



·粒子束及加速器技术·

强流加速器基于空间限束的亚毫米焦斑产生技术研究

王 毅, 李 劲, 李 勤, 代志勇

(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)

摘 要: 焦斑大小是评价加速器性能的关键指标之一, 减小焦斑尺寸可以有效提高闪光照相中对客体成像的空间分辨能力。本文研究设计空间限束结构, 减小加速器光源焦斑的有效尺寸降低成像几何模糊。采用蒙特卡罗方法对电子束打靶产生韧致辐射和光子穿过空间限束结构的成像过程进行模拟, 分析采用不同空间限束结构时光源有效焦斑的分布及大小、光子角度分布和能谱分布等特征参数。理论计算结果表明, 通过空间限束可以使强流加速器光源焦斑 FWHM 减小至亚毫米量级。

关键词: 直线感应加速器; 韧致辐射; 空间限束; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: O434.1; TL506

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190166

Generation of sub-mm focal spot for intense-current accelerator utilizing spatial collimating restriction

Wang Yi, Li Jin, Li Qin, Dai Zhiyong

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Focal spot size is a key parameter for evaluating the resolving power of the accelerator. A reduction in the focal spot size can effectively improve the spatial resolution of the object. This work studies and designs collimator structures for spatial restriction, which help to reduce the geometry blur of imaging and thus obtain a smaller effective spot-size. The Monte Carlo method is applied to simulate the generation of the light source and the imaging process of the spatial restriction structures. The parameters of the light source with different collimator structures are analyzed, including the distribution and size of the effective focal spot, the angular distribution and the spectrum of the photons. Theoretical calculations show that an effective focal spot size with a sub-mm scale can be obtained by means of spatial restriction at the expense of a partial loss of the field-of-view and the exposure.

Key words: linear induction accelerator; bremsstrahlung radiation; spatial restriction; Monte Carlo simulation

在闪光照相中, 直线感应加速器产生出高能(18~20 MeV)、强流(2~2.5 kA)的脉冲电子束, 经磁透镜聚焦后轰击到高原子序数靶上发生韧致辐射, 为流体动力学过程的实验诊断研究提供高通量的光源^[1-3]。焦斑大小是评价加速器性能的关键指标之一, 减小焦斑尺寸可以降低成像的几何模糊, 从而有效提高客体内部边界的空间分辨能力^[4]。光源焦斑的分布及大小是由电子束聚焦打靶时的状态以及电子与转换靶的作用过程所决定的。由于受到电子束的发射度、能散度、聚焦磁场匹配以及靶材特性、结构等条件因素的限制, 进一步减小强流加速器光源焦斑的 FWHM 至亚毫米量级存在相当大的困难。闪光照相中引起成像几何模糊的根本原因在于光源源面具有一定的横向尺寸, 源面不同位置处出射的光子穿过某一物点后到达像平面上会形成一定的空间展宽。通过在光路中设置空间限束结构, 能够限制源面上可以到达同一物点的光子出射位置范围, 从而降低客体成像时的几何模糊, 获得更小的有效焦斑尺寸。但与此同时, 光源的空间视场将受到一定限制, 照射到客体的光子的能谱分布也将发生相应变化。

本文采用蒙特卡罗方法, 对一定发射度条件下电子束打靶时的韧致辐射和光子穿过空间限束结构的成像过程进行模拟, 计算分析不同空间限束结构对光源有效焦斑分布及大小, 光场空间分布和光子能谱分布的影响。

* 收稿日期: 2019-05-15; 修订日期: 2020-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(11875242)

作者简介: 王 毅(1983—), 男, 博士, 从事强流电子束及 X 光探测技术研究; wangyi_caep@163.com。

1 空间限束结构

能量为 18~20 MeV 的电子束聚焦打靶后产生光子,其平均能量可达到 MeV 量级,具有极强的穿透性。空间限束装置(图 1)需采用较厚的高密度材料(如钨、铅等)制作。研究中采用钨作为基体材料,其密度可达到约 19 g/cm³,其厚度为其厚度为 $L = 100$ mm,可以保证光子基本不能穿透整个基本材料(透射率低于 1%)。为使光源经过空间限束后仍具有较好的空间视场角度范围,限束装置需采用锥孔结构,且位置尽可能靠近靶面。

本文设计分析两种限束准直结构参数:(1)准直结构 1:锥孔入口直径 $d_1 = 0.5$ mm,出口直径 $d_2 = 4.0$ mm;(2)准直结构 2:锥孔入口直径 $d_1 = 0.7$ mm,出口直径 $d_2 = 4.2$ mm。两种结构的基体厚度均为 $L = 100$ mm。通过计算可知,两种结构下锥孔的几何张角均为 $\alpha = 2\arctan[(d_2 - d_1)/2L] \approx 2.0^\circ$ 。

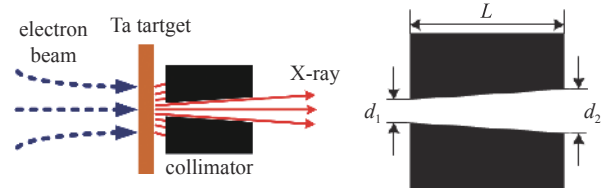


Fig. 1 Schematic of X-ray collimating

图 1 空间限束结构示意图

2 模拟计算的建模与方法

蒙特卡罗方法是一种基于随机抽样的统计实验方法,广泛应用于电子、光子等粒子输运问题研究。通用的蒙特卡罗方法包括 MCNP^[5], Geant4^[6] 和 EGS^[7] 等,其中以美国 LANL 应用理论物理部蒙特卡罗小组研制的 MCNP 最为著名。本文应用 MCNP 程序对电子束轰击靶材的韧致辐射和光子穿过限束结构的辐射成像过程进行模拟,分析比较空间限束对光源有效焦斑的分布及大小、光子空间角度分布和能谱分布的影响。

高能电子束打靶产生的光子具有很强的前冲性,电子在靶材内的运动路径以及光子出射的空间分布均与电子束的发射度和聚焦状态密切相关^[8]。电子束的归一化均方根发射度可以表示为

$$\epsilon_{\text{rms}} = \beta\gamma(\bar{x}^2\bar{x}'^2 - \langle\bar{x}\bar{x}'\rangle^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中: β 表示电子相对论速度因子; γ 表示相对论能量因子; \bar{x} 和 \bar{x}' 分别表示 x 方向的均方根半径和均方根发散角。当靶材位于电子束束腰处时,靶面上电子束归一化均方根发射度的表达式可简化为

$$\epsilon_{\text{rms}} = \beta\gamma\bar{x}\bar{x}' \quad (2)$$

在实际相空间中,电子束的位置与发散角具有相关性,在半径越小的位置上电子束发散角宽度越大。为简单起见,建模时将电子束半径和发散角考虑为相互独立的高斯分布。

光源空间尺寸及分布导致成像几何模糊的原因在于,光源具有一定的横向尺寸,当源面上不同位置出射光子经过某一特定物点后,会在到达像平面时形成一定空间展宽。而这一过程与理想小孔成像完全一致,因此计算时可采用理想小孔成像的方法分析特定物点位置处的有效光源焦斑。MCNP 中提供了针孔成像通量探测器(Flux Image by Pinhole, FIP),可无需构造实际的物理针孔屏蔽体而实现理想小孔的辐射成像模拟。本文研究中针对光源正前方 1 m 处的物点分析光源的有效焦斑。建模时将理想小孔位置设置于光轴上靶前 1 m 处,利用像平面上的成像分布 FWHM(D)和成像布局的物距(源面到理想小孔位置的距离,记为 L_1)像距(像面到理想小孔位置的距离,记为 L_2)关系可以获得光源的有效焦斑 FWHM(D_0),即

$$D_0 = \frac{L_1}{L_2}D \quad (3)$$

模拟计算时,设定打靶电子束能量为 19 MeV,归一化均方根发射度为 750 mm·mrad(对应归一化边发射度为 3 000 mm·mrad)。靶材选用 1.2 mm 厚的钨,限束结构的入射面到钨靶出射面的距离为 2 mm。由式(2)可知,靶面上电子束不同聚焦尺寸对应不同的发散角。如,当靶面上电子束 FWHM 为 2.0 mm 时,可以计算得到其均方根半径和均方根发散角分别为 $\bar{x} = 0.849$ mm 和 $\bar{x}' = 23.1$ mrad。

3 空间限束对光源有效焦斑的影响

当没有空间限束结构时,电子束打靶产生的光源焦斑分布如图 2 所示。打靶电子束均设定为高斯分布,FWHM 分别为 1.5, 2.0 和 3.0 mm。经过空间限束结构后,光源有效焦斑的空间分布如图 3 和 4 所示。

图 5 所示为不同空间限束结构下有效焦斑分布的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)曲线。MTF 的作用相当于一种用于分析空间频谱信息的低通滤波器。在 LANL 定义^[9]里,将不同分布的焦斑等效为在 MTF 峰值一半处具有相同空间频率值($f_{50\%MTF}$)的均匀圆盘分布,此时焦斑尺寸($D_{50\%MTF}$)可用该等效均匀圆盘分布

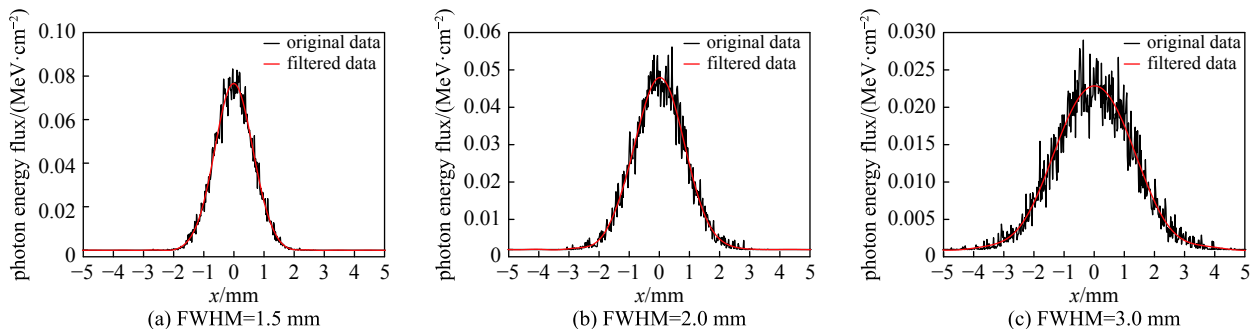


Fig. 2 Spatial distribution of source spot without collimating structure

图2 无准直体时光源焦斑分布

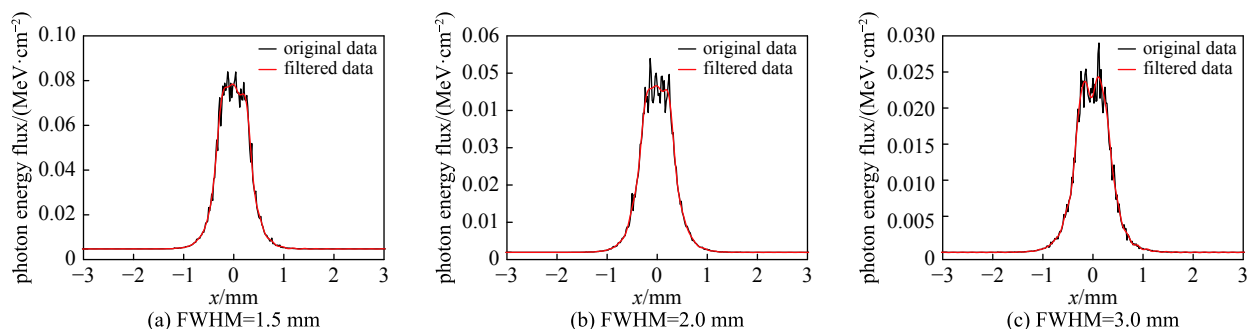


Fig. 3 Spatial distribution of source spot with the 1st collimating structure

图3 准直结构1条件下的光源焦斑分布

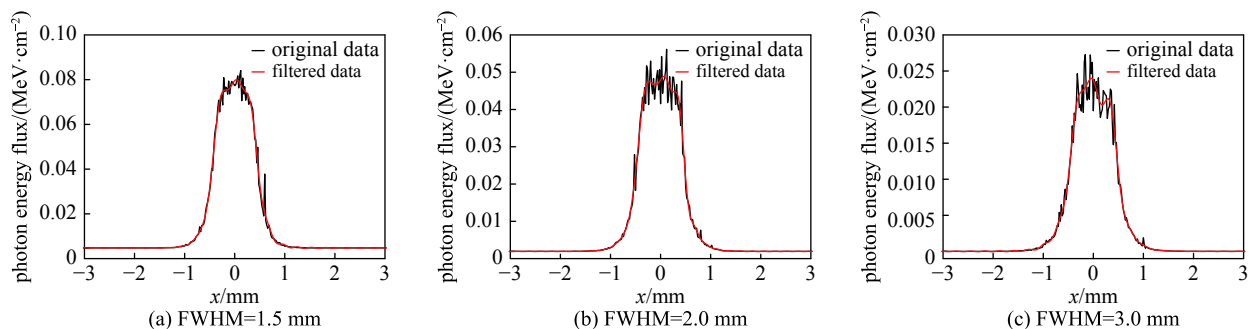


Fig. 4 Spatial distribution of source spot with the 2nd collimating structure

图4 准直结构2条件下的光源焦斑分布

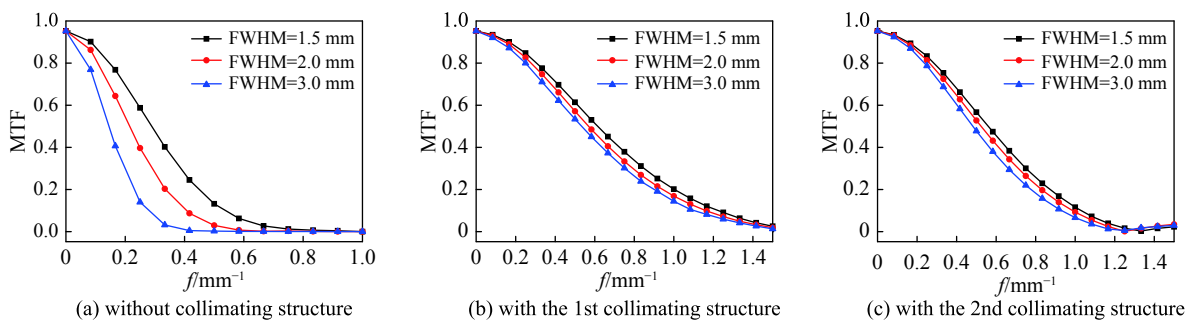


Fig. 5 MTF curves of the source spot

图5 光源焦斑分布MTF曲线

的直径来表示,即

$$D_{50\%MTF} = \frac{0.705}{f_{50\%MTF} M} \quad (4)$$

式中: M 表示成像的几何放大比。LANL 定义下的焦斑尺寸 $D_{50\%MTF}$ 与 FWHM 存在一定比例关系,其比例值与分布相关,在 KV、Gauss、Bennett 和 Quasi-Bennett 分布下分别为 1, 1.6, 2.7 和 4.1^[10]。

表 1 对比了有无空间限束结构条件下的焦斑有效尺寸。在不经空间限束时,光源焦斑的 FWHM 与入射电子束基本一致。在受到空间限束后,光源有效焦斑的 FWHM 和分布与打靶电子束相比均存在明显差异。可以看到,有效焦斑的主要决定因素是空间限束结构的参数,打靶电子束尺寸变化的影响非常小。在两种限束结构参数条件下,有效焦斑 FWHM 均小于 1 mm。同时可以看到,限束结构对焦斑两侧边沿存在一定“切削”作用,实际呈现的有效焦斑分布介于 KV 分布和 Gauss 分布之间。采用限束结构 1 时, $D_{50\%MTF}$ 与 FWHM 的平均比值为 1.59。采用限束结构 2 时, $D_{50\%MTF}$ 与 FWHM 的平均比值为 1.39。

表 1 有无限束结构条件下的光源焦斑尺寸

Table 1 Comparison of light source spot size between imaging processes with and without collimating structures

collimating structure	FWHM of electron beam /mm	FWHM of light source/mm	$f_{50\%MTF}/mm^{-1}$	$D_{50\%MTF}/mm$	$D_{50\%MTF}/FWHM$
without collimating structure	1.50	1.52	0.30	2.39	1.56
	2.00	1.98	0.22	3.18	1.61
	3.00	3.05	0.16	4.45	1.45
the 1st collimating structure	1.50	0.66	0.64	1.10	1.50
	2.00	0.68	0.59	1.19	1.60
	3.00	0.71	0.56	1.27	1.66
the 2nd collimating structure	1.50	0.85	0.58	1.21	1.34
	2.00	0.89	0.54	1.30	1.35
	3.00	0.92	0.50	1.41	1.47

4 空间限束对光子空间角度和能谱分布的影响

当不经过空间限束时,靶前 1 m 处照射量的空间角度分布如图 6 所示。随着打靶电子束横向 FWHM 的增大,正前方光轴上的照射量在逐渐增大而空间角度分布宽度在减小。这是由于当电子束发射度一定时,电子束的发散角将随着电子束半径增大而减小,此时产生的光子的前冲性增强,出射方向更多地趋向于正前方主光轴方向。

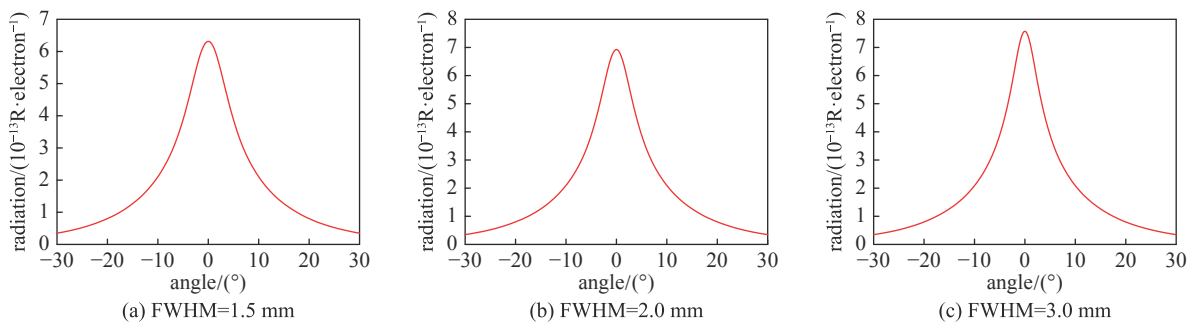


Fig. 6 Angular distribution of the light source radiation without collimating structure

图 6 无准直体时光源照射量角度分布

经过空间限束后,光源照射量的空间角度分布如图 7 和 8 所示。可以看到,正前方光轴上的照射量与无空间限束时相比均明显降低。照射量空间角度分布宽度基本决定于空间限束结构的参数,受打靶电子束的状态影响很

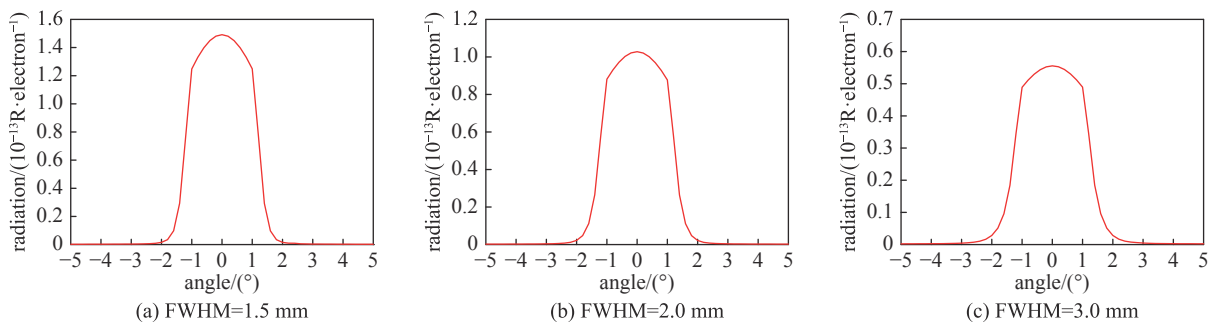


Fig. 7 Angular distribution of the light source radiation with the 1st collimating structure

图 7 限束结构 1 条件下的光源照射量角度分布

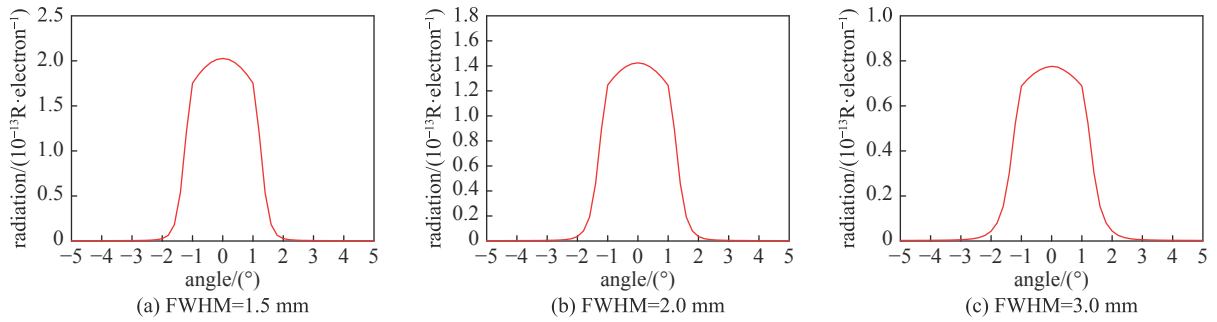


Fig. 8 Angular distribution of the light source radiation with the 2nd collimating structure

图 8 限束结构 2 条件下的光源照射量角度分布

小。当准直孔径增大时,由于受到空间阻挡减小,正前方照射量将增大。对同一空间限束准直结构,正前方照射量峰值随着打靶电子束 FWHM 增大而减小,这是由于电子束 FWHM 增大时被限束结构阻挡的光子更多所致。

空间限束对正前方光子能谱分布的影响如图 9~11 所示。采用限束结构后,正前方光子数通量和能通量均会减小。相对而言,低能光子在限束结构内的衰减比高能光子更多,这将引起光子谱的硬化,使平均光子能量增大。

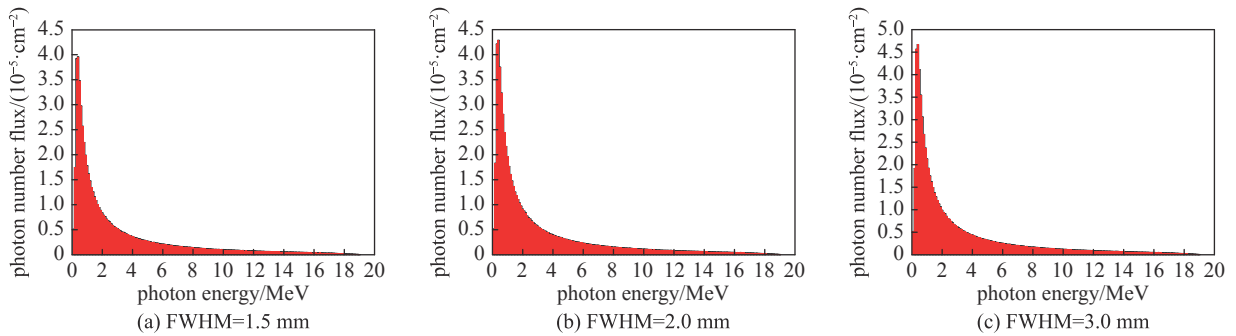


Fig. 9 Photon spectra at straight forward direction without collimating structure

图 9 无准直体时正前方光子数量谱分布

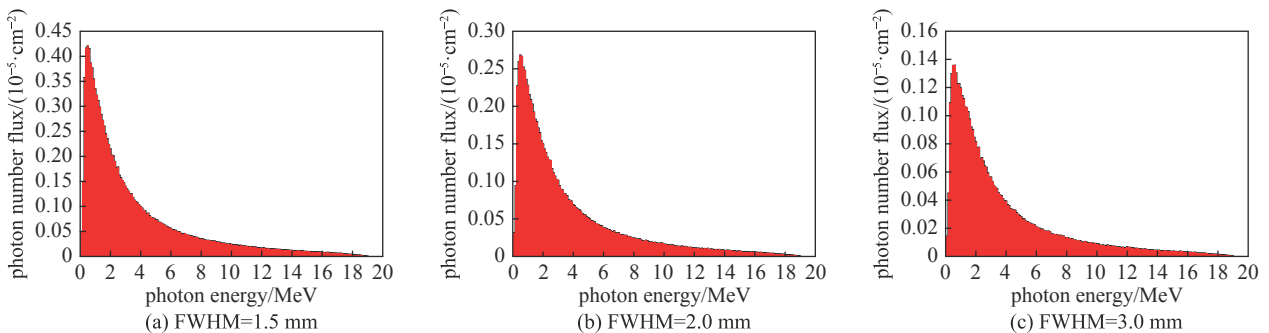


Fig. 10 Photon spectra at straight forward direction with the 1st collimating structure

图 10 准直结构 1 条件下正前方光子数量谱分布

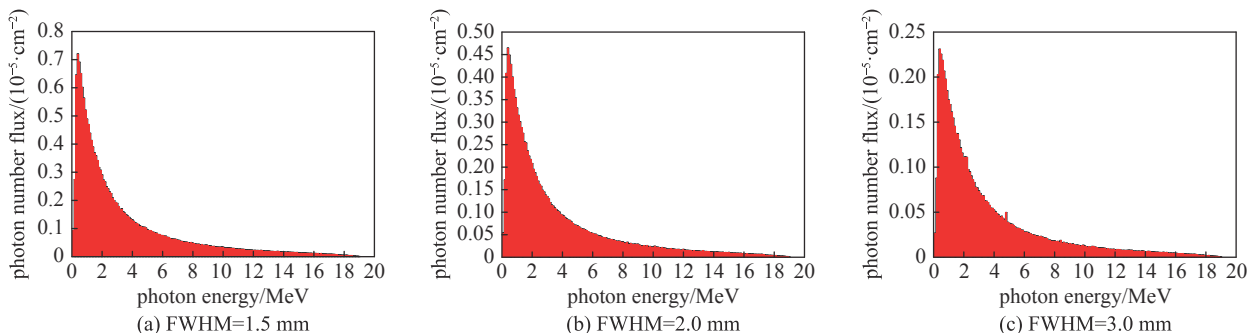


Fig. 11 Photon spectra at straight forward direction with the 2nd collimating structure

图 11 准直结构 2 条件下正前方光子数量谱分布

从表2可以看到,当限束准直孔越小时,光子谱的硬化程度越高,平均光子能量越大。但由于光子能量较高(特别是达到 MeV)时,光子在材料中的质量衰减系数随能量变化非常缓慢,平均光子能量的变化对闪光照相的实际影响非常小。

表 2 有无限束结构条件下的光源照射量分布

Table 2 Comparison of light source radiation between imaging processes with and without collimating structures

collimating structure	FWHM of electron beam /mm	maximum of exposure/ (10 ⁻¹³ R/electron)	emitting angle at half maximum of exposure / (°)	photon number flux / (10 ⁻⁴ cm ⁻² ·electron ⁻¹)	average photon energy /MeV
without collimating structure	1.50	6.31	6.55	6.33	3.06
	2.00	6.92	5.81	6.90	3.08
	3.00	7.56	5.17	7.52	3.09
the 1st collimating structure	1.50	1.48	1.21	1.28	3.61
	2.00	1.02	1.24	0.87	3.65
	3.00	0.55	1.28	0.46	3.69
the 2nd collimating structure	1.50	2.02	1.26	1.80	3.46
	2.00	1.42	1.29	1.25	3.52
	3.00	0.77	1.32	0.67	3.57

5 结 论

本文研究利用空间限束的方法,通过限制减小加速器轫致辐射源面上可以到达物点的出射光子位置范围,有效降低客体成像时的几何模糊,获得亚毫米 FWHM 的有效焦斑。对打靶电子束发射度条件进行建模,利用蒙特卡罗方法对光源产生和准直孔空间限束过程进行模拟,分别计算对比没有限束结构和不同限束结构参数下光源的有效焦斑、光子空间分布和能谱分布的影响。结果显示,设计的空间限束结构可以减小光源有效焦斑 FWHM 至亚毫米。与此同时,正前方照射量峰值和光子角度分布宽度出现一定程度减小,光子能谱会出现硬化平均光子能量增大。

参考文献:

- [1] Boyd T J, Rogers B T, Tesche R R, et al. PHERMEX—A high-current electron accelerator for use in dynamic radiography[J]. *Rev Sci Instrum*, 1965, 36: 1401-1408.
- [2] Scarpetti R D, Boyd J K, Earley G G, et al. Upgrades to the LLNL flash X-ray induction linear accelerator (FXR)[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conference — Digest of Technical Papers. 1997, 1/2: 597-602.
- [3] 邓建军, 丁伯南, 王华岑, 等. “神龙一号”直线感应加速器物理设计[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(5): 502-504. (Deng Jianjun, Ding Bonan, Wang Huacen, et al., Physical design of the Dragon-I linear induction accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5): 502-504)
- [4] 施将君. 高能闪光照相引论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. (Shi Jiangjun. Introduction of high-energy flash radiography[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997)
- [5] Briesmeister J F. MCNP – A general Monte Carlo N-particle transport code – Version 4C[R]. LA-13709-M, 2000.
- [6] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4 – a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A – Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2003, 506(3): 250-303.
- [7] Kawrakow I, Rogers D W O. The EGSncr code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport[R]. Ottawa: National Research Council of Canada, 2002.
- [8] 王毅, 李勤, 代志勇. 蒙特卡罗模拟分析电子束发射度对照射量空间分布影响[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 065006. (Wang Yi, Li Qin, Dai Zhiyong. Analysis on influence of beam emittance on spatial distribution of exposure using Monte Carlo simulation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 065006)
- [9] Muller K H. Measurement and characterization of X-ray spot size[R]. LA-UR-89-1886, 1989.
- [10] Ekdahl C. Characterizing flash-radiography source spots[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(12): 2501-2509.