

郑莉君, 刘义保, 王爱星. 基于 GEM 的高能 X-CT 探测的 MCNP 模拟[J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(3): 435-442.
Zheng LJ, Liu YB, Wang AX. Simulation of high energy X-CT detector based on gas electron multiplier by MCNP program[J].
CT Theory and Applications, 2014, 23(3): 435-442.

基于 GEM 的高能 X-CT 探测的 MCNP 模拟

郑莉君^{1, 2b}, 刘义保^{1, 2a}✉, 王爱星^{1, 2a}

1. 核技术应用教育部工程研究中心 (东华理工大学), 南昌 330013
2. 东华理工大学 a. 理学院; b. 核工程技术学院, 南昌 330013

摘要: 使用蒙特卡罗方法中的 MCNP 程序, 对不同能量不同材料的探测器的光电转换效率进行模拟研究。研究表明选用不同密度的薄金属片作为光电转换体, X 光子的转换效率有明显变化, 具有可观的应用开发前景。

关键词: 气体电子倍增器; 高能 X 射线; 工业 CT; MCNP

文章编号: 1004-4140 (2014) 03-0435-08 **中图分类号:** TP 391.41 **文献标志码:** A

气体电子倍增器 (Gas Electron Multiplier, GEM) 探测器是 20 世纪 90 年代后期欧洲核子中心 (Conseil European Pour Recherches Nucleaires, CERN) 开发的一种新型气体探测器, 主要是通过特殊的多孔导电膜来改变工作气体中的电场分布, 使得原初电子在 GEM 膜孔内的强电场作用下产生雪崩现象, 从而有效提高电子的放大倍数, 得到较大的电子信号^[1]。基本部件是两面敷铜并在其上面蚀刻出大量微孔的聚酰亚胺 (kapton) 膜, 工作时在两侧铜面上加高电压, 电子在孔内雪崩, 对初电离进行放大。

该探测器具有高计数率、良好的位置及时间分辨、抗辐射、读出方便及质量轻等一系列优点^[2], 与不同转换材料共用时可探测中子、光子以及 X 射线等, 选用高密度的薄金属片作为光电转换体, 可有效地提高 X 光子的转换效率, 但同时也要考虑光子与材料相互作用产生的电子从薄金属片中逃逸出来。GEM 探测器具有优异的位置分辨 ($< 100 \mu\text{m}$)、很好的耐辐照性能、读出方便、可以在很高的计数率 (10^6 Hz/mm^2) 条件下工作等特点^[4]。因此, 与不同转换体连接使用可以探测不同能量的射线。

1 工业 X-CT 的探测器的原理与性能

工业 X 射线 CT (Industrial X-ray Computed Tomography, IX-CT) 是工业 X 射线计算机层析成像或工业用 X 计算机断层扫描成像的简称^[5]。系统通常由射线源系统、探测器系统、数据采集系统、机械扫描运动系统、控制系统、计算机系统及图形输出设备等部分组成^[6], 如图 1 所示。高能 X 射线穿过工件与被检物体相互作用后, 辐射探测器接收穿透工件后的射线信号, 检测器信号经放大、A/D 转换处理后送入计算机成像。其中, X 射线探测器是

收稿日期: 2013-11-22。

基金项目: 核技术应用教育部工程研究中心基金项目 (HJSJYB2011-05); 江西省高等学校科技落地计划项目 (KJLD12076)。

X-CT 系统获取信号的关键部分，也是决定 CT 性能的关键部件^[7]。射线源不同，所产生的射线能量不同，其穿透被检测物体的能力也不同。

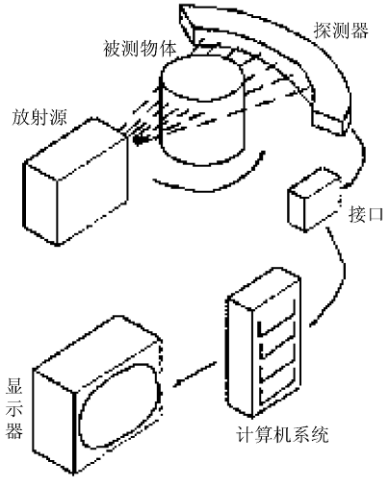


图 1 X 射线 CT 装置示意图
Fig.1 Schematic of X-CT system device

2 高能 X-CT 气体探测器结构模型

2.1 GEM 几何单元模型建立

GEM 探测器由阴极，GEM 复合膜，收集电极组成。GEM 探测器中最重要的部件是 GEM 膜，GEM 膜微孔形状决定了微孔中电场的分布，进而影响 GEM 气体增益双锥形微孔可实现更高的有效增益。一个标准的 GEM 膜材料的覆铜厚 $5\text{ }\mu\text{m}$ ，Kapton 膜厚 $50\text{ }\mu\text{m}$ ，孔间距 $140\text{ }\mu\text{m}$ ，孔径 $70\text{ }\mu\text{m}$ ，见图 2。

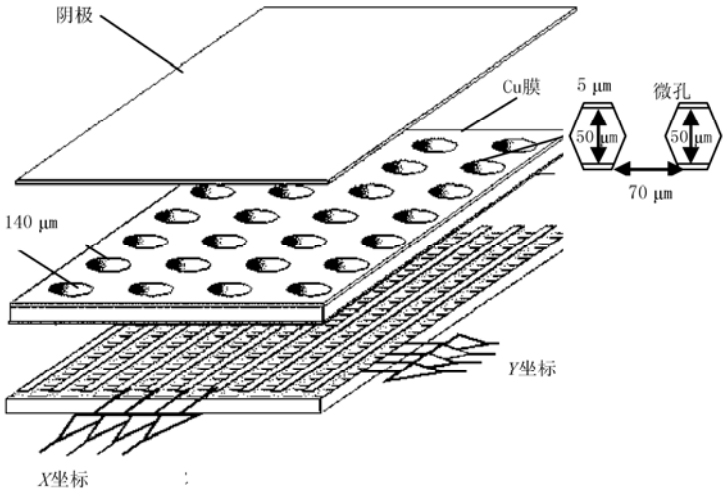


图 2 单级 GEM 探测器空间结构示意图
Fig.2 The spatial structure diagram of the single GEM detector

2.2 工业高能 X-CT 气体探测器

气体电离辐射探测器具有成本低廉、性能可靠、制备简单及暗电流小等优点^[5]。但由于气体探测器采用气体作为探测介质,其不足之处是探测效率低,体积较大,半导体 X 射线探测器需要在低温环境下使用,比如 HPGe 探测器和 Si (Li) 探测器要用液氮来维持低温,使用起来很不方便,探测器的成本很高,因而在工业 X-CT 中也比较少使用。

闪烁体探测器具有输出信号幅度大、探测器效率高、时间响应快等有优点。其不足之处:环境条件要求高、探测器间串扰大、抗辐射能力较差、电子学噪声大、制备复杂、价格昂贵等,对高能 X 射线探测不适合用。

高能 X 射线工业 CT 采用射线剂量大、能量高、焦点小的电子直线加速器为射线源,具有检测速度快、工件大、精度高等特点^[8-9]。我们介绍一种新型工业高能 X-CT 探测器的研究方案,可以把 GEM 探测器用于高能 X 射线 ICT 探测,见图 3。高能 X 射线以扇形束穿透被检物体,再通过准直器将离散的射线形成单一 X 射线束被探测器系统吸收,探测器系统是由漂移区, GEM 膜,传输区构成,气室中充有 1 个标准大气压的 Ar 和 CO₂ 的混合气体^[10-11]。

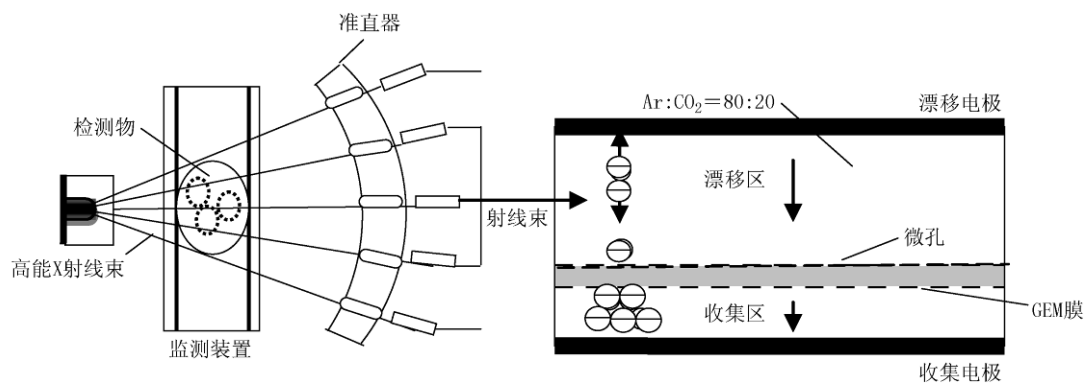


图 3 工业高能 X-CT 气体探测器结构模型

Fig.3 Structure model of high energy industrial X-CT detector

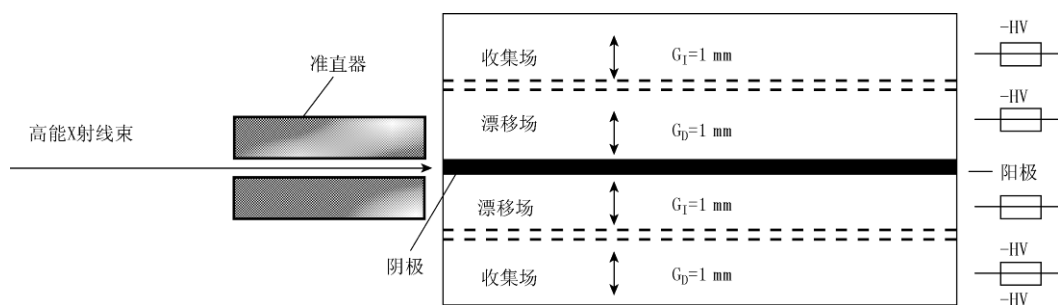


图 4 一种新型气体探测器结构模型

Fig.4 A new structure model of gas detector

由于气体探测器对高能 X 射线效率低,为提高探测效率在准直器的出口处插入一块薄金属片,将气室分为上下两部分,气室两边再各安放一层 GEM 膜。薄金属片与负高压相连

作为漂移场。采用 U 形良性导体收集电子，U 形收集极与信号处理电路连接，如图 4 所示。

3 高能 X-CT 探测器 Monte Carlo 方法研究

3.1 几何模型建立与程序实现

高能 X 射线穿过被检测物体后，经过后准直器，可以根据需要设置 X 射线束截面的面积。为了更好地得到被检测物体图像分辨率，X 射线束宽度很窄，我们假设 X 射线束截面 $x=0.01\text{ cm}$ ， $z=0.60\text{ cm}$ ，见图 5。

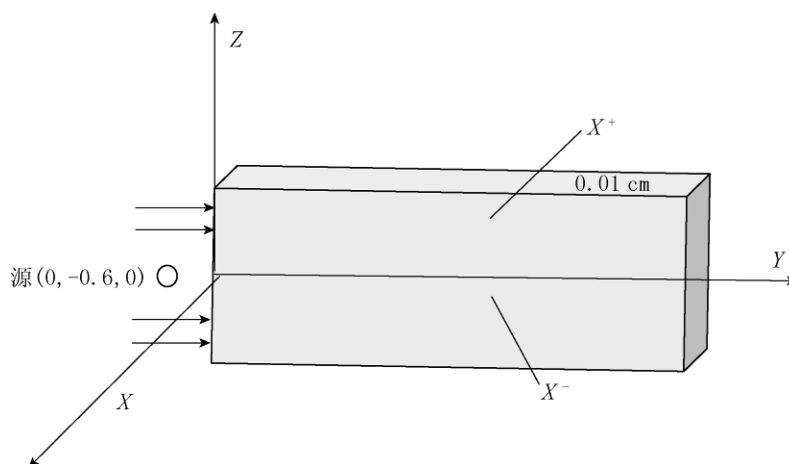


图 5 光电转换体

Fig.5 The photoelectric converter

用 MCNP 5.0 程序，采用长方体源分布（只考虑向坐标 Y 轴正方向发射），源位置为 $(0, -0.6, 0)$ ，设置 1 MeV 或 2 MeV 高能 X 射线。再建立一个球体模型，设球体空腔内半径 $R=20.00\text{ cm}$ ，介质为空气，坐标原点处放置一块很薄的平面光电转换材料，截面面积为 $0.01\text{ cm} \times 1.00\text{ cm}$ ，长度分别取 2.00 cm 、 4.00 cm 、 6.00 cm 、 8.00 cm 、 10.00 cm ，球外面为真空。分别在 X 轴方向的两个平面 (X^+ ， X^-) 用 F1 对出射光子和电子的计数，同时在 Y 轴正方向的平面 (Y^+) 用 F1 对直射光子与出射电子计数。为确保计算误差小于 1%，历史抽样数设为 1×10^7 。

3.2 模拟结果与分析

高能 X 射线穿过薄金属片材料后，与薄金属片发生相互作用，通过光电效应、康普顿效应和电子对效应产生大量的电子和散射光子。由于 X 射线能量很高，产生的电子能量也很高，多数电子会穿出金属表面。但是也有一部分电子由于被金属片自吸收而不能穿出物体表面，淹没在材料中不能参与倍增放大。出射的电子在强电场作用下加速穿过 GEM 微孔，发生雪崩放大，最后被收集电极接受而产生信号放大。通过 MCNP 程序模拟，我们得到 $E=1$ 或 2 MeV 窄 X 射线束穿过薄金属片的光子、电子分布情况，见表 1、表 2 和表 3。

表 1、表 2 和表 3 分别是 Al、Cu、W 三种材料制成的光电转换薄金属片，并且采用不同厚度不同能量得到的光子、电子的分布情况。高原子序数的金属光子易于散射，电子就更

易于从微孔中出射。

表 1 $E=1$ 或 2 MeV 窄 X 射线束穿过薄金属片 Al 材料的光子和电子分布

Table 1 $E=1$ or 2 MeV photon and electron distribution of narrow X-ray beamthrough the thin metal film Al materials

X 射线束 能/MeV	薄金属片 长度/cm	X 面光子 散射率/%	Y'面光子 直射率/%	X 面电子 出射率/%	Y'面电子 出射率/%
$E=1$	2.00	14.90	85.10	12.90	0.18
	4.00	27.90	72.10	24.10	0.15
	6.00	38.90	61.10	33.50	0.12
	8.00	48.20	51.80	41.50	0.11
	10.00	56.10	43.90	48.30	0.09
$E=2$	2.00	10.60	89.30	10.80	0.23
	4.00	20.40	79.50	20.70	0.21
	6.00	29.10	70.80	29.60	0.18
	8.00	36.80	63.00	37.40	0.17
	10.00	43.60	56.10	44.40	0.15

表 2 $E=1$ 或 2 MeV 窄 X 射线束穿过薄金属片 Cu 材料的光子和电子分布

Table 2 $E=1$ or 2 MeV, photon and electron distribution of narrow X-ray beamthrough the thin metal film Cu materials

X 射线束 能/MeV	薄金属片 长度/cm	X 面光子 散射率/%	Y'面光子 直射率/%	X 面电子 出射率/%	Y'面电子 出射率/%
$E=1$	2.000	40.500	60.100	25.200	0.160
	4.000	65.200	35.700	40.400	0.100
	6.000	79.900	21.200	49.400	0.057
	8.000	88.600	12.600	54.800	0.034
	10.000	93.800	7.500	58.000	0.024
$E=2$	2.000	31.300	69.700	28.000	0.280
	4.000	53.500	48.100	47.600	0.200
	6.000	68.800	33.100	61.200	0.140
	8.000	79.500	22.900	70.600	0.100
	10.000	86.700	15.800	77.000	0.062

由物理学中的吸收定律可知，当射线穿过靶材料时，它的强度由于与物质中原子相互作用而衰减，衰减程度与物质厚度及其组成成分（或吸收系数）有关，其规律可表示为：

$$I = I_0 \exp\left(-\int_L \mu d\right) \quad (1)$$

上式中 I 和 I_0 分别为入射和透射光强度， d 为穿过物质的厚度， μ 为吸收系数。

$$\mu = \frac{\rho}{A} N_A \sigma \quad (2)$$

图 6 和图 7 很清楚地反应了表 1、表 2 和表 3，靶材料的原子密度 ρ 和质量数 Z 越大，对 X 射线吸收系数 μ 越大，因而光子透射率较小。

表 3 $E=1$ 或 2MeV 窄 X 射线束穿过薄金属片 W 材料的光子、电子分布
Table 3 $E=1$ or 2MeV , photon and electron distribution of narrow X-ray beamthrough the thin metal film W materials

X 射线束 能/MeV	薄金属片 长度/cm	X 面光子 散射率/%	Y'面光子 直射率/%	X 面电子 出射率/%	Y'面电子 出射率/%
$E=1$	2.000	65.900	29.000	30.200	0.095
	4.000	84.900	8.340	38.900	0.037
	6.000	90.500	2.350	41.400	0.007
	8.000	92.100	0.620	42.100	0.004
	10.000	92.600	0.180	42.400	0.001
$E=2$	2.000	61.500	43.500	43.300	0.198
	4.000	88.600	18.600	61.800	0.076
	6.000	100.000	8.000	69.600	0.045
	8.000	105.000	3.400	73.000	0.015
	10.000	107.100	1.500	74.500	0.003

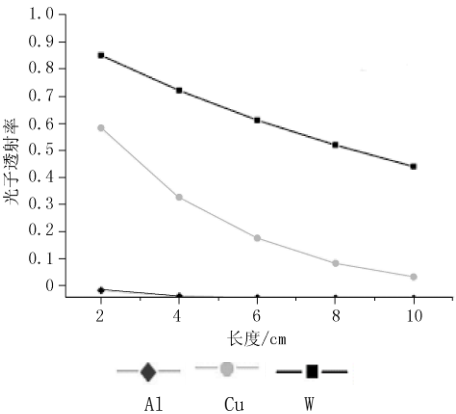


图 6 $E=1\text{MeV}$ 时不同薄金属片的 X 光子的直透率

Fig.6 $E=1\text{MeV}$ X-ray transmittance of the thin metal film

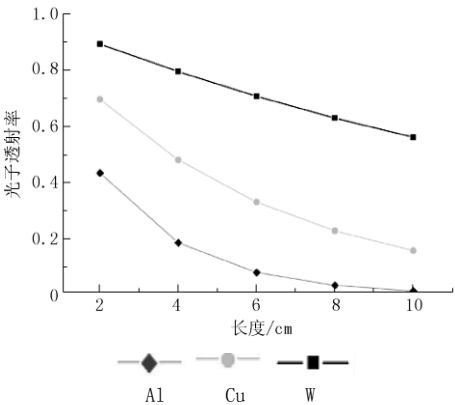


图 7 $E=2\text{MeV}$ 时不同薄金属片的 X 光子的直透率

Fig.7 $E=2\text{MeV}$ X-ray transmittance of the thin metal film

图 8 显示，当 X 射线分别穿过 Al、Cu 和 W 三种不同薄金属片时，原子密度和质量数 Z 越大，吸收系数 越大，即光子的转换效率高。当长度一定时，Al、Cu 和 W 中，W 的转换效率最高，Cu 其次，Al 的转换效率最低。

从图 9 中看出，当长度一定时，Al、Cu 和 W 中，Cu 的转换效率最高，Al 的相对较低，而 W 转换效率先是最高，最后变为最低。其原因可以理解为 W 原子由于原子序数高。在 2MeV 时，正负电子对的效应出现并在重金属中截面剧烈增大，造成重材料中的 X 射线吸收系数剧增。相对于 1MeV 而言，它同 Cu 和 Al 的差异可能会明显更大。

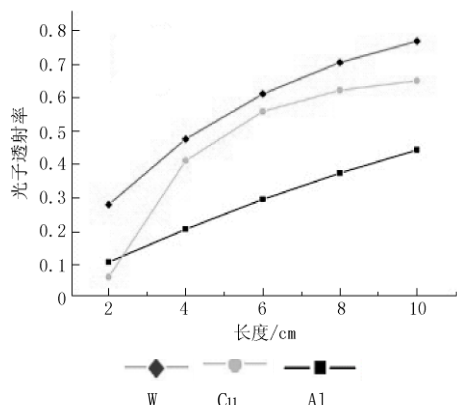


图 8 $E=1\text{ MeV}$ 时不同薄金属片的转换效率

Fig. 8 $E=1\text{ MeV}$ conversion efficiencies of X-ray in diverse metals with different lengths

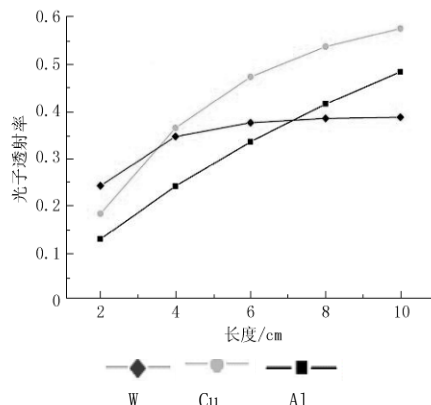


图 9 $E=2\text{ MeV}$ 时不同薄金属片的 X 光子的转换效率

Fig. 9 $E=2\text{ MeV}$ conversion efficiencies of X-ray in diverse metals with different lengths

4 结论

本文对基于 GEM 的高能 X 射线 ICT 探测器的方案进行了简单模拟和分析, 运用 MCNP 程序模拟了铝、铜、钨三种材料的金属薄片, 分析比较各种材料两种能量 X 光子的直透率和光电转换效率。结果表明: 重金属的光子透射率小, 光电转换效率高, 但高能 X 射线穿过靶材料时, Cu 比 W 的转换效率高, 原因是高能 X 射线在漂移区产生的电子能量小, 而被 W 靶材料自身吸收, 使得转换率降低。今后可以进一步开展该探测器的方案可行性的分析和讨论, 特别是在探测器的工程技术、理论方面还要做大量细致的工作。

参考文献

- [1] 王艳凤, 孙志嘉, 黄光明, 等. 基于 GEM 的中子束监测器的模拟[C]//第十五届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 2010: 262-267.
Wang YF, Sun ZJ, Huang GM, et al. Simulation of GEM neutron beam monitor[C]//The Fifteenth National Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology Symposium, 2010: 262-267.
- [2] 董静. 二维位置灵敏 X 射线气体电子倍增器 (GEM) 的研制[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
Dong J. The two-dimensional position sensitive gas electron multiplier[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [3] 周日峰. 基于气体电子倍增器原理的高能 X 射线工业 CT 气体探测器[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(6): 481-485.
Zhou RF. Gas detector of high energy X-ray industrial CT based on gas electron multiplier[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(6): 481-485.
- [4] Bellazzini R. The microgap chamber: A new detector for the next generation of high energy[J]. High Rate Experiments. Nuclear Instrument Methods, 1995, A368: 259-262.
- [5] 周密. 工业 X-CT 用新型 X 射线探测器性能的模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
Zhou M. Performance simulation study for novel X-ray detector used in X-ray industrial computed tomography[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [6] 张朝宗. 工业 CT 技术与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

- Zhang CZ. Industrial CT technology and theory[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [7] Oed A. Position-sensitive detect or with microstrip anode for electron multiplication with gases[J]. Nuclear Instrument Methods, 1988, A263: 351-354.
- [8] 汪琳. 气体电子倍增器 (GEM) 探测器[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(5): 482-485.
Wang L. Recent achievement of gas electrons multiplier (GEM) [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(5): 482-485.
- [9] Giomataris Y. Micromegas: A high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments[J]. Nuclear Instrument Methods, 1996, A376: 29-34.
- [10] Guirl L, Kane S, May J, et al. An aging study of triple GEMs in Ar-CO₂[J]. Nuclear Instrument and Methods, 2002, A478: 263-266.
- [11] Bondar A, Buzulutskov A, Shekhtman L, et al. High pressure operation of the triple GEM detector in pure Ne, Ar and Xe[J]. Nuclear Instrument and Methods, 2002, A481: 200-204.

Simulation of High Energy X-CT Detector Based on Gas Electron Multiplier by MCNP Program

ZHENG Li-jun^{1, 2b}, LIU Yi-bao^{1, 2a}✉, WANG Ai-xing^{1, 2a}

1.Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China Institute of Technology), Ministry of Education, Nanchang 330013, China

2.a).College of Science, b).College of Nuclear Engineering Technology, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: MCNP program in Monte Carlo is used to investigate the photoelectric conversion efficiency of detector with different energies or materials, and proving a gas detector which makes use of high density thin sheet metal as the photoelectric converter. Photoelectric transformation efficiency of X photon would had a significant change. The project has a considerable application prospect of development.

Key words: gas electron multiplies (GEX); high energy X-ray; industrial CT; MCNP



作者简介: 郑莉君 (1990—), 女, 东华理工大学辐射防护与环境保护专业硕士研究生, 主要从事辐射防护与安全、辐射粒子探测等研究, Tel: 13694880550, E-mail: 383484242@qq.com; 刘义保✉ (1967—), 男, 东华理工大学教务处处长, 硕士生导师, 从事核科学与技术、物理学两个一级学科的研究, 二级学科包括核技术及应用、辐射防护与环境保护、核能与核技术工程领域、安全工程 (核安全)、粒子物理与核物理, Tel: 13879482948, E-mail: ybliu@ecit.cn。