

韧致辐射靶的发射率及角分布分析*

郭冰琪¹⁾ 李泉凤 杜泰斌 程诚

(清华大学工程物理系加速器研究室 北京 100084)

摘要 计算了不同能量下, 几种常用单靶(W, Cu, Ta, Au)的 X 射线前向发射率和角分布, 从理论分析和蒙特卡罗方法模拟计算两方面分析了产生的 X 射线发射率及其角分布与靶参数和束流参数的关系, 并与已发表的数据及实验结果比较, 结果一致, 可为设计产生 X 射线的电子加速器及靶提供参数依据.

关键词 蒙特卡罗方法 韧致辐射 发射率 束流参数

1 引言

高能电子束打靶产生的 X 射线具有很强的穿透能力, 可以用来检测物体内部的构造, 在工业探伤, 海关检查和医疗仪器等方面具有广泛的作用. 这种 X 射线的前向发射率及发射率角分布与加速器束流能量, 发射度及靶的材料, 厚度等参数都有关系. 因此, 研究电子加速器束流打靶发射率, 对于设计电子加速器和靶的参数, 有很大的意义. 本文利用蒙特卡罗程序 MCNP4²⁾ 计算了不同能量下几种常用单靶的前向发射率, 并从理论分析和蒙特卡罗方法模拟两方面分析了韧致辐射靶的发射率及其角分布与束流参数及靶参数的关系.

2 韧致辐射的物理分析

高能电子经过靶时, 与靶中核子发生辐射碰撞, 损失能量, 产生光子. 这就是韧致辐射过程. 韧致辐射过程产生的光子一部分与靶中核子发生光电效应, 康普顿散射和电子对效应, 能量在靶中消耗尽而沉积在靶中, 一部分射出靶, 分布在空间各方向. 本文要研究的就是出射光子的剂量率及空间分布.

对于单靶, 按材料原子系数把靶分成高 Z 靶和低 Z 靶, 本文研究中定性比较了高 Z 靶和低 Z 靶在韧致辐射剂量率及剂量率角分布中的异同.

前向剂量率是指靶前 1m 处的剂量率. 由韧致辐射产生的机理可知, 剂量率值与电子能量, 靶材料, 厚度有关. 对于同一种材料的靶, 厚度不变时, 入射电子能量越大, 前向剂量率越大. 靶厚对前向发射率的影响包括考虑光子的产生和消耗两方面, 靶厚越大, 韧致辐射产生的光子数越多, 但由于光电效应, 康普顿散射和电子对效应等过程消耗的光子数也越多. 所以, 前向剂量率与靶厚度的关系不是简单的单调增加或者减少^[1], 他们的关系将在后面研究.

剂量率在空间的分布可以近似为高斯分布, 为了表征剂量率沿空间角度变化状况, 引入角度的均方根期望 $(\overline{\theta^2})^{1/2}$, $(\overline{\theta^2})^{1/2}$ 等于剂量率下降到前向剂量率的 $1/e$ 时的角度.

总角分布 $(\overline{\theta_c^2})$ 由 3 个方面组成^[2]: 韧致辐射过程本身产生的角分布 $(\overline{\theta_p^2})$, 电子在靶中的散射产生的角分布 $(\overline{\theta_m^2})$, 以及入射电子散角引起的角分布 $(\overline{\theta_b^2})$,

$$(\overline{\theta_c^2}) = (\overline{\theta_p^2}) + (\overline{\theta_m^2}) + (\overline{\theta_b^2}). \quad (1)$$

韧致辐射过程本身的角分布 $(\overline{\theta_p^2})^{1/2}$ 由入射电子能量决定, 能量越大, 则角分布前向性越好; 电子与靶中电子散射产生的角分布 $(\overline{\theta_m^2})^{1/2}$ 角分布主要由靶厚决定, 靶厚越小, 则角分布前向性越好. 电子自身的散角对剂量率角分布的影响 $(\overline{\theta_b^2})$ 主要取决于散角的大小, 电子束的散角越大, $(\overline{\theta_b^2})$ 越大, 此外, $(\overline{\theta_b^2})$ 与靶参数的关系在后面的模拟计算中研究.

2005 - 03 - 09 收稿, 2005 - 06 - 17 收修改稿

* 国家自然科学基金(10135040)资助

1) E-mail: gbq00@mails.tsinghua.edu.cn

2) Judith F. Briesmeister, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code LA-12625-M, Version 4B Manual

3 单靶的前向发射率

3.1 $t=r$ 时的前向发射率

取靶的厚度 t 等于入射电子在靶中的平均射程 r , 用 MCNP4 程序计算了入射电子能量为 2—50 MeV 时, 靶材料为 W, Cu, Au, Ta 的发射率数据如图 1 所示.

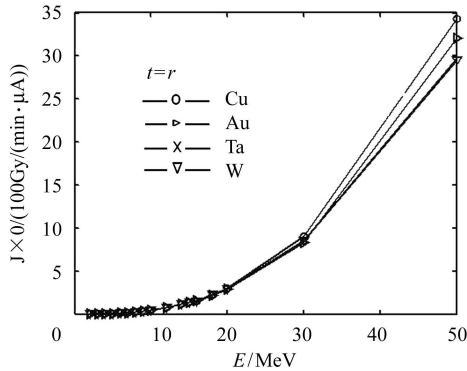


图 1 $t=r$ 时, Cu, Au, Ta, W 四种靶的前向发射率随入射电子能量变化关系曲线

由图 1, $t=r$ 时, 前向发射率随电子能量 E 增加而增加. 若 $E < 20$ MeV, 对于不同材料的靶, 前向发射率相差不大. 但对于能量较大的电子, 低 Z 靶 (Cu 靶) 的前向发射率值要略大于高 Z 靶.

3.2 前向发射率与靶厚关系

图 2 是电子能量分别取 2, 6, 9 MeV, 靶材料分别为 Cu, W 时, 模拟计算得到的前向发射率 (用各自的最高前向发射率归一化) 与靶厚关系曲线. 由图 2, 前向发射率随靶厚先增大后减小, 存在一个“最佳厚度” z_0 使得靶厚 $t = z_0$ 时, 前向发射率最大.

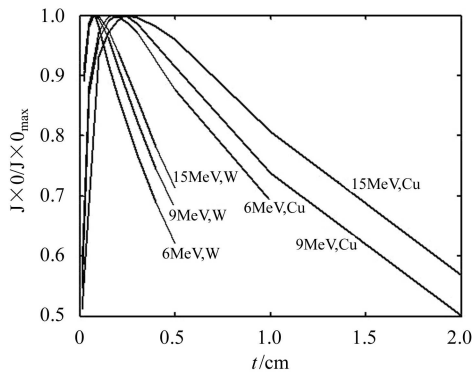


图 2 $E = 2, 6, 9$ MeV 时, Cu, W 两种靶的前向发射率与靶厚关系归一化曲线

对 Cu, W 两种材料的靶分别计算不同能量 E 时的 z_0 及 $t = z_0$ 时的最大剂量率 D_{\max} , 并计算 z_0 与同样

条件下的辐射长度 X_0 , 电子平均射程 r 的关系, 如表 1 所示.

表 1 不同入射电子能量下, Cu, W 两种靶的 z_0 及 D_{\max} 值

		W 靶						
E/MeV		2	3	6	9	15	30	50
z_0/mm		0.215	0.35	0.800	0.874	0.887	0.92	0.93
z_0/r		0.26	0.29	0.37	0.30	0.21	0.15	0.12
z_0/X_0				0.23	0.25	0.25	0.26	0.27
	($X_0 = 3.5\text{mm}$)							
$D_{\max}/D_{t=r}$		1.33	1.22	1.18	1.20	1.30	1.57	1.94
		Cu 靶						
E/MeV		2	3	6	9	15	30	50
z_0/mm		0.5	1	1.6	2.1	2.5	2.9	3.0
z_0/r		0.33	0.43	0.36	0.33	0.24	0.19	0.14
z_0/X_0				0.11	0.14	0.17	0.20	0.21
	($X_0 = 14.5\text{mm}$)							
$D_{\max}/D_{t=r}$		1.20	1.12	1.11	1.10	1.27	1.41	1.67

由表 1 可看出, z_0 随能量的增加而增加, 与平均射程 r 的比值随能量增加先增大后减小, 低能部分 (小于 15 MeV) 时, 可以近似的认为平均射程厚度 1/3 处是最佳厚度; 高能部分, z_0 变化不大, 对于高 Z 靶, z_0 值还可以用辐射长度来表示. 电子能量大于 5 MeV 时, z 接近 0.3 个 X_0 .

不同材料的靶, z_0 与 r 的比值在同一能量时相差不大, 但由图 2, 取同样的能量, $t > z$ 时, 低 Z 靶的发射率下降速度比高 Z 靶小. 如果取铜靶靶厚略大于平均射程, 前向发射率数据与取射程时的相差不大.

对 Cu 靶与 W 靶的 D_{\max} 比较, 高 Z 靶的 D_{\max} 比低 Z 靶大. 因此, 在选择靶时, 如果要得到最大的前向发射率, 应该选择靶厚为最佳厚度的高 Z 靶.

4 发射率角分布

由前面的理论分析可知, 发射率角分布也与电子能量, 靶材料厚度有关系. 能量越大, 角分布前向性越好. 这个结果得到模拟计算的验证.

4.1 发射率角分布与电子能量关系

对 Cu 靶, $E = 2, 6, 9, 15, 30$ MeV 的情况, 分别计算角分布. 模拟计算结果表明, 角分布前向性随入射电子能量增加而变好. 在能量较低时 (如 2 MeV), 反散射现象很明显, 而随着能量的增大, 反散射现象影响逐渐变小, X 射线前向性逐渐明显. 对于 9 MeV 电子, 基本上看不出反散射, 对于 30 MeV 的电子, 角度大于 90° 时计算得到的发射率已接近于零, 与理论分析的结果类似.

实际的电子束往往不是单能的,而是存在能谱分布.若假设能量分布接近以平均能量为中心的高斯分布,则用能谱模型代替单能模型进行模拟的结果表明能量分布带来了额外的 $(\overline{\theta_p^2})^{1/2}$,使角分布前向性变差.

4.2 发射率角分布与靶材料、厚度的关系

同样以Cu靶和W靶为例,模拟计算得到的结果表明在同样能量的电子入射,靶厚都取平均射程厚度的时候,Cu靶的角分布前向性明显优于W靶.其主要原因是铜靶时多次散射对发射率的影响比W靶要小,如图3(a)所示.

因此,设计靶时,从获得较好的发射率角分布角度考虑,应该选择低Z材料.

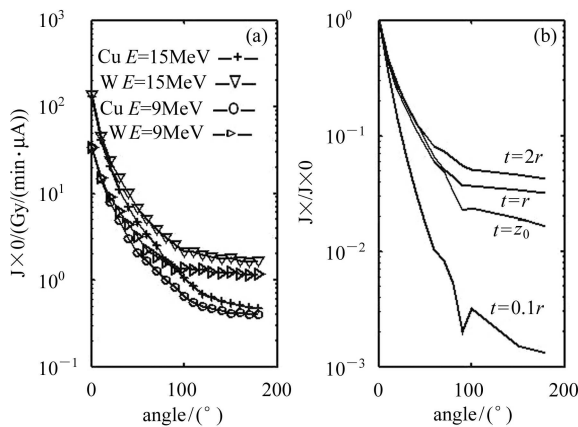


图 3 角分布与电子能量和靶厚的关系

(a) $t=r$, $E=6, 9\text{MeV}$ 时Cu靶与W靶的发射率归一化角分布比较; (b) 9MeV , W靶,不同靶厚时发射率归一化角分布曲线.

靶厚的变化对发射率角分布的影响与(4)式理论分析相同.图3(b)是W靶,入射电子能量为 9MeV 时,取不同靶厚时发射率归一化¹⁾角分布曲线.由图中看出,靶厚越小,发射率角分布前向性越好.对于厚靶($t>r$),靶厚变化对角分布的影响比薄靶小.

4.3 实验测量结果

清华大学工程物理系加速器实验室测量了不同能量电子入射到Cu靶和W&Au复合靶,产生的发射率角分布情况,实验测量的结果如图4所示, $t=r$ 时,同一种靶材料,电子能量越高,角分布前向性越好.同能量的电子入射,Cu靶的角分布状况比W靶的好,这个结论与理论分析及模拟计算结果相吻合.

但是在实际测量中,由于未能有效屏蔽室内设施和空气对于X射线的散射,因此实验的精度比较低,且误差难以定量估计.实际测得的角分布比模拟计算

得到的前向性差.

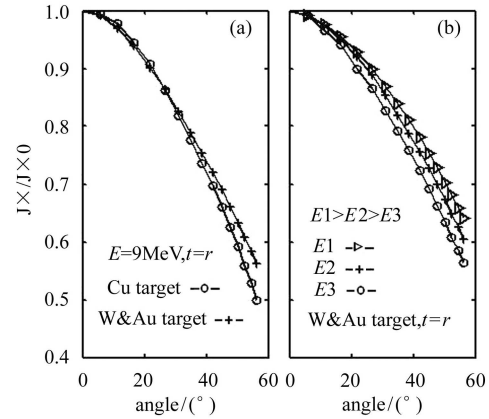


图 4 实验测得的Cu靶, W & Au靶归一化角分布曲线

(a) $E=9\text{MeV}$, $t=r$,对于Cu靶和W & Au复合靶测量的归一化角分布对比; (b) W & Au靶, $t=r$,不同E的归一化角分布对比.

5 束流参数对前向发射率及角分布的影响

束流参数包括电子能量分布,空间分布,束半径,发射度等,能量对发射率的影响最大,在前面4.1节中已讨论,本节主要讨论束半径,发射度等对发射率的影响.

5.1 非均匀模型下的前向剂量率和剂量率角分布

前面的模拟计算中,采用的电子束模型为束径 1.5mm ,电子均匀分布,散角为零的均匀模型,但实际的电子束往往有一定空间和散角分布,常用发射相图来表示.实际研究非均匀性对前向发射率和发射率角分布的影响时,可以将发射相图简化为正椭圆,发射度与束半径散角之间关系近似为:发射度=束半径·最大散角.电子距离束斑中心半径 r 的分布可以看成0到束半径之间的高斯分布.散角也可以简化为 $0\sim$ 最大散角之间的高斯分布.研究表明,非均匀性前向发射率及发射率的角分布会造成一定影响.对角分布宽度的影响用均方根值 $(\overline{\theta_p^2})^{1/2}$ 来衡量.

取 $E=15\text{MeV}$, $t=r$ 的Cu靶,设入射电子束发射度 $\varepsilon_r=50\text{mm}\cdot\text{mrad}$,束半径 1mm ,散角 50mrad .采用非均匀模型B时的角分布曲线与采用均匀分布模型A时的剂量率角分布用前向剂量率归一化曲线如图5所示.

1)本文中发射率角分布的归一化,均指相对于前向发射率的归一化

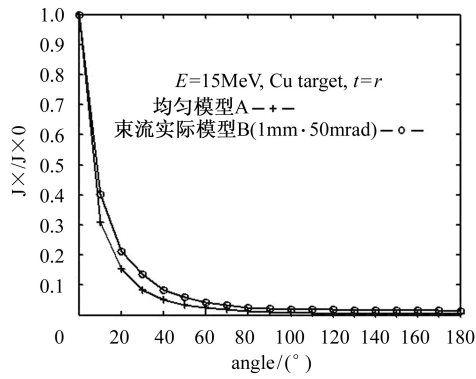


图 5 采用束流实际模型时的角分布曲线与采用均匀分布模型时的归一化角分布曲线对比

模拟计算结果表明, 采用束流实际模型 B 的结果前向发射率比采用均匀模型 A 小约 14%, 角分布前向性也较采用均匀模型时差. 分别求发射率下降到前向发射率的 $1/e$ 时的角度 θ^2 :

$$\theta_A^2 \approx 0.0252\text{rad}^2, \quad \theta_B^2 = 0.0300\text{rad}^2.$$

对于模型 B, 电子束散角引起的角分布 $\theta_b^2 = \theta_B^2 - \theta_A^2 = 0.0047\text{rad}^2$.

θ_b^2 随靶厚的变化而变化. 取 $E = 15\text{MeV}$, Cu 靶, 对于 $t = 0.1r, z, r, 2r$, 分别用上面的方法求得 θ_b^2 分别为: $0.0026, 0.0017, 0.0047, 0.0049\text{rad}^2$, 由结果, $t = z_0$ 时, 电子本身的散角对于剂量率角分布的影响最小.

5.2 束流参量对发射率的影响

不同束流模型的 θ^2 不同. 以下从固定束径, 固定散角, 固定发射度 3 个方面讨论束流参量对发射率的影响.

5.2.1 固定散角, 束径变化

取 $E = 15\text{MeV}$, $t = r$ 的 Cu 靶, 固定散角 $= 50\text{mrad}$, 束半径由 $0.5\text{--}10\text{mm}$ 之间变化时, 若保持靶的半径大于 5 倍的束半径, 求得的前向发射率 $< 2\%$. 因此, 对于束半径在 mm 量级的情况而言, 如果电子束散角不变, 束半径的变化对前向发射率的影响是比较小的. 对发射率角分布的计算也得到同样的结果. 不同束半径之间的角分布基本相同.

5.2.2 固定束径, 散角变化

取 $E = 15\text{MeV}$, $t = r$ 的 W 靶. 固定束径为 1.5mm , 前向发射率和发射率角分布随散角变化如表 2 所示.

随着散角增大, 前向发射率下降, 发射率角分布前向性也逐渐变差.

表 2 $E = 15\text{MeV}$, $t = r$ 的 W 靶前向发射率及角分布随角分布变化

散角/mrad	前向发射率/[mSv/(min·μA)]	θ^2/rad^2
0	139.06	0.0247
20	130.00	0.0314
50	113.48	0.0337
100	86.78	0.0746
200	62.01	0.1412

5.2.3 固定发射度, 束径与散角变化

理论分析表明: 固定发射度 ε 时, 前向发射率随半径的增加先增大后减小, 最大的前向发射率对应一个匹配半径 R_{bm} , R_{bm} 随发射率增加而增加, 与 ε 近似满足关系

$$\left(\frac{\varepsilon}{\text{m}\cdot\text{rad}}\right) = 1.4 \left(\frac{R_{bm}}{\text{m}}\right)^{[3]}. \quad (2)$$

选择电子能量 $E = 20\text{MeV}$, 靶厚 $t = r$, W 靶, 对发射度 $\varepsilon_0 = 0.005\text{cm}\cdot\text{rad}$ 和 $\varepsilon_0 = 0.01\text{cm}\cdot\text{rad}$ 两种情况计算发射率与束半径的关系. 得到结果如图 6 所示.

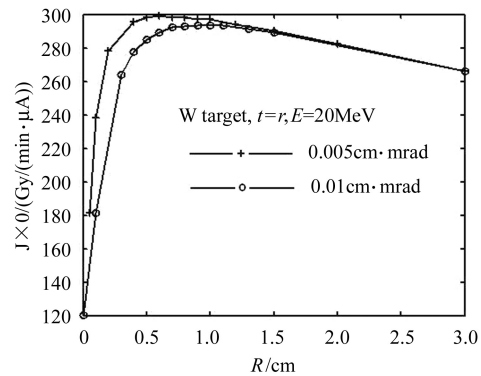


图 6 $E = 20\text{MeV}$, 靶厚 $t = r$, W 靶, 固定发射度时前向发射率随束径变化曲线

由图中可看出, 与理论分析相符, 并非束流半径越小, 束流的发射率越大, 而是存在一个匹配半径 R_{bm} , 在此半径处发射率达到最大值.

对 $\varepsilon_0 = 0.005\text{cm}\cdot\text{rad}$, $\varepsilon_0 = 0.01\text{cm}\cdot\text{rad}$, 求得:

$$R_{bm, \varepsilon_0=0.005\text{cm}\cdot\text{rad}} = 0.6\text{cm} = \text{理论值}$$

$$R_{bm, \varepsilon_0=0.01\text{cm}\cdot\text{rad}} = 0.9\text{cm} = \text{理论值}$$

对于发射度 $\varepsilon = 0.02, 0.04, 0.08, 0.1\text{cm}\cdot\text{rad}$, 上面的结论仍然成立. R_{bm} 值与电子能量的关系: $\varepsilon = 0.005\text{cm}\cdot\text{rad}$ 时, 对 $E = 20\text{MeV}$ 和 $E = 15\text{MeV}$ 两种情况分别计算匹配半径得

$$R_{bm, 20\text{MeV}} = R_{bm, 15\text{MeV}} = 0.6\text{cm}.$$

能量较高时, 匹配半径值与能量无关. 但是能量越大, 束半径大于匹配半径时, 发射率下降得越快.

固定发射度, 发射率角分布与束半径的关系: 同一发射度下, 发射率角分布与束半径的关系. 以 $E = 20\text{MeV}$, $\varepsilon = 0.005\text{cm}\cdot\text{rad}$ 为例. 束半径取不同值时, 发射率角分布变化如表 3.

表 3 $E = 20\text{MeV}$, $t = r$, W 靶, $\varepsilon = 0.005\text{cm}\cdot\text{rad}$, 发射率角分布随束半径变化

束半径/mm	θ^2/rad^2
0.05	0.0620
0.2	0.0247
$0.6=R_{\text{bm}}, \varepsilon_0=0.005\text{cm}\cdot\text{rad}$	0.0236
1	0.0237
2	0.0242

束半径小于匹配半径时, 束半径越大, 角分布前向性越好; 而当束半径大于匹配半径时, 半径增大, 角分布前向性逐渐变差.

束半径等于匹配半径时, 是前向发射率数值最大, 也是角分布前向性最好的时候, 所以为了获得最好的照射效率, 应该取束半径等于匹配半径.

取匹配半径时, 发射率与发射度的关系:

若取束半径等于匹配半径, 角分布与发射率数值有关, 发射度越小, 角分布的前向性越好. 如表 4 所示.

表 4 $E = 20\text{MeV}$, 靶厚 $t = r$, W 靶, $R = R_{\text{bm}}$ 时, 发射率角分布随发射度变化

发射度/($\text{cm}\cdot\text{rad}$)	$R = R_{\text{bm}}/\text{mm}$	θ^2/rad^2
0.005	0.6	
0.01	0.9	0.0235
0.02	1.2	0.0242
0.04	1.7	
0.05	2.4	0.0252
0.1	2.6	

在实际应用如工业 CT 中, 为了保证图像分辨率,

束半径的取值要比匹配半径小得多. 在这种情况下, 发射度不变, 束半径越大, 前向发射率数值越大, 角分布前向性越好. 所以在图像分辨率允许的情况下, 束半径取值宜略大一些.

本文主要计算了 2—50MeV 电子束打靶产生的 X 射线在前向 1m 处的发射率及发射率角分布, 并研究了靶参数及束流参数对发射率的影响.

6 结论与讨论

靶材料分高 Z 靶和低 Z 靶, 研究表明, 低 Z 靶的角分布前向性比高 Z 靶好, 且在高能部分 ($E > 20\text{MeV}$), $t = r$ 时, 低 Z 靶的前向发射率略高于高 Z 靶. 靶厚变化对前向发射率和发射率角分布都有影响, 存在一个最佳厚度 z_0 , 使得 $t = z_0$ 时, 前向发射率最大 (约为 $t = r$ 时的 1.2—1.8 倍), 且发射率角分布前向性最好. z 值与入射电子能量和靶材料相关 (见表 1).

束流参数主要包括电子能量, 电子束半径和散角. 电子能量越大, 散角越小, 则前向发射率越大, 角分布前向性也越好 (表 2), 相比而言束径对发射率的影响较小, 本文的研究中, 束半径取 mm 量级, 计算结果表明前向发射率和发射率的角分布可以近似认为与束半径无关.

束流参数对发射率角分布的影响还与靶厚有关, 靶厚取 z_0 时, 电子散角造成的角分布宽度最小.

若保持电子束发射度不变, 则束半径取匹配半径 R_{bm} 时, 前向发射率值最大且发射率角分布的前向性最好. R_{bm} 值由发射度决定 (式 2), 与能量无关. 但是, 能量越大, 束半径大于 R_{bm} 时, 发射率值随半径增加而下降的越快.

参考文献 (References)

- 1 LI Quan-Feng, WU Ying-Ying, HUANG Wei-Ling. J. Tsinghua Univ(Sci&Tech), 2004, **44**(3): 304—306(in Chinese) (李泉凤, 吴莹英, 黄蔚玲. 清华大学学报, 2004, **44**(3): 304—306)
- 2 Nordell B, Brahme A. Phys. Med. Biol., 1984, **29**(7): 797—810
- 3 SHI Jiang-Jun, QIAN Min-Quan. High Power Laser and Particle Beams, 1992, **4**(1): 119—126(in Chinese) (施将君, 钱民权. 强激光与粒子束, 1992, **4**(1): 119—126)

Analysis of Angular Distribution and Photon Yield from Bremsstrahlung Targets^{*}

GUO Bing-Qi¹⁾ LI Quan-Feng DU Tai-Bin CHENG Cheng

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Effects of electron beam parameters, including energy, radius and emittance, as well as target parameters, on bremsstrahlung exposure are discussed in this paper. With the energy of incident electrons varying from 2MeV to 50MeV, the forward yields at a distance of one meter from different targets, such as tungsten, copper, tantalum and aurum, are calculated by both analytical formula and MCNP4 Monte Carlo code. In addition, the relationship of X-ray dose to target and electron parameters is analyzed. The results agree well with published experimental and theoretical data, and may be a good reference for the design of this kind of X-ray source.

Key words Monte Carlo, bremsstrahlung, emittance, beam parameters

Received 9 March 2005, Revised 17 June 2005

^{*}Supported by NSFC (10135040)

1) E-mail: gbq00@mails.tsinghua.edu.cn