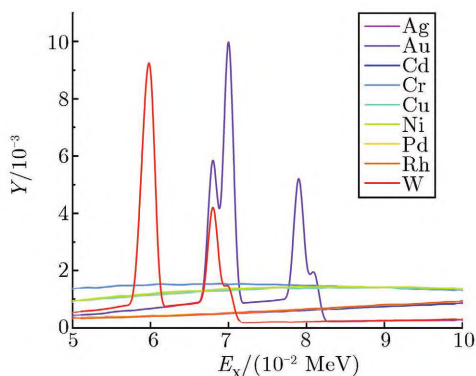
在 MCNP 中划分能量箱,对处于最佳靶厚下的 9 种转换靶产生的 X 射线光子能量  $E_x$  进行统计,统计结果如图 3 所示。由图 3 可见,基于自生磁场约束效应的调制 X 射线源产生的 X 射线光子能量主要分布在 1 MeV 以下,该能段的光子数占能谱内总光子数的 75% 以上,其中:Rh, Pd, Ag, Cd 4 种材料在 20~30 keV 能段上出现了明显的  $K\alpha$  和  $K\beta$  特征谱线;W, Au 2 种材料的转换靶  $K\alpha$  和  $K\beta$  特征谱线能量在 55~80 keV 能段;Cr, Ni, Cu 3 种材料转换靶产生的特征谱线强度较低,仅为 W 靶的 1/50。此外,在 0.511 MeV 处,存在正负电子湮灭产生的 X 射线离散谱,强度与靶材的原子序数正相关。



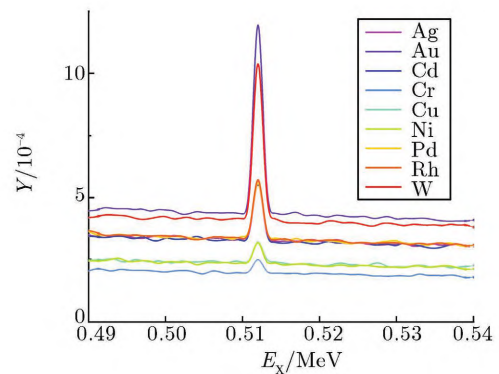
(a) Complete X-ray spectra



(b) 15~35 keV characteristic spectra



(c) 50~100 keV characteristic spectra



(d) Annihilation peak

图 3 靶厚为  $H_{opt}$  时,不同转换靶产生的 X 射线能谱Fig. 3 X-ray energy spectra produced by different conversion targets with the target thickness of  $H_{opt}$ 

## 2.2 X 射线的空间分布

在垂直于转换靶靶面的平面上,以转换靶出射面中心为圆心,环绕转换靶以  $5^\circ$  为间隔放置一周探测计数器,记录靶厚为  $H_{opt}$  时转换靶产生 X 射线的空间分布情况。图 4 为探测器记录得到的 X 射线产额  $Y$  随角度  $\theta$  的变化关系。由图 4 可见,由于自聚焦靶产生的电子能量在 MeV 量级,且金属转换靶采用了透射式设计,所以产生的 X 射线具有较好的前向性;对比各种材料的金属转换靶,在最佳靶厚条件下,原子序数越小的材料, X 射线出射的轴向强度越大,而原子序数越大,大角度 X 射线产额就越高。

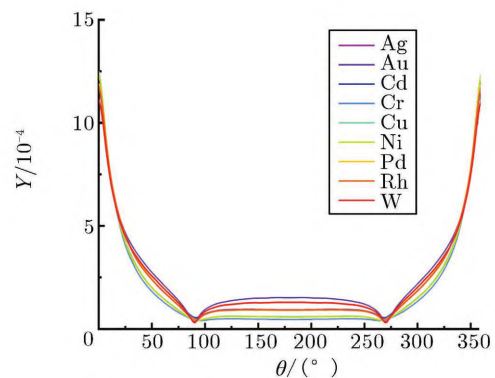
图 4 X 射线产额  $Y$  随角度  $\theta$  的变化关系

Fig. 4 Yield of X-ray vs. angle

## 2.3 X 射线焦点大小

电子束轰击透射型靶时,入射电子与靶材内部原子间发生碰撞及散射等多种能量传递过程。电子束的直径随着穿透深度的增大而增加,导致电子能量沉积的范围随深度增大逐渐扩张,与电子束面积相比,产生 X 射线焦点的面积有所增加。本文在转换靶的 X 射线出射平面上,划分计数网格,记录出

射平面上的 X 射线分布情况,如图 5 所示。由图 5 可见,X 射线在出射平面上呈典型的高斯分布,不同的转换靶材料在最佳靶厚下的 X 射线相对峰值强度及半高宽(full width at half maximum,FWHM)呈现出明显的差异性。整体来看,与入射电子焦斑相比,X 射线焦斑宽度增大,转换靶材料的 Z 越大,对应的 X 射线焦斑宽度越小,产生的 X 射线相对峰值强度越高。

结合 X 射线转换靶的散热及熔点等因素,在后端 X 射线转换靶的设计中,采用 603  $\mu\text{m}$  厚的 W 靶设计可在获得最大 X 射线产额的情况下,将 X 射线焦斑宽度  $r$  限制在百微米量级。

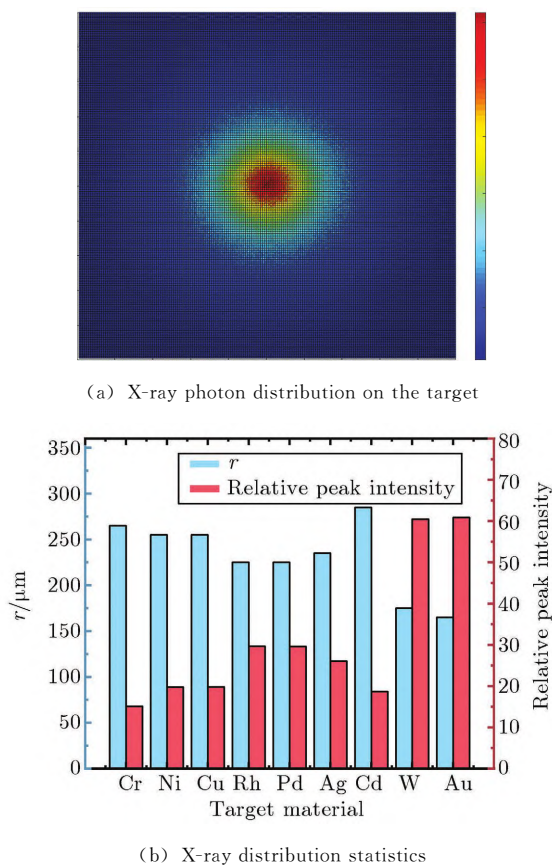


图 5 X 射线焦斑宽度和强度分布  
Fig. 5 The size and the intensity distributions of X-ray focal spot

### 2.4 特征 X 射线信噪比

在等离子体诊断和材料分析等应用场景中,通常需要将射线源和单色晶体配合使用,获得单能 X 射线光子,这对射线源产生的特征 X 射线强度及特征信噪比(characteristic signal-to-noise ratio, CSNR) $\eta_{\text{CSNR}}$  提出了较高的要求。射线源的  $\eta_{\text{CSNR}}$  为某种特征 X 射线的产额和 X 射线总产额的比值。

为使本文提出的 X 射线源具有较好的单色性,对比了几种靶材料的转换靶在不同厚度下产生的  $\text{K}\alpha$  特征 X 射线的峰值强度及  $\eta_{\text{CSNR}}$ 。

图 6 为转换靶厚度不同时的 X 射线能谱。由图 6 可见,当靶厚为  $H_{\text{opt}}$  时,X 射线总产额可达到最大,但特征 X 射线的产额却并非最大。因此,需要针对不同的靶材料,选择对应的厚度,使特征 X 射线产额最大。

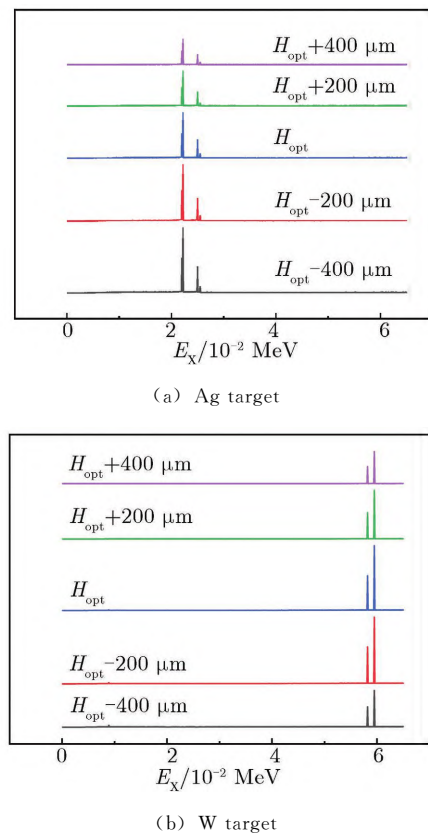
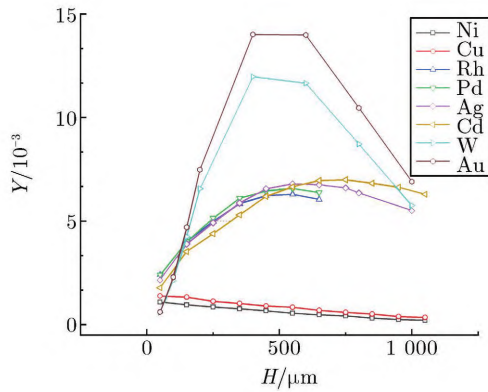


图 6 不同靶厚下的 X 射线能谱

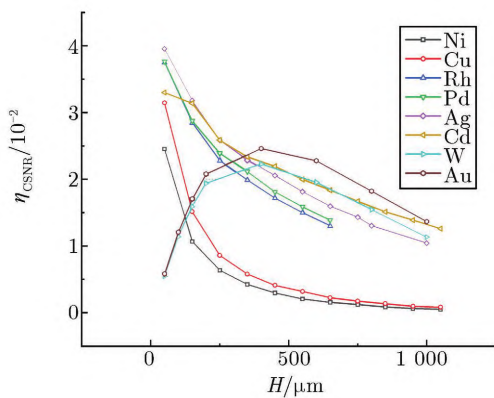
Fig. 6 X-ray energy spectra under different target thickness

图 7 为  $\text{K}\alpha$  特征 X 射线产额与  $\eta_{\text{CSNR}}$  随转换靶厚度的变化关系。X 射线总产额、特征 X 射线产额和 CSNR 最大时的转换靶厚度列于表 2,分别以  $H_{\text{opt}}, H_{\text{chr}}, H_{\text{CSNR}}$  表示。由图 7 和表 2 可见, $\text{K}\alpha$  特征 X 射线产额受转换靶厚度的影响程度主要与靶材料的原子序数有关。对于 Cu, Ni 2 种低 Z 材料,达到特征 X 射线产额峰值时对应的转换靶厚度  $H_{\text{chr}}$  小于  $50 \mu\text{m}$ ,特征 X 射线的产额和 CSNR 皆随转换靶厚度的增加而减小,特征 X 射线产额比高 Z 材料较小。另一种低 Z 材料 Cr 的特征谱线极不明显,本文不做考虑。对于原子序数相近的 Rh, Pd, Ag, Cd 4 种材料,特征 X 射线的产额随厚度增大呈先增大后减小的趋势, $\eta_{\text{CSNR}}$  随厚度的增大而递减,

且  $Z$  越大,  $H_{\text{chr}}$  越大。对于高  $Z$  材料 W 和 Au,  $H_{\text{chr}}$  与  $H_{\text{opt}}$  在数值上相近, 随转换靶厚度的增大皆呈先增大后减小的变化趋势。



(a) Yield of  $K\alpha$  characteristic X-ray



(b) CSNR of  $K\alpha$  characteristic X-ray

图 7  $K\alpha$  特征 X 射线产额与  $\eta_{\text{CSNR}}$  随转换靶厚度的变化关系

Fig. 7 The  $K\alpha$  characteristic X-ray yield and  $\eta_{\text{CSNR}}$  vs. the target thickness

表 2 不同靶材的  $H_{\text{opt}}$ ,  $H_{\text{chr}}$  和  $H_{\text{CSNR}}$

Tab. 2  $H_{\text{opt}}$ ,  $H_{\text{chr}}$  and  $H_{\text{CSNR}}$  of different target materials

Target	$H/\mu\text{m}$		
	$H_{\text{opt}}$	$H_{\text{chr}}$	$H_{\text{CSNR}}$
Ni	1 484	<50	<50
Cu	1 596	<50	<50
Rh	1 048	502	<50
Pd	1 082	514	<50
Ag	1 211	557	<50
Cd	1 424	713	<50
W	603	500	430
Au	576	491	376

由表 2 可知,  $H_{\text{opt}}$  与  $H_{\text{chr}}$  随原子序数  $Z$  的变化趋势出现极大差异, 这主要是由不同靶材的特征 X 射线的能量及能量分布差异所致。低  $Z$  材料产生的  $K\alpha$  特征谱线能量较小, 随着转换靶厚度增大, 转换靶对特征 X 射线的吸收作用占据主导地位, 导致 CSNR 降低; 对于高  $Z$  材料,  $K\alpha$  特征谱线能量较高, 穿透性更强, 因此特征 X 射线受到传输靶吸收作用相对较小, 特征 X 射线产额与总产额随转换靶厚度的变化趋势相近。

### 3 总结与展望

本文研究了基于自生磁场约束效应的脉冲调制 X 射线源金属转换靶, 利用 MCNP 模拟了电子束在后端转换靶中的输运过程, 计算了几种常用转换靶材料对应的最佳靶厚, 分析了产生 X 射线的空间角度分布及 X 射线焦斑宽度, 探究了特征 X 射线的 CSNR 和产额随转换靶厚度的变化关系。与当前的实验室所用小型调制 X 射线源相比, 基于自生磁场约束效应的调制 X 射线源具有调制速率快、光子产额高及焦斑尺寸小等优点, 结合单色晶体使用, 可获得强度高和单色性好的 X 射线。根据本文研究结果, 对转换靶的材质和结构尺寸进行调整, 满足不同 X 射线能段需求, 可广泛应用于材料分析、等离子体诊断及 X 射线通信等场景中。

### 参考文献

- [1] JONES C P, BRENNER C M, STITT C A, et al. Evaluating laser-driven bremsstrahlung radiation sources for imaging and analysis of nuclear waste packages[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 318: 694 - 701.
- [2] LARSON B C, YANG W G, ICE G E, et al. Three-dimensional X-ray structural microscopy with submicrometre resolution [J]. Nature, 2002, 415(6 874): 887 - 890.
- [3] CHEN H M, WANG G D, CHUANG Y J, et al. Nanoscintillator-mediated X-ray inducible photodynamic therapy for in vivo cancer treatment[J]. Nano Lett, 2015, 15(4): 2 249 - 2 256.
- [4] KEALHOFER C, FOREMAN S, KASEVICH M. Ultrafast X-ray point source for space-based communications [C]// Stanfords 2009 PNT Challenges and Opportunities Symposium, Stanford, 2009.
- [5] LI H, TANG X B, HANG S, et al. Re-entry blackout elimination and communication performance analysis based on laser-plasma induced X-ray emission[J]. Phys Plasmas, 2019, 26 (3): 033503.
- [6] HANG S, TANG X B, LI H, et al. Novel approach for Mars



- entry blackout elimination based on X-ray communication [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, 56(5): 6 389 - 6 395.
- [7] MU J X, TANG X B, LIU Y P, et al. High penetration X-ray communication under physical shielding[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2020, 28(2): 187 - 196.
- [8] MILLER S, SINGH B, COOL S, et al. Ultrahigh-speed X-ray imaging of hypervelocity projectiles[J]. Nuclear Instrum Methods Phys Res A, 2011, 648(Suppl 1): 5 293 - 5 296.
- [9] OBARA H, ZUGUCHI M, SATO E, et al. Application of harder stroboscopic X-ray generator to high-speed radiography [J]. Proc of SPIE, 2001, 4 183.
- [10] CUNNINGHAM R, ZHAO C, PARAB N, et al. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultra-high-speed X-ray imaging [J]. Science, 2019, 363 (6 429): 849 - 852.
- [11] 马晓飞, 赵宝升, 盛立志, 等. 用于空间 X 射线通信的栅极控制脉冲发射源研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(16): 160701. (MA Xiao-fei, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, et al. Grid-controlled emission source for space X-ray communication[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(16): 160701.)
- [12] MAINE P, STRICKLAND D, BADO P, et al. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. IEEE J Quantum electronics, 1988, 24(2): 398 - 403.
- [13] LI H, TANG X B, HANG S, et al. High directional laser-plasma-induced X-ray source assisted by collimated electron beams in targets with a self-generated magnetic field [J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 144: 193 - 201.
- [14] DAWSON J. One-dimensional plasma model [J]. Phys Fluids, 1962, 5(4): 445 - 459.
- [15] 刘保杰, 朱志斌, 李金海. 7.5 MeV 电子束 X 射线转换靶的设计研究[C]//中国核学会 2017 年学术年会, 威海, 2017. (LIU Bao-jie, ZHU Zhi-bin, LI Jin-hai. Study on X-ray converter design of 7.5 MeV electron beam[C]//2017 Annual Conference of Chinese Nuclear Society, Weihai, 2017.)
- [16] 张耀锋, 黄建微, 胡涛, 等. 高功率致辐射 X 射线转换靶设计 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2015, 51(1): 36 - 39. (ZHANG Yao-feng, HUANG Jian-wei, HU Tao, et al. Bremsstrahlung X-ray converter design for a high power electron linear accelerator [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2015, 51(1): 36 - 39.)

上接第 020503-6 页

- [12] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment-section 9: Description of HEMP environment-radiated disturbance: IEC 61000-2-9[S]. 1996.
- [13] BAUM C E. Some considerations concerning analytic EMP criteria waveforms: Note 285 [R]. Air Force Weapons Laboratory, 1976.
- [14] HOAD R, RADASKY W A. Progress in high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) standardization [J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2013, 55(3): 532 - 538.
- [15] 程引会, 马良, 李进玺, 等. 确定高空电磁脉冲标准波形参数的频域方法 [J]. 现代应用物理, 2014, 5(2): 135 - 139. (CHENG Yin-hui, MA Liang, LI Jin-xi, et al. Frequency-domain method for determining HEMP standard waveform parameters [J]. Modern Applied Physics, 2014, 5(2): 135 - 139.)
- [16] MENG C. Numerical simulation of the HEMP environment [J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2013, 55(3): 440 - 455.
- [17] 高春霞, 陈雨生, 王良厚. 中空核爆电磁脉冲二维数值模拟研究[C]//中国科协学术年会, 乌鲁木齐, 2005. (GAO Chun-xia, CHEN Yu-sheng, WANG Hou-liang. Medium altitude nuclear electromagnetic pulse simulation in 2-D space [C]// Academic Annual Meeting of China Association of Science and technology, Urumqi, 2005.)
- [18] 程引会, 李进玺, 马良, 等. 高空电磁脉冲环境计算中的自洽方法 [J]. 计算物理, 2017, 34(4): 403 - 408. (CHENG Yin-hui, LI Jin-xi, MA Liang, et al. Self-consistent method in calculation of high-altitude electromagnetic pulse environment [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2017, 34(4): 403 - 408.)
- [19] GIRI D V, PRATHER W D, BAUM C E. The relationship between NEMP standards and simulator performance specifications: Note 538 [R]. Air Force Weapons Laboratory, 2009.
- [20] 余稳, 蔡新华, 黄文华, 等. 电磁脉冲对半导体器件的电流模式破坏 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(3): 355 - 358. (YU Wen, CAI Xin-hua, HUANG Wen-hua, et al. The current mode destroy of semiconductor devices by electromagnetic pulse [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11 (3): 355 - 358.)
- [21] 周怀安, 杜正伟, 龚克. 双极型晶体管在强电磁脉冲作用下的瞬态响应 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(12): 1 861 - 1 864. (ZHOU Huai-an, DU Zheng-wei, GONG Ke. Transient response of bipolar junction transistor under intense electromagnetic pulse [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(12): 1 861 - 1 864.)