

金刚石中子探测器结构的模拟研究

任欢^{1,2} 张志宏¹ 夏晓彬¹ 蔡军¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 金刚石材料具有优异的耐高温、抗辐照性能,用其制作的辐照探测器在反应堆等苛刻环境下具有很好的应用前景。在分析金刚石中子探测器的结构和工作原理的基础上,使用MCNP(Monte Carlo N Particle Transport Code)模拟程序构建了金刚石中子探测器的物理模型,考虑探测器用于2 MWt液态燃料钍基熔盐试验堆(Thorium Molten Salt experimental Reactor-Liquid Fueled, TMSR-LF1)辐射场中,计算中子转换层(⁶LiF、¹⁰B)厚度、金刚石厚度、 γ 甄别阈值对探测器的中子探测效率、 γ 探测效率以及n/ γ 抑制比的影响。结果表明:⁶LiF更适合在中子、 γ 混合场中用作中子转换层;随着⁶LiF厚度增加,中子探测效率先增大后减小,⁶LiF的最优厚度为25 μm ;金刚石厚度增大会导致探测器的n/ γ 甄别性能下降,可以采用设置 γ 甄别阈值的方法解决金刚石层过厚时带来的 γ 干扰过大的问题,使探测器达到对 γ 不灵敏的要求。模拟研究工作获得了探测器结构参数对探测器性能的影响规律,对探测器后续的制作和研究具有指导意义。

关键词 金刚石, 中子探测效率, 中子转化层, MCNP6, n/ γ 甄别

中图分类号 TL814

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070403

Simulation study on the structure of diamond neutron detectors

REN Huan^{1,2} ZHANG Zhihong¹ XIA Xiaobin¹ CAI Jun¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(China University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] Diamond material demonstrates excellent temperature and radiation resistance properties, and detectors made from diamond exhibit good potential for use under harsh environments. [Purpose] This study aims to analyze the structure and working principle of diamond thermal neutron detectors, and establish a physical model of such a detector applied to 2 MW thorium molten salt experimental reactor-liquid fueled (TMSR-LF1) radiation field by using MCNP program. [Methods] First of all, ⁶Li and ¹⁰B were selected as neutron conversion materials considering the neutrons of TMSR-LF1 mainly concentrated in the $10^{-8}\sim 10^{-6}$ MeV energy range, and the Stopping and the Range of the Ions in Matter (SRIM) program was employed to calculate the range of secondary charged particles generated by the reaction in the neutron conversion layer and diamond layer. Then, the MCNP program was used to establish a physical model of diamond neutron detector applied to 2 MW TMSR-LF1 radiation field. Finally, the effects of the neutron conversion layer thickness (⁶LiF, ¹⁰B), diamond thickness, and γ screening threshold on the neutron detection efficiency, γ detection efficiency, and n/ γ suppression ratio of the detector were

中国科学院青年创新促进会项目(No.2021256)资助

第一作者: 任欢, 男, 1998年出生, 2020年毕业于华北水利水电大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核辐射探测技术

通信作者: 夏晓彬, E-mail: xi Xiaobin@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-11-12, 修回日期: 2023-04-21

Supported by Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No.2021256)

First author: REN Huan, male, born in 1998, graduated from North China University of Water Resources and Electric Power in 2020, master student, focusing on nuclear radiation detection technology

Corresponding author: XIA Xiaobin, E-mail: xi Xiaobin@sinap.ac.cn

Received date: 2022-11-12, revised date: 2023-04-21

determined through simulation results. **[Results]** The results reveals that ${}^6\text{LiF}$ is more suitable than ${}^{10}\text{B}$ for use in the neutron conversion layer in neutron and γ mixed fields. With the increase of the ${}^6\text{LiF}$ thickness, the neutron detection efficiency first increases and then decreases, and the optimal thickness of ${}^6\text{LiF}$ is 25 μm . The n/γ discrimination performance of the detector deteriorates with the increase of diamond thickness, but the diamond thickness must be greater than 20 μm to ensure insensitivity of the detector to γ , hence a γ screening threshold is needed to prevent excessive γ interference for thick diamond layers. **[Conclusion]** The influence of detector structural parameters on detector performance obtained by this study has guiding significance for the subsequent fabrication of and research on such detectors.

Key words Diamond, Neutron detection efficiency, Neutron conversion layer, MCNP6, n/γ screening

金刚石材料因为具有原子位移阈能大(40~50 eV)、禁带宽度大(5.5 eV)、导热系数高($22\text{ W}\cdot(\text{K}\cdot\text{cm})^{-1}$)等特性,所以使用金刚石制作的器件具有更好的耐高温、耐辐照性能^[1]。Angelone等^[2]使用金刚石制备的核辐射探测器在200~400 °C的高温、强 γ 环境下依然对 neutron 有很好的响应,且过高温再降温以后仍可正常使用,相对于其他类型的探测器(如硅、正比计数管等)在耐高温方面具有很大的优越性。欧洲粒子研究中心的研究表明^[3],在高达 $10^{15}\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-2}$ 通量的中子和质子、100 Mrad电子和光子的环境中,金刚石材料的电学性能没有降低,表现出了很强的抗辐射能力。相关研究证明了金刚石辐射探测器较传统的正比计数管、硅、活化箔等探测器在反应堆、高能物理、深空探测等高温、强辐照环境下具有更好的应用前景^[4]。

探测器的结构和 neutron 转换层、金刚石层等参数直接决定了探测器的性能^[5],本研究结合金刚石 neutron 探测器的结构特点,针对其在2 MWt液态燃料钍基熔盐堆试验堆(Thorium Molten Salt experimental Reactor-Liquid Fueled, TMSR-LF1)辐射场下的应用场景,使用蒙特卡罗程序 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code)构建了金刚石 neutron 探测器的物理模型,并分析了探测器的结构参数及 γ 甄别阈值对探测器的 neutron 探测效率、 n/γ 甄别性能的影响规律,所得结果可为金刚石 neutron 探测器的制备和相关工作提供参考。

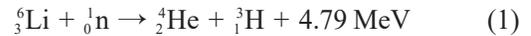
1 材料与方 法

1.1 探测器工作原理

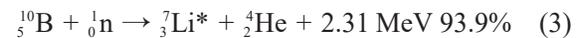
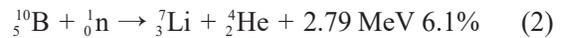
金刚石探测器的原理是入射的带电粒子电离或者激发碳原子的价电子,进而形成电子-空穴对,电子-空穴对在电场的作用下向两级移动形成脉冲信号。但 neutron 与金刚石发生 ${}^{12}\text{C}(n, \alpha){}^9\text{Be}$ 反应的阈能高达6.17 MeV,对于能量低于6.17 MeV的 neutron 则需要引入 neutron 转化物质,以增大 neutron 反应的概率。针

对 TMSR-LF1 的 neutron 主要集中在 $10^{-8}\sim 10^{-6}$ MeV 能区的特点,本文选取了 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^{10}\text{B}$ 用作 neutron 转化物质,它们有很大的热 neutron 截面(${}^6\text{Li}$ 是942 b、 ${}^{10}\text{B}$ 是3 840 b),能有效吸收热 neutron 并产生高能带电粒子^[6-7]。

${}^6\text{Li}$ 与 neutron 的反应式为:



${}^{10}\text{B}$ 与 neutron 的反应式为:



反应产生的次级带电粒子会进入到金刚石内,与金刚石反应产生电子-空穴对,原理如图1所示。

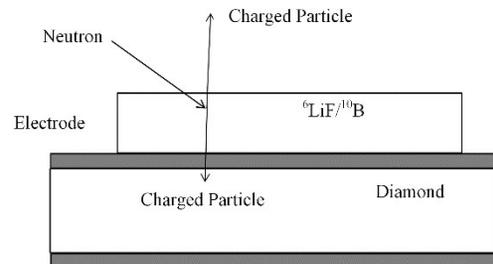


图1 金刚石 neutron 探测器原理示意图

Fig.1 Principle diagram of diamond neutron detectors

1.2 模拟计算方法和模型

使用 SRIM (the Stopping and the Range of the Ions in Matter)程序^[8]计算公式(1)~(4)中反应产生的次级带电粒子在 neutron 转化层、金刚石层中的射程,为后续研究中设置 neutron 转化层厚度和金刚石层厚度提供参考。

使用 MCNP 程序^[9]构建了图2所示的探测器物理模型,探测器主要包含 neutron 转化层、金刚石层,截面尺寸是0.4 cm×0.4 cm。设置了粒子物理选项卡(Particle Physics Options)PHYS:N卡中的第7项,使 neutron 能够发生 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 、 ${}^6\text{Li}(n, T){}^4\text{He}$ 反应^[10]。中子源和 γ 源均为各向同性的点源,距离 neutron 转化层表面距离为0.1 cm。

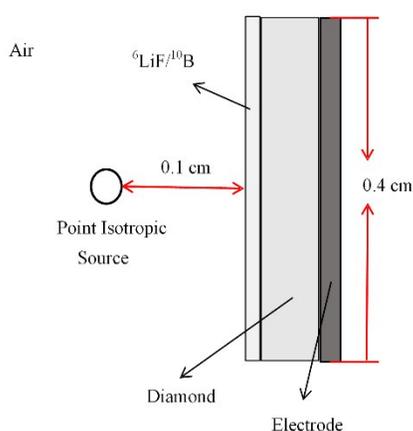


图2 MCNP构建的物理模型示意图
Fig.2 Schematic of the physical model established by MCNP simulation

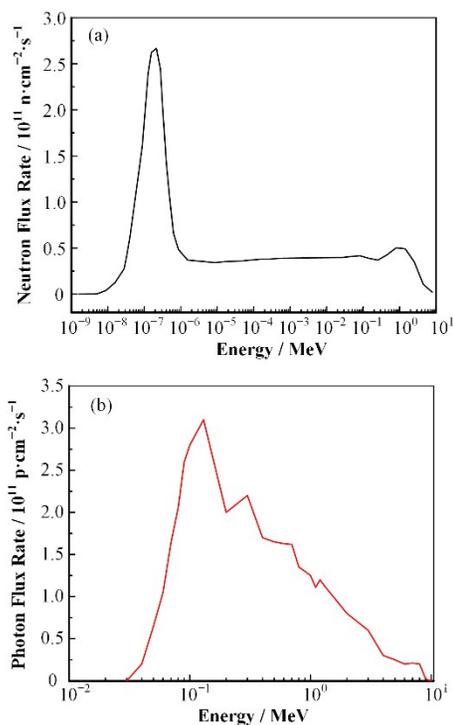


图3 TMSR-LF1的能谱 (a) 中子能谱, (b) γ 能谱
Fig.3 Energy spectra of TMSR-LF1 (a) Neutron spectrum, (b) γ spectrum

使用SI、SP卡对源的能量区间进行划分,将源的能谱设置成如图3所示的TMSR-LF1的中子、 γ 能谱^[11],输入的是图3的全能谱。在设置中子能谱时,同时在中子通量密度变化较大的 $10^{-8}\sim 10^{-6}$ MeV区间进行了细化。为确保模拟计算结果的不确定度足够小,模拟计算每次运行的粒子数目为 2.0×10^7 。根据半导体探测器工作时的电子学噪声大小与平均电离能之间的关系,模拟计算时,将次级粒子的能量阈值设置为0.04 MeV;假设电荷收集效率为100%、探测器对带电粒子的探测效率为100%,不考虑探测器

实际工作时的电子学噪声等因素的影响。

探测器的相对探测效率是指与探测器发生反应生成次级带电粒子进入到灵敏层而被记录的中子数 N 与入射到探测器表面的中子数 N_0 之比。本文使用F8脉冲高度计数卡记录了进入到金刚石栅元中的次级粒子(^3H (氚)、 ^4He (氦)、P(光子)、E(电子))的脉冲高度谱及粒子数。对于 ^{10}B 的反应,因为 ^7Li 的射程很短,只有极少数的 ^7Li 能够穿过 ^{10}B 层,本文只计算 ^4He 的沉积^[12],同时记录了 ^7Li 退激发过程中释放的P粒子; ^6Li 反应记录的是 ^3H 、 ^4He 粒子; γ 反应记录的是P、E粒子。使用F1卡记录进入到探测器表面的中子数或 γ 数。本文探测效率的定义是金刚石栅元内的沉积了能量的粒子数 N_1 (近似等于 N)除以入射到探测器的粒子总数量 N_0 。同时使用E8卡设置能量箱记录了金刚石栅元中粒子的能量沉积分布情况。

2 结果与讨论

中子转化层和金刚石层的厚度会直接影响探测器的中子探测效率、 n/γ 甄别性能,模拟计算了它们厚度的最佳参数。先使用SRIM程序计算得到了次级带电粒子在中子转化层、金刚石中的射程,结果如表1所示。次级粒子在 ^6LiF 、 ^{10}B 和金刚石层中的最大射程分别是 $33.9\ \mu\text{m}$ 、 $3.53\ \mu\text{m}$ 和 $20.7\ \mu\text{m}$ 。

表1 次级带电粒子在 ^6LiF 、 ^{10}B 和金刚石中的射程
Table 1 Range of secondary charged particles in ^6LiF , ^{10}B , and diamond

材料 Materials	粒子 Particle	射程 Range / μm
^6LiF	T(2.73 MeV)	33.9
^6LiF	α (2.06 MeV)	6.31
金刚石 Diamond	T(2.73 MeV)	20.7
金刚石 Diamond	α (2.06 MeV)	3.63
^{10}B	α (1.47 MeV)	3.53
^{10}B	^7Li (0.84 MeV)	1.1

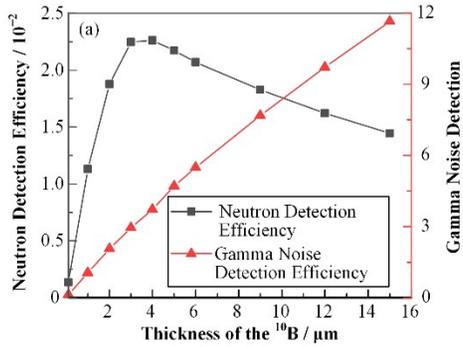
2.1 中子转换层厚度

中子转换层越厚,式(1)~(4)中子反应产生的次级粒子越多,中子探测效率增大;但中子转换层对次级粒子的吸收效应也越严重,会导致次级粒子数目减少,中子探测效率减小;中子转换层厚度增大同时也会对探测器的 n/γ 甄别性能产生影响。所以需要选取合适的厚度,以提高探测器的中子探测效率和 n/γ 甄别性能。

2.1.1 中子转换层材料的选取和厚度对中子探测效率的影响

由表1可预测 ^6LiF 的最优厚度应在几十微米,

^{10}B 则是几微米, 所以选取 ^6LiF 、 ^{10}B 的厚度为 $0\sim 45\ \mu\text{m}$ 、 $0\sim 15\ \mu\text{m}$, 金刚石厚度设为 $100\ \mu\text{m}$ 。计算得到在没有中子转化层时, 中子探测效率为 1.31×10^{-8} 。引入中子转化层, 计算不同 ^6LiF 和 ^{10}B 转换层厚度下的中子探测效率、 ^{10}B 反应伴随产生的 γ 噪声的探测效率, 结果如图 4 所示。随着 ^{10}B 厚度和 ^6LiF 厚度增



加, 中子探测效率都呈现先增大后减小的趋势。 ^{10}B 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 中子探测效率达到最大值 2.26% ; ^6LiF 厚度为 $25\ \mu\text{m}$ 时, 中子探测效率达到最大值 3.87% 。计算结果与 Tchouaso、Bedogni 等^[12-13] 使用 Geant4、PHITS 程序得到的 ^{10}B 和 ^6LiF 转换层厚度对热中子 ($0.025\ \text{eV}$) 探测效率的影响趋势相同。

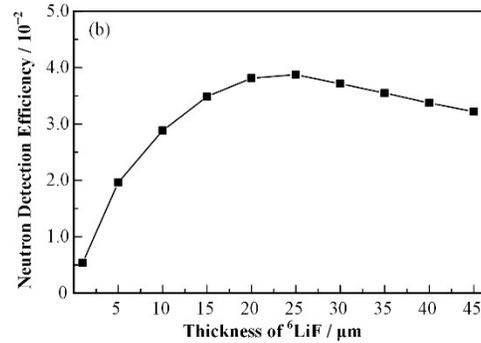


图 4 不同转化层厚度下的中子及 γ 的探测效率 (a) ^{10}B 中子转化层, (b) ^6LiF 中子转化层
Fig.4 Detection efficiency of neutrons and γ at different thicknesses of the conversion layer
(a) ^{10}B neutron conversion layer, (b) ^6LiF neutron conversion layer

^{10}B 产生有较强的 γ 噪声干扰, 且干扰随着 ^{10}B 厚度而增加, ^6LiF 则没有产生 γ 干扰信号, 中子探测效率的最大值也更大。同时 ^6LiF 反应产生的 T 和 α 能量比 ^{10}B 反应产生的 α 的能量更高, 不仅更容易入射到灵敏层, 而且更有利于在中子、 γ 混合场下实现 n/ γ 甄别^[8]。综上所述, 选择 ^6LiF 作为本文的中子转化物质。

为探究 ^6LiF 厚度对中子探测效率影响的原因, 使用 E8 卡设置能量箱, 得到了不同 ^6LiF 厚度下金刚石中的次级粒子的能量沉积谱, 取其中 4 组展示, 如图 5 所示。 ^6LiF 厚度从 $0\ \mu\text{m}$ 增加到 $25\ \mu\text{m}$, 次级粒子的 T 和 α 的峰会快速展宽, 但次级粒子计数率增大, 这是因为中子与 ^6LiF 反应产生的次级粒子数量和进入金刚石的次级粒子数量增多, 使得中子探测效率增大。而在超过 $25\ \mu\text{m}$ 后, 虽然次级粒子的能谱分布范围不再改变, 但次级粒子的计数率下降, 这是因为 ^6LiF 的自吸收效应增大, 更多的次级粒子沉积在 ^6LiF , 无法进入金刚石层, 从而导致中子探测效率出现下降趋势。

将 ^6LiF 厚度设为 $0.1\ \mu\text{m}$, 得到了次级粒子能量沉积谱, 如图 6 所示, 分析此时中子与金刚石中子探测器发生的核反应。可以发现, 能谱在 $2.73\ \text{MeV}$ 和 $2.06\ \text{MeV}$ 处出现了峰, 这是中子与 ^6Li 反应产生的 T 和 α 的峰。在右上角放大图中, $6\ \text{MeV}$ 、 $9.1\ \text{MeV}$ 处出现的峰是高能中子 (大于 $6.17\ \text{MeV}$) 与金刚石发生 $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$ 、 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应产生的 α 引起的^[14]。说明探测器可以同时探测热中子和快中子, 且信号

主要是由热中子与 ^6LiF 反应产生的。

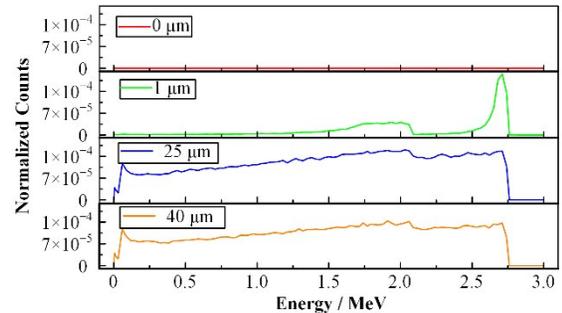


图 5 不同 ^6LiF 厚度下的次级粒子的能量沉积谱
Fig.5 Energy deposition spectra of secondary particles at different ^6LiF thicknesses

2.1.2 中子转化层对 n/ γ 甄别性能的影响和厚度的选取

因为 TMSR-LF1 中伴随着较强的 γ 辐射, 需要探测器具有较强的抗 γ 干扰或者 n/ γ 甄别性能, 为了探究中子转化层厚度对探测器的 n/ γ 甄别性能的影响, 保持金刚石厚度不变, 先计算得到了 TMSR-LF1 的 γ 辐射场下 ^6LiF 厚度与 γ 探测效率的关系, 如图 7 所示, 使用式 (5)^[6] 计算得到了 ^6LiF 厚度与 n/ γ 抑制比的关系, 如图 8 所示。

γ 探测效率随着 ^6LiF 厚度增加呈线性增长趋势, 这是因为 γ 能够与 ^6LiF 反应产生次级电子, 次级电子能够进入到金刚石内而被探测到, 所以 ^6LiF 厚度增加使进入到金刚石内的次级电子数目增多, 导致 γ 探测效率增大。发现图 8 和图 4(b) 中 ^6LiF 厚度和中

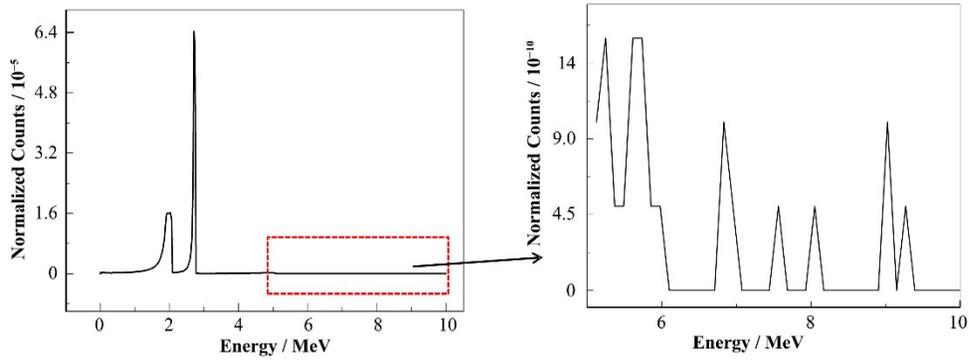


图6 ⁶LiF厚度为0.1 μm时的次级粒子的能量沉积谱
Fig.6 Energy deposition spectrum of secondary particles at the ⁶LiF thickness of 0.1 μm

子探测效率的关系类似。通过分析⁶LiF厚度对
中子、γ探测效率的影响,发现⁶LiF厚度从1 μm增加到
45 μm,中子、γ探测效率分别增大了5.97倍、1.05倍,
⁶LiF厚度对
中子探测效率的影响更大,此时n/γ抑制比
的值主要由中子探测效率决定。

综上所述,在金刚石厚度设定为100 μm条件
下,⁶LiF的最优厚度为25 μm,此时探测器的中子探
测效率和n/γ抑制比达到最大值。

$$\eta = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_\gamma} \quad (5)$$

式中:η是n/γ抑制比的值;ε_n是中子探测效率;ε_γ是γ
探测效率。

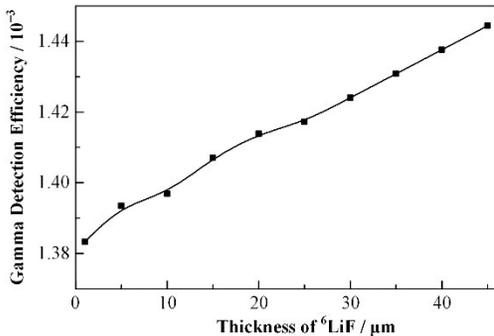


图7 不同⁶LiF厚度下的γ探测效率
Fig.7 γ detection efficiency at different ⁶LiF thicknesses

2.2 金刚石层厚度

金刚石层作为探测器的灵敏层,需足够的厚度
将次级粒子完全沉积,以提高中子探测效率。但是γ
射线也会与金刚石反应产生次级电子对探测器产生
干扰,这就要求金刚石尽量薄。所以需要选取合适
厚度的金刚石,在提高中子探测效率时尽量减少γ
的干扰。根据§2.1的结果,取⁶LiF的厚度为25 μm,
在此基础上进一步分析金刚石厚度对探测器性能
的影响。

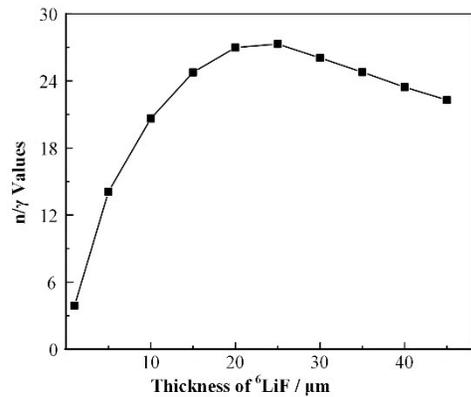


图8 不同⁶LiF厚度下的n/γ抑制比
Fig.8 n/γ ratios at different ⁶LiF thicknesses

2.2.1 金刚石厚度对 中子、γ探测效率和n/γ抑制比 的影响

改变金刚石的厚度,计算得到了金刚石厚度与
中子探测效率和γ探测效率的关系,如图9所示。再
使用式(5)计算了对应的n/γ抑制比,如图10所示。

可得,金刚石厚度增加,中子、γ探测效率均呈线
性增加趋势,而n/γ抑制比降低,这是因为金刚石厚
度从10 μm到130 μm,中子探测效率从3.85%增加
到3.87%,增加了1.005倍;γ射线探测效率从
0.003 1%增加到0.19%,增加了61.3倍。金刚石厚
度增加对γ探测效率的增加幅度更大,此时n/γ的
值主要由γ探测效率决定。此时n/γ抑制比较小,
尤其是金刚石厚度超过20 μm时,探测器未达到对
γ不灵敏的要求(n/γ的值大于1 000时探测器对
γ不灵敏)^[15],存在γ干扰比较大的问题,采用设置
γ甄别阈值的方法来降低γ对探测器的干扰^[6]。

2.2.2 γ甄别阈值

1)γ甄别阈值区间的选取。首先,通过分析中
子、γ射线反应产生的次级粒子在金刚石中的能量
积分分布来确定γ甄别阈值的设置区间。使用E8卡

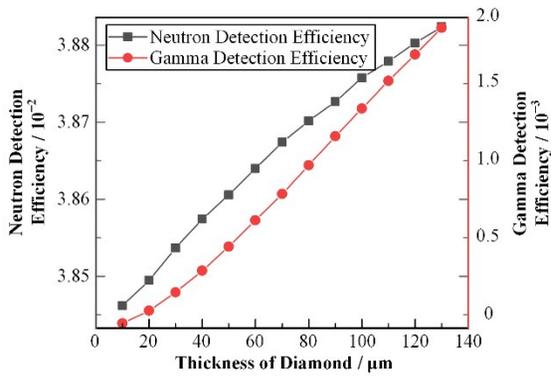


图9 不同金刚石厚度下的中子和 γ 探测效率
Fig.9 Neutron and γ detection efficiencies at different diamond thicknesses

置了110个能量箱,得到了不同金刚石厚度下的能量沉积谱,取其中4组的结果如图11所示。

由图11(a)可得,当金刚石厚度达到20 μm 后,中子反应的次级粒子能量沉积谱开始重合,20 μm 、60 μm 、110 μm 的能谱几乎完全重合,说明此时几乎

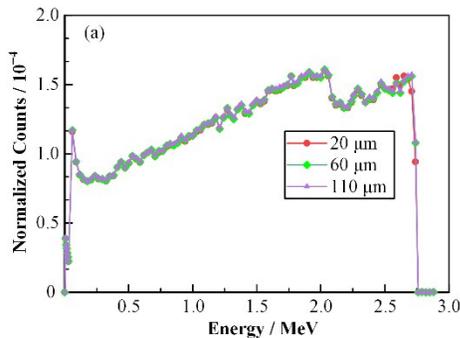


图11 不同金刚石厚度下的中子(a)和 γ (b)的次级粒子能量沉积谱

Fig.11 Secondary particle energy deposition spectra of neutrons (a) and γ (b) at different diamond thicknesses

2) γ 甄别阈值对中子、 γ 探测效率的影响。计算得到了中子、 γ 探测效率与金刚石厚度、 γ 甄别阈值的关系,取其中4组如图12、表2所示。使用式(6)计算得到了中子、 γ 探测效率在甄别阈值0~0.4 MeV的损失率。

$$\mu = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{0.4}}{\varepsilon_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: μ 为探测效率损失率; ε_0 是 γ 甄别阈值为0 MeV时的探测效率; $\varepsilon_{0.4}$ 是 γ 甄别阈值为0.4 MeV时的探测效率。由图10可得,中子、 γ 探测效率均随着甄别阈值的增加逐渐减少,金刚石厚度不影响该变化趋势,但因为中子产生的次级粒子主要集中在大于0.4 MeV的能区,所以中子探测效率减少幅度比较小,甄别阈值为0.4 MeV时,中子探测效率损失比小于10%;而 γ 探测效率则随着甄别阈值的增加迅速减少,甄别阈值为0.4 MeV时, γ 探测效率的损失比

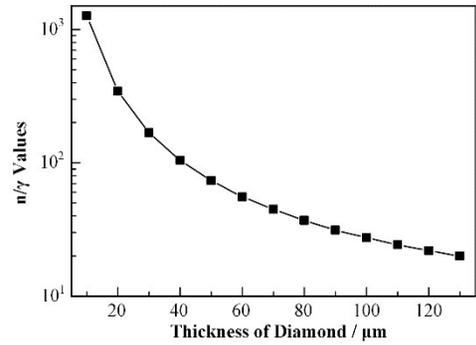
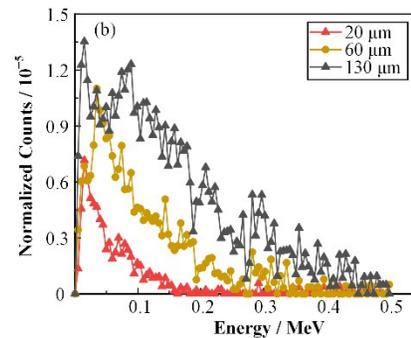


图10 不同金刚石厚度下n/ γ 抑制比
Fig.10 n/ γ ratios at different diamond thicknesses

所有的次级粒子都被沉积,中子的次级粒子主要分布在0~2.73 MeV。由图11(b)可得, γ 的次级粒子数目会随着金刚石厚度的增加而增加,与图7中 γ 探测效率的变化规律一致,但次级粒子的能量均集中在0~0.4 MeV,不随金刚石厚度变化而变化。因为中子的次级粒子在0~0.4 MeV的数量占比很小,所以将 γ 甄别阈值范围设定在0~0.4 MeV。



可以达到98%以上,是中子探测效率损失的9~10倍,说明设置 γ 甄别阈值能有效地消除 γ 信号,而且对中子探测效率的影响远小于 γ 探测效率。

2.2.3 γ 甄别阈值对n/ γ 抑制比的影响和金刚石厚度的选取

计算得到了不同金刚石厚度、不同 γ 甄别阈值下的n/ γ 抑制比,如图13所示。

金刚石厚度增加会导致探测器的n/ γ 甄别能力降低,可以通过设置 γ 甄别阈值来提高探测器的n/ γ 甄别能力,尤其是在金刚石比较厚的情况下。当中子探测器的 γ 探测效率与中子探测效率之比小于0.001时,探测器对 γ 不灵敏^[15]。例如,在 γ 甄别阈值为0.4 MeV、金刚石厚度在120 μm 以下时探测器对 γ 不灵敏;但由表1中T在金刚石内的射程(20.7 μm)可得,金刚石层的厚度需要大于20 μm 才能将中子与 ^6LiF 反应产生的次级粒子完全沉积。

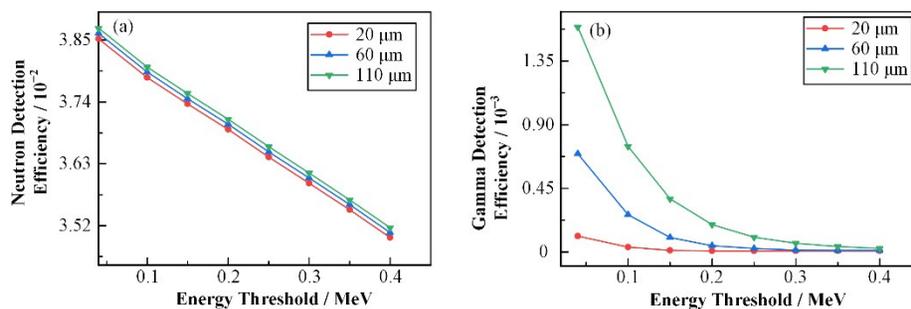


图12 不同 γ 能量甄别阈值下的中子(a)和 γ (b)探测效率
Fig.12 Neutron (a) and γ (b) detection efficiencies at different γ energy screening thresholds

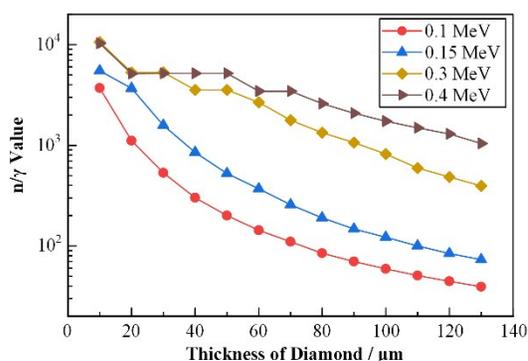


图13 不同金刚石厚度、4组能量甄别阈值下的 n/γ 抑制比
Fig.13 n/γ ratios at different diamond thicknesses for four energy screening thresholds

3 结语

本文使用MCNP模拟程序开展了金刚石中子探测器结构参数模拟研究,构建了探测器的物理模型,得到了探测器在TMSR-LF1的中子、 γ 辐射场下,中子转化层厚度、金刚石层厚度和 γ 甄别阈值对探测器中子探测效率和 n/γ 甄别性能的影响。模拟计算时将能量阈值设置为0.04 MeV,电荷收集效率假设为100%。结果显示:随着中子转换层厚度的增加,金刚石中子探测器的中子探测效率先增大后减小, ${}^6\text{LiF}$ 的最优厚度为25 μm ;探测器可以同时探测到快中子和热中子,且信号主要由热中子产生;中子的次级粒子沉积能量区间远大于 γ 的次级粒子;金刚石厚度需要大于20 μm 以保证次级粒子被完全沉积;设置 γ 甄别阈值可以解决金刚石过厚时带来的 γ 干扰过大问题,使探测器达到对 γ 不灵敏的要求。本文的研究结果可以为金刚石中子探测器的设计和相关工作提供一定的参考作用。

作者贡献声明 任欢负责程序编写、数据分析、起草论文以及后续修改;张志宏负责指导程序编写并协助修改论文;夏晓彬、蔡军负责论文内容的审阅和指导修改。

参考文献

- 梁红伟, 廖传武, 夏晓川, 等. 第三代半导体辐射探测器研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 69 - 82.
LIANG Hongwei, LIAO Chuanwu, XIA Xiaochuan, *et al.* Research progress of the third generation semiconductor radiation detector[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(14): 69 - 82.
- Angelone M, Fomesu N, Pillon M, *et al.* Spectrometric performances of monocrystalline artificial diamond detectors operated at high temperature[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(5): 2416 - 2423. DOI: 10.1109/TNS.2012.2210735.
- 沈沪江. 纳米金刚石薄膜及其辐射探测器的制备和性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2010.
SHEN Huijiang. Research for fabrication and properties of nano-crystalline diamond film and radiation detector[D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.
- 魏宇航, 魏志勇, 牛志, 等. 中子探测器的研究现状与发展趋势[J]. 科学技术创新, 2019(34): 28 - 29.
WEI Yuhang, WEI Zhiyong, NIU Zhi, *et al.* Research status and development trend of neutron detectors[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(34): 28 - 29.
- 马龙, 田立朝, 马燕云, 等. 基于 ${}^6\text{Li}+\text{CdTe}$ 的新型中子探测器的优化设计研究[J]. 核技术, 2020, 43(8): 080401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.080401.
MA Long, TIAN Lichao, MA Yanyun, *et al.* Research on optimal design of new neutron detector based on ${}^6\text{Li}+\text{CdTe}$ [J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(8): 080401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.080401.
- 汲长松. 中子探测[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2014.
JI Changsong. Neutron detection[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2014.
- 汪晓莲, 李澄, 邵明. 粒子探测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.

- WANG Xiaolian, LI Cheng, SHAO Ming. Particle detection technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- 8 Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P. SRIM - the stopping and range of ions in matter (2010)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2010, **268** (11 - 12): 1818 - 1823. DOI: [10.1016/j.nimb.2010.02.091](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091).
- 9 Goorley T, James M, Booth T, *et al.* Initial MCNP6 release overview[J]. Nuclear Technology, 2012, **180**(3): 298 - 315. DOI: [10.13182/nt11-135](https://doi.org/10.13182/nt11-135).
- 10 Zieb K, Hughes H G, James M R, *et al.* Review of heavy charged particle transport in MCNP6.2[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **886**: 77 - 87. DOI: [10.1016/j.nima.2018.01.002](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.002).
- 11 张志宏. 2 MWt 液态钍基熔盐堆辐射屏蔽的预概念设计[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2014.
ZHANG Zhihong. Preliminary conceptual design of the radiation shielding for the 2 MWt thorium molten salt reactor with liquid fuel[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2014.
- 12 Tchakoua Tchouaso M. Efficiency limitation of thin film coated planar semiconductor thermal neutron detector[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **173**: 109716. DOI: [10.1016/j.apradiso.2021.109716](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109716).
- 13 Bedogni R, Calamida A, Castro-Campoy A I, *et al.* Modelling the response of semiconductor based thermal neutron detectors with MCNP 6.2 and PHITS[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1018**: 165855. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165855](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165855).
- 14 Almaviva S, Marinelli M, Milani E, *et al.* Thermal and fast neutron detection in chemical vapor deposition single-crystal diamond detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2008, **103**(5): 054501. DOI: [10.1063/1.2838208](https://doi.org/10.1063/1.2838208).
- 15 Kouzes R T, Ely J H, Lintereur A T, *et al.* Neutron detector gamma insensitivity criteria[R]. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland W A (United States), 2009.