

# 微结构半导体中子探测器的物理模拟设计 及优化

张海涛<sup>1</sup> 毛楚元<sup>1</sup> 廖义相<sup>1</sup> 吴正新<sup>1,2</sup> 刘国卿<sup>1,2</sup> 颜 强<sup>1,2</sup>

1(深圳大学 物理与光电工程学院 深圳 518060)

2(深圳市核与辐射安全重点实验室 深圳 518060)

**摘要** 微结构半导体中子探测器(Micro Structure Neutron Detector, MSND)具有体积小、探测效率高、对 $\gamma$ 射线不敏感、功耗低、易于集成等优点,是替代 $^3\text{He}$ 中子探测器的理想候选。本研究旨在通过物理设计,确定MSND的最优微结构参数并理论预测其探测性能。研究基于高阻硅单面沟槽结构,采用Geant4蒙特卡罗模拟方法,在充分考虑实际 $^6\text{LiF}$ 填充密度的条件下,以热中子探测效率和 $n/\gamma$ 甄别比为核心指标对结构进行优化。结果表明,即使在 $^6\text{LiF}$ 填充密度为 $1.27\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的较低水平下,MSND仍可实现较高的热中子探测效率与 $n/\gamma$ 甄别比;优化后的结构参数为沟槽宽度 $16\text{ }\mu\text{m}$ 、沟槽间距 $14\text{ }\mu\text{m}$ 、沟槽深度在权衡性能、机械强度与工艺限制后确定为 $480\text{ }\mu\text{m}$ 。在优化结构及 $400\text{ keV}$ 能量阈值条件下,热中子探测效率达到 $31.3\%$ ,对 $^{137}\text{Cs}$ 的 $662\text{ keV}$  $\gamma$ 射线的 $n/\gamma$ 甄别比可以达到 $7.6\times 10^3$ 。本研究验证了所设计MSND性能显著优于传统平面型半导体中子探测器,为高性能MSND的研发提供了重要参考。

**关键词** 微结构中子探测器, 氟化锂, 中子探测, 半导体辐射探测器, 蒙特卡罗模拟

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.240434

**CSTR:** 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.240434

## Physical simulation design and optimization of micro structure semiconductor neutron detector

ZHANG Haitao<sup>1</sup> MAO Chuyuan<sup>1</sup> LIAO Yixiang<sup>1</sup> WU Zhengxin<sup>1,2</sup> LIU Guoqing<sup>1,2</sup> YAN Qiang<sup>1,2</sup>

1(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

2(Shenzhen Key Laboratory of Nuclear and Radiation Safety, Shenzhen 518060, China)

**Abstract** [Background] Micro structured neutron detectors (MSNDs) are a promising alternative to  $^3\text{He}$  detectors, offering a compact size, high thermal neutron detection efficiency, low  $\gamma$  sensitivity, low power consumption, and ease of integration into detection systems. [Purpose] This study aims to determine the optimal micro-structural parameters and theoretically predict the detection properties through the physical simulation design of MSNDs. [Methods] Firstly, the Monte Carlo simulation tool Geant4 was employed to model the MSND based on a high-

中核集团领创科研项目(No. 20221024000072F6-0002-7, No. CNNC-LCKY-2022064)、广东省基础与应用基础研究基金项目(No. 2023A1515011120)和深圳市高等院校稳定支持计划(No. 20220810103801001)资助

第一作者: 张海涛, 男, 1999年出生, 2022年毕业于深圳大学, 现为硕士研究生, 研究领域为辐射探测技术

通信作者: 颜强, E-mail: qiang\_yan@szu.edu.cn

收稿日期: 2024-11-05, 修回日期: 2026-02-11

Supported by Lingchuang Research Project of China National Nuclear Corporation (No. 20221024000072F6-0002-7, No. CNNC-LCKY-2022064), Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (No. 2023A1515011120), Stability Support Plan for Shenzhen Colleges and Universities (No. 20220810103801001)

First author: ZHANG Haitao, male, born in 1999, graduated from Shenzhen University in 2022, master student, focusing on radiation detection technique

Corresponding author: YAN Qiang, E-mail: qiang\_yan@szu.edu.cn

Received date: 2024-11-05, revised date: 2026-02-11

resistance silicon wafer with a single-sided trench structure, and combined with Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) code to simulate the impact of different  ${}^6\text{LiF}$  filling densities on the mean free path of thermal neutrons with full consideration given to the actual  ${}^6\text{LiF}$  filling density. Then, the detection efficiency for thermal neutrons and the  $n/\gamma$  discrimination ratio were evaluated as key performance metrics. Finally, the structural parameters were systematically optimized to maximize the detector performance. **[Results]** The results indicate that the MSND achieves high thermal neutron detection efficiency and a high  $n/\gamma$  ratio even at a low  ${}^6\text{LiF}$  filling density of  $1.27\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . The optimal structural parameters are determined to be a trench width of  $16\text{ }\mu\text{m}$  and a trench distance of  $14\text{ }\mu\text{m}$ . While a deeper trench enhances detection efficiency, a depth of  $480\text{ }\mu\text{m}$  is selected as the optimal compromise, balancing performance with the mechanical strength of the wafer and the limitations of the etching process. By applying the optimized structure and an energy threshold of  $400\text{ keV}$ , the thermal neutron detection efficiency reaches  $31.3\%$ , and the  $n/\gamma$  discrimination ratio for  $662\text{ keV}$  gamma rays from  ${}^{137}\text{Cs}$  reaches  $7.6\times 10^3$ . **[Conclusions]** Simulation results of this study demonstrate that the optimized MSND design significantly outperforms traditional planar semiconductor neutron detectors. The findings provide a valuable reference for the further development of high-performance MSNDs.

**Key words** Micro structure neutron detector, Lithium fluoride, Neutron detection, Semiconductor radiation detectors, Monte Carlo simulations

中子探测技术在中子注量监测、中子无损检测、中子俘获治疗、中子全息成像等核技术应用中发挥关键作用。由于中子不带电,中子的探测需要通过核反应产生的次级带电粒子实现。在中子探测器的制造过程中,需要在中子敏感材料中掺入具有大中子反应截面的核素来实现中子信号的转换。常用的中子敏感核素包括 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ 、 ${}^{157}\text{Gd}$ 等,其中 ${}^3\text{He}$ 具有 $5\,330\text{ b}$ 的热中子反应截面,产生 ${}^3\text{H}$ 和 ${}^3\text{H}$ 次级粒子,释放 $0.764\text{ MeV}$ 的能量,是最常用的中子探测器工作介质<sup>[1]</sup>。当前全球 ${}^3\text{He}$ 资源日益紧缺、价格攀升,开发新型替代 ${}^3\text{He}$ 的中子探测器已成为核探测技术领域的研究前沿<sup>[2]</sup>。传统热中子探测器(如 $\text{BF}_3/{}^3\text{He}$ 管)通常需要气密性腔室和高压电路,基于闪烁体(有机物/锂玻璃)的探测器则依赖复杂的光电转换系统。这些因素导致它们普遍存在体积庞大的固有缺陷,难以满足探测器微型化的发展需求<sup>[3]</sup>。相比之下,基于半导体的固体中子探测器展现出巨大的微型化潜力,采用将中子敏感材料与半导体探测器集成的思路,通过中子与敏感材料相互作用产生的次级带电粒子来实现中子探测<sup>[4]</sup>,依托强大的半导体工业制造能力,半导体中子探测器近年来发展迅速<sup>[5-6]</sup>,成为替代当前 ${}^3\text{He}$ 中子探测器的重要技术方案之一。

早在20世纪60~70年代,欧美研究人员尝试在半导体探测器表面涂覆薄层中子转换材料来制备中子探测器,这种平面型的半导体中子探测器由于接触面积小、自吸收效应严重,探测效率理论值上限只能达到 $5\%$ <sup>[7]</sup>。1987年苏联研究人员发现在半导体上进行微结构加工、填充中子转换材料后探测器的

探测效率可以显著提升<sup>[8]</sup>,但是受限于当时刻蚀工艺,该探测结构未能实现。近年来,半导体微处理技术的发展促进了微结构半导体中子探测器(Micro Structure Neutron Detector, MSND)的出现,国内外相继出现圆孔型阵列、正弦沟槽结构、上下交错叠加结构、单面直沟槽结构和双面直沟槽结构MSND的研究<sup>[9-10]</sup>,试图增加灵敏面积并提升灵敏体积,热中子效率得到极大提高。其中,采用 ${}^6\text{LiF}$ 作为中子敏感材料,双层堆叠结构的MSND<sup>[11]</sup>对热中子探测效率可达到 $29\%$ , $n/\gamma$ 甄别比 $5.95\times 10^5$ 。随着硅基材料微结构加工工艺的提升,更多精细结构的半导体探测器出现<sup>[12-13]</sup>。2011年,美国Radiation Detection Technologies(RDT)公司率先实现单面沟槽结构MSND芯片的量产销售,该器件垂直灵敏面积仅有 $1\text{ cm}^2$ ,通过向微结构中填充 ${}^6\text{LiF}$ 转换材料可以达到 $20\%\sim 30\%$ 的热中子探测效率。基于RDT芯片的微结构参数,吴建等<sup>[14]</sup>采用蒙特卡罗模拟验证了微米级深沟槽MSND的可行性,研究表明在 ${}^6\text{LiF}$ 完全填充(填充密度 $\rho=2.54\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )条件下,器件优化结构可使热中子本征探测效率理论值提升至 $37.77\%$ 。此外,北京工业大学、东华理工大学等<sup>[15-16]</sup>单位开展了PN结型、肖特基结型等类型的MSND工艺研究,但目前国内尚未形成稳定成熟的商用MSND芯片供应,在实际应用中面临诸多技术挑战,具体包括: ${}^6\text{LiF}$ 填充受限于材料颗粒尺寸与工艺条件难以实现密实填充;沟槽深宽比过大大会引发侧壁侧刻现象,进而影响芯片漏电流控制及物理信号读取;非标准半导体加工工艺导致芯片性能不稳定,良品率低等。本研究依托Geant4蒙特卡罗模拟方法,在优化探测

器结构的基础上系统探究不同填充密度对MSND热中子探测效率和 $\gamma$ 甄别比的影响机制,旨在提出沟槽结构的优化设计参数。

## 1 物理模型设计

传统平面二维半导体中子探测器的结构如图1(a)所示,在半导体探测器表面涂覆中子转换材料,该类型探测器结构简单,便于工艺实现,但这种结构性能受到限制:1)中子转换材料中发生核反应产生的次级带电粒子会向 $4\pi$ 立体角方向随机射出,平面探测器的几何结构仅能覆盖有限立体角,导致大部分次级粒子偏离探测器方向而无法被有效收集;2)中子转换材料对次级带电粒子存在自吸收效应,表现为:随着材料厚度的增加,次级粒子在穿透转换层进入半导体前会产生显著的能量衰减,当转换层厚度超过临界值时,探测器的中子探测效率趋于饱和

值<sup>[7]</sup>,使得通过增加中子转换材料厚度来提升平面结构探测器效率的技术路径不具可行性。

突破平面型探测器探测效率限制的核心在于克服转换材料的自吸收效应,提升次级粒子的收集效率。本文设计了一种单面沟槽结构的半导体中子探测器,采用本征硅材料(密度 $2.34\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )作为半导体衬底,仿真模型初始设定为三维长方体结构,尺寸为 $500\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }000\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ ,通过在半导体衬底表面构建深槽阵列。阵列深槽的设计一方面提高了中子转换材料与半导体的接触面积,同时通过沟槽的三维结构实现对多角度出射粒子的捕获,如图1(b)所示,增大了次级粒子进入探测器的概率,另一方面可以通过改善填充工艺,提高中子转换材料的填充量和填充密度,增加中子发生核反应的几率。因此,相较于传统2D半导体探测器,MSND的热中子探测效率可以得到数量级的提高。

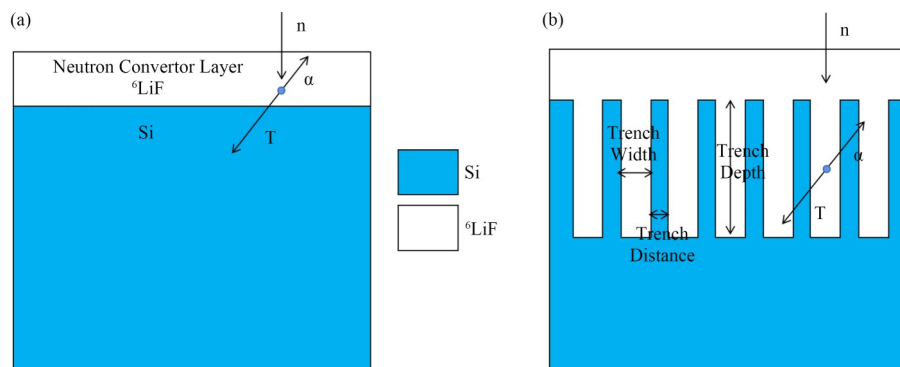


图1 半导体中子探测器结构示意图 (a) 平面型, (b) 微结构型  
Fig.1 Structural diagram of semiconductor neutron detectors (a) Planar type, (b) Microstructure type

本文所设计的微结构探测器的三维示意图如图2所示,灰色区域表示硅半导体。在仿真模型中,由于难以精确模拟实际PIN结(P型-本征-N型)或PN结(P型-N型)形成的电场分布以界定灵敏体积,本研究将图示的整个灰色硅区域定义为探测器的灵敏体积,并基于此进行后续研究。该微结构的物理设计包含沟槽的深度(Trench Depth)、宽度(Trench Width)和间距(Trench Distance),将中子转换材料填

充在沟槽当中。常用的固体中子转换材料有 $^{10}\text{B}$ 、 $^6\text{Li}$ 和 $^{157}\text{Gd}$ 等<sup>[17-18]</sup>,其中 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 核反应具有最大的热中子反应能<sup>[1]</sup>,产生的高能次级粒子拥有更强的穿透能力,可有效克服转换材料对带电粒子的自吸收效应,有利于带电粒子在硅基半导体中实现能量沉积,基于上述优势,本研究选用 $^6\text{LiF}$ 作为中子转换材料。

当热中子与沟槽中的 $^6\text{LiF}$ 发生核反应时,产生

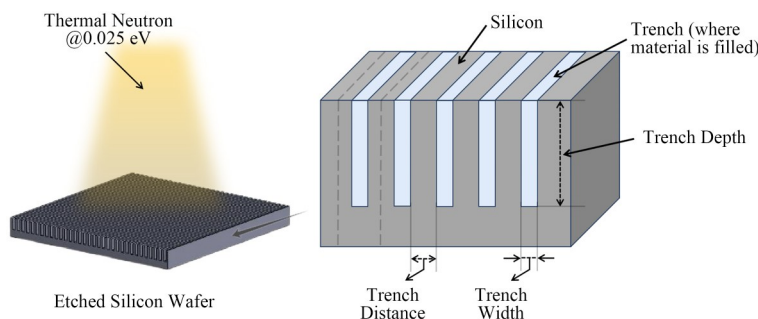


图2 微结构半导体中子探测器结构示意图(彩图见网络版)  
Fig.2 Schematic structure of a micro structure neutron detector (color online)

的核反应式如式(1)所示。反应生成的 $\alpha$ 粒子( ${}^4\text{He}$ , 2.05 MeV)和T粒子( ${}^3\text{H}$ , 2.73 MeV)会进入硅半导体并产生电子-空穴对。通过施加适当的偏置电压,电子-空穴对会发生漂移,输出辐射探测信号,实现对中子的间接探测<sup>[7]</sup>。



沟槽的深度直接影响了中子转换材料的填充量及其与半导体的接触面积。通过 ${}^6\text{LiF}$ 的中子宏观截面,可以计算出热中子在不同材料密度下的平均自由程。如图2所示,沟槽越深,转换层有效厚度越大,发生核反应概率越高。同时增加的材料填充量与接触面积将进一步提高探测效率。沟槽的深度受到实际工艺的限制,随着沟槽深度的增加,刻蚀工艺难度增大,刻蚀后硅片的机械性能也会受到影响<sup>[10]</sup>。参考国外商业化MSND芯片以及国内吴建团队蒙特卡罗仿真基准,本研究选定480  $\mu\text{m}$ 作为沟槽深度,保证了仿真模型的可复现性,更为不同沟槽参数、填充密度下的对比研究提供了统一的参照体系。

沟槽的宽度影响了中子转换材料的填充量以及次级粒子进入半导体的概率。沟槽越宽,可填充的中子转换材料越多,中子与填充材料反应的几率也随之增加。然而,随着沟槽宽度的增大,次级粒子与转换材料的相互作用可能导致自吸收效应的出现,产生的次级粒子无法穿透转换材料到达半导体表面,导致无法产生信号,从而降低探测效率。

沟槽的间距决定了探测硅半导体的灵敏体积,影响次级粒子在半导体中的能量沉积过程。理论上,沟槽间距越宽,越有利于次级粒子能量在半导体上沉积,然而实际中,MSND上的探测单元有限,沟槽间距的增加会降低沟槽数目,使中子转换材料填充量减少。而沟槽间距越小,沟槽数目越多,可填充材料越多,探测效率越高,但过小的沟槽间距会影响结构的机械性能,增加沟槽刻蚀难度。

因此,沟槽结构参数的优化设计是提升微结构半导体中子探测器性能的关键步骤。本文结合了中子在 ${}^6\text{LiF}$ 中的平均自由程以及 ${}^6\text{LiF}$ 作为中子转换材料时产生的次级粒子的射程,对不同沟槽结构参数进行了模拟仿真计算,旨在找到一个实际可生产的优化解,为后续半导体中子探测器芯片的制作提供数据支持。

## 2 蒙特卡罗模拟简介

### 2.1 次级带电粒子射程

SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter)软件可以模拟带电粒子与介质的相互作用,通过模拟

跟踪入射粒子在材料中的运动,可以得到材料中次级带电粒子的能量沉积、射程、位移损伤等宏观统计量。

利用SRIM软件模拟计算得到 ${}^6\text{Li}(\text{n}, \alpha){}^3\text{H}$ 核反应中产生的 $\alpha$ 粒子和T粒子在不同密度的 ${}^6\text{LiF}$ 介质中的射程。由图3可知,2.05 MeV的 $\alpha$ 粒子和2.73 MeV的T粒子在硅中的射程分别是7.49  $\mu\text{m}$ 和42.93  $\mu\text{m}$ 。同时还研究了不同 ${}^6\text{LiF}$ 填充密度对热中子平均自由程的影响,结果表明,当 ${}^6\text{LiF}$ 填充深度为480  $\mu\text{m}$ 时,该厚度的 ${}^6\text{LiF}$ 层在所研究的密度范围内能有效阻止热中子,从而保障了探测器对热中子的俘获能力。

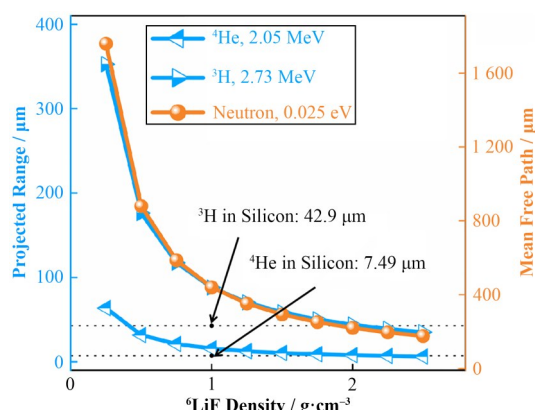


图3 不同密度 ${}^6\text{LiF}$ 下, $\alpha$ 粒子、T粒子的射程以及中子的平均自由程(彩图见网络版)

Fig.3 Projected range of  ${}^4\text{He}$  and  ${}^3\text{H}$  and mean free path of neutron in different densities of  ${}^6\text{LiF}$  (color online)

### 2.2 中子场及粒子模拟

本文采用Geant4蒙特卡罗软件对中子与探测器相互作用过程进行详细的建模仿真。在Geant4模拟中,模拟设置能量为0.025 3 eV的热中子面源垂直入射至MSND表面,并利用内置的SteppingAction类记录下了MSND中次级带电粒子沉积的能量,定义沟槽外的全部硅体为探测灵敏区,如图2中的灰色区域,当单次事件在灵敏区中沉积的能量超过预设阈值时,即判定为有效中子探测事件。模拟过程中采用QGSP\_BIC\_HP模型描述中子与物质的相互作用,同时引入标准的电磁相互作用模型计算带电粒子在硅中沉积的能量<sup>[19]</sup>。

## 3 基于蒙卡模拟的结构设计

### 3.1 次级带电粒子径迹验证

Geant4模拟输出1 000个热中子入射到 ${}^6\text{LiF}$ 填充的MSND中,得到的粒子径迹结果如图4所示,其中半透明黄色区域为硅材料,大多数热中子(绿色径

迹)直接穿透探测器,其余中子通过核反应在MSND内生成的次级带电粒子 ${}^3\text{H}$ (红色径迹)和 ${}^4\text{He}$ (黄色径迹),径迹特征清晰。次级粒子在材料中进一步输运并最终在硅体中沉积能量,其中, ${}^3\text{H}$ 粒子由于电荷少、能量高,在介质中呈现的径迹更长,而 ${}^4\text{He}$ 粒

子电荷密度高、能量低,在MSND中形成的径迹更短促密集。模拟径迹结果验证了在 ${}^6\text{LiF}$ 中产生的次级粒子能够有效进入到硅半导体中并沉积能量,从粒子运输维度上证实了MSND中填充中子转换材料实现中子探测的可行性。

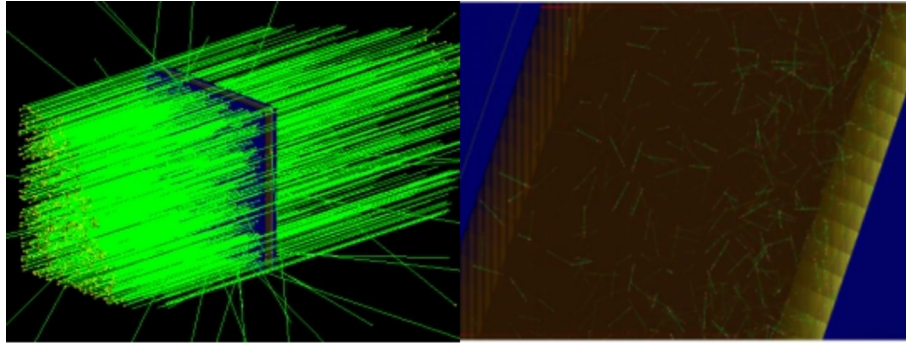


图4 微结构中子探测器中产生的次级带电粒子径迹(彩图见网络版)  
Fig.4 Tracks of secondary charged particles generated in a MSND (color online)

### 3.2 填充密度与沟槽宽度对热中子本征探测效率的影响

填充密度和沟槽宽度是影响MSND热中子本征探测效率的关键因素。探测器的热中子本征探测效率( $\varepsilon$ )定义如式(2),其中: $N_D$ 表示次级粒子在灵敏区中沉积能量、产生可探测信号的中子事例总数; $N_0$ 表示垂直入射到MSND整体上表面的中子事例总数。

$$\varepsilon = N_D / N_0 \quad (2)$$

为研究填充密度和沟槽宽度对本征探测效率的影响,在综合考虑热中子在 ${}^6\text{LiF}$ 中的平均自由程及实际刻蚀工艺限制后,本研究将沟槽深度固定为 $480\text{ }\mu\text{m}$ 。根据前文的计算,此深度足以覆盖热中子在 ${}^6\text{LiF}$ 密度等于或高于 $1.27\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时的平均自由程,从而确保对热中子的有效俘获。在实际探测过程中,为有效甄别源自中子核反应的次级带电粒子信号,并抑制探测器电子学噪声及 $\gamma$ 射线等干扰,需设置一个能量阈值,只有当沉积能量高于此阈值的信号事件,才被判定为有效中子探测事件。根据典型MSND商业芯片使用手册,采用 $200\text{ keV}$ 的能量阈值。

将初始沟槽间距、中子探测的能量阈值分别设置为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $200\text{ keV}$ ,通过改变沟槽宽度和填充密度,得到以上参数对MSND热中子本征探测效率的影响。

在相同填充密度下,沟槽宽度增加导致填充介质的总体积增加,从而增加了中子发生核反应的几率。同时,沟槽宽度的增加也会导致次级粒子在输

运过程中的自吸收效应增加。两个机制相互竞争,最终导致热中子本征探测效率呈现先增后减的非线性趋势,如图5所示。

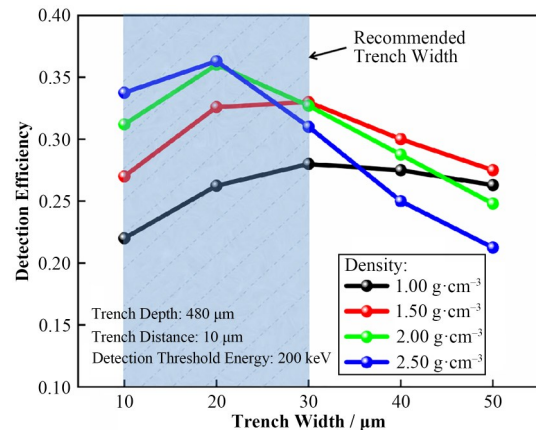


图5 不同填充密度与沟槽宽度对热中子本征探测效率的影响(彩图见网络版)

Fig.5 Effect of different filling densities and groove widths on the intrinsic detection efficiency of thermal neutrons (color online)

当沟槽宽度较小时,增加 ${}^6\text{LiF}$ 填充密度对提升本征探测效率起主导作用,因此探测效率与填充密度呈正相关。然而,随着沟槽宽度的增大,填充密度增加所带来的自吸收效应变得更为显著,具体表现为:高填充密度结构的探测效率随沟槽宽度增加而下降的速率比低填充密度结构更快。鉴于宽沟槽在工艺实现上的优势,实际设计中常需采用较低密度形式进行中子转换材料填充。由图5也可看出,对于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 沟槽间距及低填充密度的结构,其探测效率在 $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 沟槽宽度范围内随宽度增加而提升。

### 3.3 探测单元结构对MSND探测中子效率的影响

沟槽宽度和沟槽间距共同组成了探测单元。在同一个尺寸的MSND中,探测单元数目是有限的,因此沟槽宽度和沟槽间距共同决定了MSND各探测单元的中子灵敏面积(与转换材料的接触面积)。为了便于研究沟槽宽度和沟槽间距对探测效率的影响,本小节设定沟槽深度和探测器能量阈值分别为 $480\text{ }\mu\text{m}$ 、 $200\text{ keV}$ 。

图6(a)展示了 ${}^6\text{LiF}$ 完全填充(密度 $\rho = 2.54\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )时探测效率的变化情况。当沟槽间距固定时,探测效率随着沟槽宽度增加呈现先增后减的趋势,这是因为在完全填充条件下,较宽的沟槽可容纳更多的中子转换材料,从而增大了中子俘获概率,有利于效率提升;然而,当宽度过大时,显著增强的自吸收效应会导致大部分次级带电粒子在 ${}^6\text{LiF}$ 材料内部被吸收而无法进入硅灵敏体积,反而造成探测效率下降。当沟槽宽度固定时,探测效率随着沟槽

间距的减小呈上升趋势。这归因于更小的间距提高了沟槽单元数量,从而增大了有效的中子转换材料填充总量及与硅的接触面积,提高了中子俘获概率。但需注意,间距过小可能会影响次级粒子在硅中的能量沉积过程,需在优化中予以考虑。

图6(b)展示了 ${}^6\text{LiF}$ 半填充( $\rho = 1.27\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )时的探测效率变化情况。与完全填充情况相比,半填充因材料总量减少,其总体探测效率较低。在4种沟槽间距下,探测效率均随沟槽宽度增加而单调上升。这是由于在半填充条件下,沟槽宽度增加主要提升了有效中子反应体积,其对效率的正向贡献,超过了因材料增多而略有增强的自吸收效应所带来的负面影响。同时,与图6(a)揭示的规律一致:在固定沟槽宽度时,减小沟槽间距可有效提升探测效率。因此,在实际工艺中,在平衡材料填充均匀性与沟槽刻蚀难度后,采用较小的沟槽间距是获取更高探测效率的有效途径。

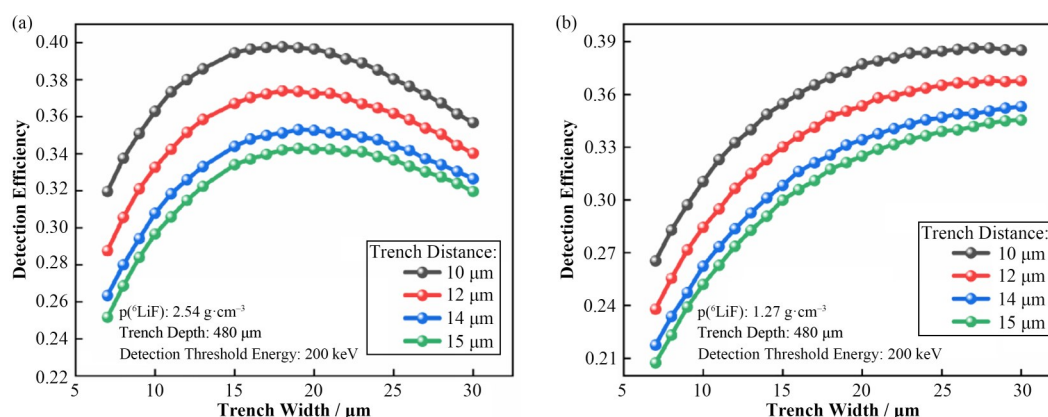


图6 探测效率随沟槽宽度、沟槽间距变化曲线(彩图见网络版) (a) 完全填充密度, (b) 半填充密度  
Fig.6 Curve of the detection efficiency with different trench width and trench distance (color online)  
(a) Fully filling density, (b) Half filling density

### 3.4 探测单元结构对能谱响应的影响

热中子与 ${}^6\text{LiF}$ 发生核反应,次级粒子穿过转换材料进入到硅材料中产生电离激发并在外电场作用下产生可探测电信号,该信号的幅度直接取决于次级粒子在灵敏区沉积的能量,而此能量沉积过程则受到填充材料密度与微结构几何参数的共同影响。

由前文分析可知,为实现30%以上的理论热中子本征探测效率,并兼顾硅片刻蚀工艺与中子转换材料填充的便利性,较小的沟槽宽度更具优势。结合图5和图6的模拟结果,初步将沟槽宽度与间距的优化范围分别设定为 $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 。为深入研究结构参数的影响,首先固定 ${}^6\text{LiF}$ 填充密度为 $1.27\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,并设定沟槽单元宽度 $30\text{ }\mu\text{m}$ ,在此条件下,改变沟槽宽度和沟槽间距,研究其对半导体探测

器能量响应和探测效率的影响规律。相应的模拟结果如图7(a-i)所示。

如图7(b)所示,在沟槽间距较大时,探测效率较低,且能量响应谱集中堆积在 $4.78\text{ MeV}$ 峰位,这是由于沟槽间距大,硅半导体区域足够宽,允许两种次级粒子的能量在其中完全沉积,从而形成单一的高能峰;但同时,这也导致中子转换材料填充过少,中子俘获概率下降,因此整体探测效率不高。随着沟槽间距的减小,探测效率逐渐提升,此时能谱中开始出现分离的能峰特征,首先是 $2.73\text{ MeV}$ 的峰逐渐显现。当沟槽宽度与沟槽间距之比接近 $1:1$ 时,能量响应谱得到显著优化,不仅在 $2.05\text{ MeV}$ 处出现了清晰的独立能峰,而且 $2.73\text{ MeV}$ 处的峰形也更为明确。在此比例下,探测器既能获得较好的能量分辨能力,又能使热中子探测效率达到30%以上。

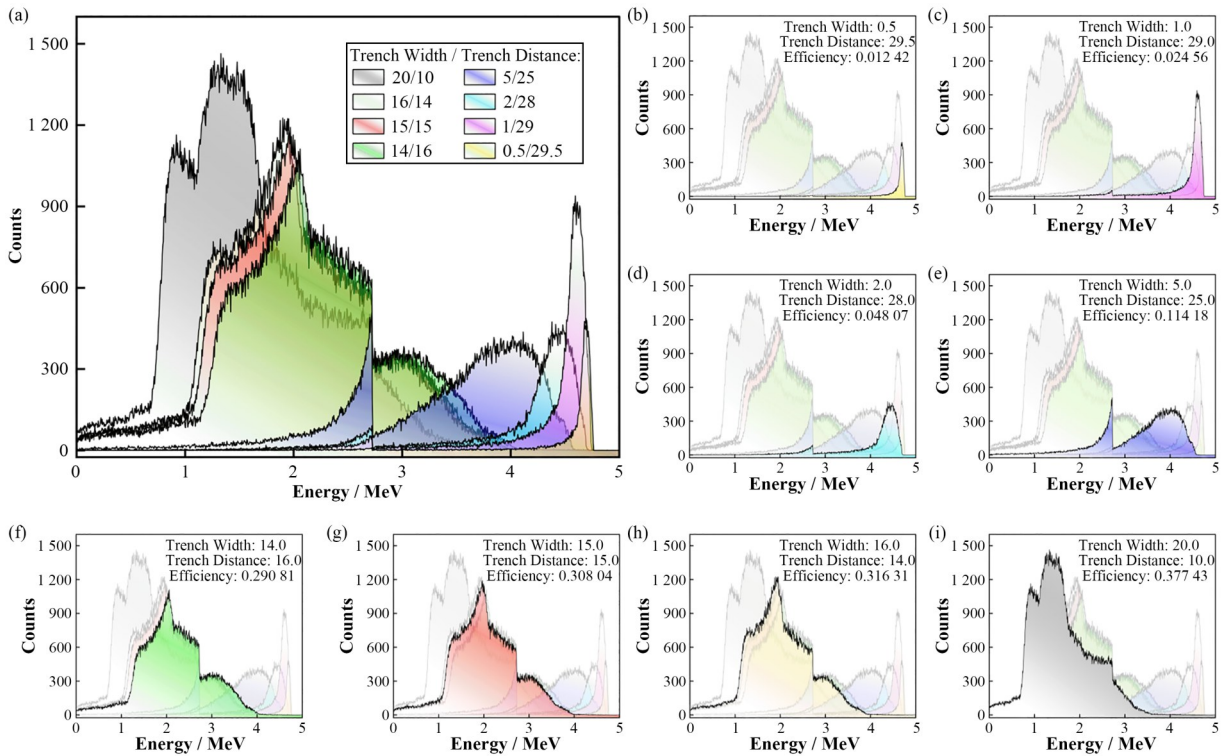


图7 不同沟槽结构参数(沟槽宽度/沟槽间距)对探测器探测效率及能量响应的影响(彩图见网络版)

(a) 不同参数的模拟结果总览, (b)  $0.5\ \mu\text{m}/29.5\ \mu\text{m}$ , (c)  $1\ \mu\text{m}/29\ \mu\text{m}$ , (d)  $2\ \mu\text{m}/28\ \mu\text{m}$ , (e)  $5\ \mu\text{m}/25\ \mu\text{m}$ , (f)  $14\ \mu\text{m}/16\ \mu\text{m}$ , (g)  $15\ \mu\text{m}/15\ \mu\text{m}$ , (h)  $16\ \mu\text{m}/14\ \mu\text{m}$ , (i)  $20\ \mu\text{m}/10\ \mu\text{m}$

Fig.7 Effect of different trench structural parameters (trench width/trench distance) on the MSND detection efficiency and energy response of MSND (color online) (a) Overview of simulation results under different parameters, (b)  $0.5\ \mu\text{m}/29.5\ \mu\text{m}$ , (c)  $1\ \mu\text{m}/29\ \mu\text{m}$ , (d)  $2\ \mu\text{m}/28\ \mu\text{m}$ , (e)  $5\ \mu\text{m}/25\ \mu\text{m}$ , (f)  $14\ \mu\text{m}/16\ \mu\text{m}$ , (g)  $15\ \mu\text{m}/15\ \mu\text{m}$ , (h)  $16\ \mu\text{m}/14\ \mu\text{m}$ , (i)  $20\ \mu\text{m}/10\ \mu\text{m}$

为研究沟槽单元结构对性能的影响,本研究设定了三个不同的沟槽单元宽度,分别为  $25\ \mu\text{m}$ 、 $35\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$ 。对于每个固定的重复周期,改变沟槽宽度与沟槽间距的比例(即改变沟槽宽度,间距随之变化),以探究不同结构参数对 MSND 探测效率的影响。从图8的模拟结果可以看出,在相同沟槽单元宽度下,随着沟槽宽度的增加,探测效率呈现上

升趋势,在  $25\ \mu\text{m}$ 、 $35\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$  的单元宽度中,选取探测效率大于30%的结构进行分析,发现其能谱分辨率( $2.05\ \text{MeV}$  与  $2.73\ \text{MeV}$  双峰的分离度)均弱于  $30\ \mu\text{m}$  单元宽度时的最优结构。综合来看,随着沟槽宽度在探测单元中所占比例的增大,探测效率因中子转换材料填充量的增加而提升;但与此同时,双峰的能谱分辨效果会逐渐下降。

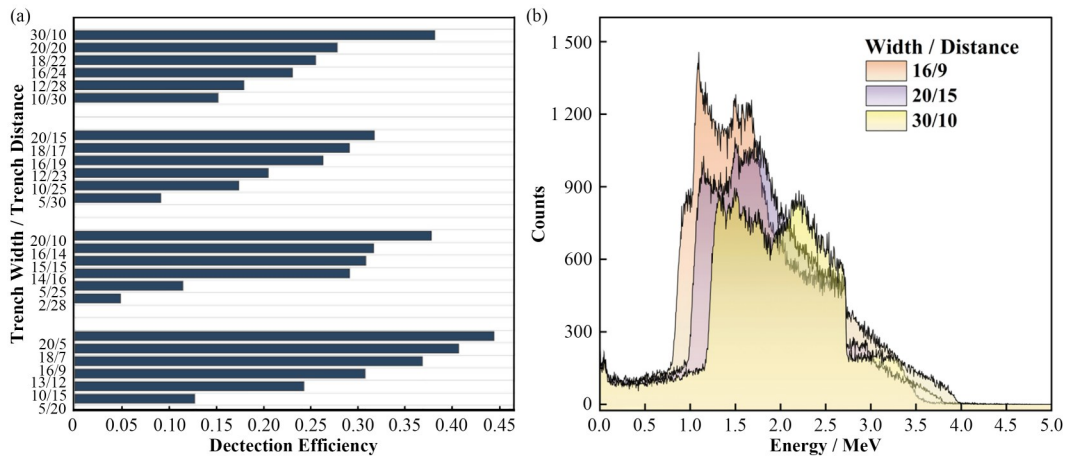


图8 (a)  $25\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $35\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$  下沟槽单元宽度对探测器探测效率及能量响应的影响, (b)  $16\ \mu\text{m}/9\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}/15\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}/10\ \mu\text{m}$  结构下能谱对比(彩图见网络版)

Fig.8 (a) The effect of detection cell width on the detection efficiency and energy response of the detector at  $25\ \mu\text{m}$ ,  $30\ \mu\text{m}$ ,  $35\ \mu\text{m}$  and  $40\ \mu\text{m}$ , (b) Comparison of energy spectra at  $16\ \mu\text{m}/9\ \mu\text{m}$ ,  $20\ \mu\text{m}/15\ \mu\text{m}$ , and  $30\ \mu\text{m}/10\ \mu\text{m}$  structure (color online)

综上所述,当探测单元的重复周期(沟槽单元宽度)固定时,沟槽宽度所占比例越小,则硅半导体灵敏区体积越大,越有利于次级粒子能量的充分沉积,从而获得更好的能谱分辨率;反之,沟槽宽度比例越大,则可填充的中子转换材料越多,有效灵敏面积也越大,从而带来更高的热中子探测效率。具体到本文模拟,在30  $\mu\text{m}$ 的单元重复周期下,当沟槽宽度大于14  $\mu\text{m}$ 时,探测器的热中子探测效率可达到30%以上。

### 3.5 优化设计下 MSND 的能量阈值设置与 $n/\gamma$ 甄别比

基于§3.4的优化结果,沟槽单元为30  $\mu\text{m}$ 、沟槽宽度大于14  $\mu\text{m}$ 时,已能保证热中子本征探测效率高于30%。在此基础上,进一步研究能量阈值对探测性能的影响。固定 $^6\text{LiF}$ 填充密度、沟槽深度、沟槽探测单元宽度为1.27  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、480  $\mu\text{m}$ 和30  $\mu\text{m}$ ,研究在沟槽宽度14  $\mu\text{m}$ 以上时,能量阈值变化对探测效率的影响。由图9可知,随着探测能量阈值的提高,沟槽间距较小的结构其探测效率会急剧下降。这是因为较小的间距限制了硅灵敏区的体积,导致高能次级粒子的能量无法在其中充分沉积,从而更容易被提高的阈值所甄别掉。图9也表明,在1.27  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 填充密度下,沟槽宽度和沟槽间距分别为16  $\mu\text{m}$ 和14  $\mu\text{m}$ 时,探测器拥有较平稳的能量阈值-探测效率曲线,这意味着该结构对阈值设置的变化不敏感,有利于提高探测器在实际应用中的读数稳定性。

半导体探测器相较于传统的气体探测器,其 $n/\gamma$ 甄别能力更强,定义MSND的中子- $\gamma$ 甄别比 $\delta_{n/\gamma}$ 为式(3)所示,式中 $\varepsilon_{n(E_n)}$ 和 $\varepsilon_{\gamma(E_\gamma)}$ 分别为MSND对于不同能量 $E_n$ 的中子和不同能量 $E_\gamma$ 的 $\gamma$ 射线的探测效率。

$$\delta_{n/\gamma} = \varepsilon_{n(E_n)} / \varepsilon_{\gamma(E_\gamma)} \quad (3)$$

在上述的优化结构下,将 $^6\text{LiF}$ 的填充密度、沟槽深度、沟槽宽度和沟槽间距分别设置为1.27  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、480  $\mu\text{m}$ 、16  $\mu\text{m}$ 和14  $\mu\text{m}$ ,改变蒙特卡罗程序中的模型,模拟 $^{137}\text{Cs}$ 源的662 keV的 $\gamma$ 射线对MSND的响应,结果显示该优化物理设计的 $n/\gamma$ 甄别比随能量阈值提升而显著提高:在能量阈值分别为100 keV、200 keV、300 keV和400 keV时,对应的甄别比 $\delta_{n/\gamma}$ 分别为67.7、 $1.6\times 10^2$ 、 $6.4\times 10^2$ 和 $7.6\times 10^3$ 。尤其在400 keV阈值下,MSND的 $n/\gamma$ 甄别比可达 $7.6\times 10^3$ ,同时其热中子探测效率为31.3%,综合性能表现突出。

## 4 结语

微结构半导体中子探测器在全球范围内已被证实是一种可行、可靠且性能优异的中子探测器。本文利用蒙特卡罗软件建立了MSND单面沟槽的物理模型,探讨了填充密度、沟槽间距、沟槽宽度等因素对探测效率、能量响应和 $n/\gamma$ 甄别比的影响。考虑MSND完全填充 $^6\text{LiF}$ 工艺难度以及机械性能,适当降低 $^6\text{LiF}$ 的填充密度,增大沟槽间距依旧能保证探测器具有较高的热中子探测效率以及良好的热中子能量响应。根据蒙特卡罗模拟结果,当填充密度、沟槽深度、沟槽宽度、沟槽间距和能量阈值分别为1.27  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、480  $\mu\text{m}$ 、16  $\mu\text{m}$ 、14  $\mu\text{m}$ 和400 keV时,MSND的热中子本征探测效率可达到31.3%, $n/\gamma$ 甄别比可以达到 $7.6\times 10^3$ ,与传统平面型中子探测器相比,显著提升了性能,为进一步研发微结构中子探测器提供了参考,有望成为下一代中子应用领域的主流探测器。

**作者贡献声明** 张海涛完成主要研究工作,包括实验设计、Geant4模拟和论文撰写;毛楚元和廖义相负责不同微结构模型的数据输出与整合;吴正新老师和刘国卿老师提供蒙特卡罗仿真指导;颜强老师提出研究思路,制定研究计划和修订论文。

## 参考文献

- 1 Pietropaolo A. The physical mechanisms of neutron detection[J]. Contemporary Physics, 2023, 64(3): 194 - 223. DOI: 10.1080/00107514.2024.2314817.
- 2 Fronk R G, Bellinger S L, Henson L C, et al. High-efficiency microstructured semiconductor neutron detectors for direct  $^3\text{He}$  replacement[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated

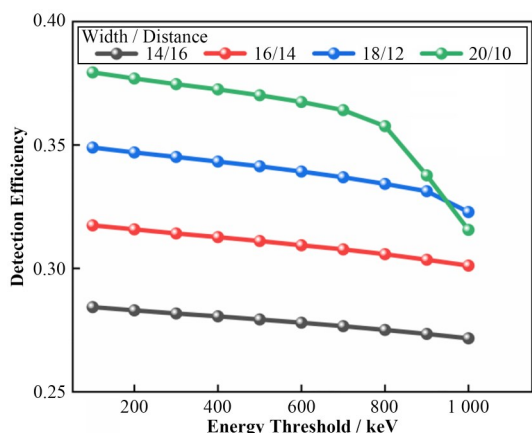


图9 探测能量阈值对不同沟槽宽度和沟槽间距的探测器探测效率(彩图见网络版)

Fig.9 Effect of energy threshold on MSND detection efficiency with different trench widths and distances (color online)

- Equipment, 2015, **779**: 25 - 32. DOI: 10.1016/j.nima.2015.01.041.
- 3 Dian E, Kanaki K, Ehlers G, *et al.* Scattered neutron background in thermal neutron detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **902**: 173 - 183. DOI: 10.1016/j.nima.2018.04.055.
- 4 Sellin P J, Vaitkus J. New materials for radiation hard semiconductor detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, **557**(2): 479 - 489. DOI: 10.1016/j.nima.2005.10.128.
- 5 Hutchins R M, Watson D L P, Nichols D M, *et al.* Survivability of microstructure semiconductor neutron detectors (MSND) in a thermal neutron radiation environment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1057**: 168721. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168721.
- 6 McGregor D S, Bellinger S L, Shultis J K. Present status of microstructured semiconductor neutron detectors[J]. Journal of Crystal Growth, 2013, **379**: 99 - 110. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.10.061.
- 7 McGregor D S, Hammig M D, Yang Y H, *et al.* Design considerations for thin film coated semiconductor thermal neutron detectors: I: basics regarding alpha particle emitting neutron reactive films[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **500**(1 - 3): 272 - 308. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)02078-8.
- 8 Muminov R A, Tsvang L D. High-efficiency semiconductor thermal-neutron detectors[J]. Soviet Atomic Energy, 1987, **62**(4): 316 - 319. DOI: 10.1007/BF01123372.
- 9 Zhang L L, Wang Y, Guo H M, *et al.* Improving detection efficiency of silicon carbide neutron detector using double trench[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, **23**(5): 4302 - 4310. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3238164.
- 10 McGregor D S, Bellinger S L, Fronk R G, *et al.* Development of compact high efficiency microstructured semiconductor neutron detectors[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, **116**: 32 - 37. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2015.05.025.
- 11 Fronk R G, Bellinger S L, Henson L C, *et al.* Dual-sided microstructured semiconductor neutron detectors (DSMSNDs) [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **804**: 201 - 206. DOI: 10.1016/j.nima.2015.09.040.
- 12 Deng C, Hu Q, Li P C, *et al.* Research on a neutron detector with a boron-lined multilayer converter[J]. Applied Sciences, 2024, **14**(10): 4269. DOI: 10.3390/app14104269.
- 13 Alsulimane A M E, Taylor B J, Barajas C C, *et al.* Development of a silicon-based thermal neutron detection system[J]. Journal of Instrumentation, 2024, **19**(5): P05025. DOI: 10.1088/1748-0221/19/05/p05025.
- 14 吴健, 甘雷, 蒋勇, 等. 沟槽型硅微结构中子探测器的蒙特卡罗模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(8): 210 - 215.  
WU Jian, GAN Lei, JIANG Yong, *et al.* Monte Carlo simulations of microstructured semiconductor neutron detectors with trench patterns[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, **27**(8): 210 - 215.
- 15 于保宁. 硅基微结构半导体中子探测器的工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.  
YU Baoning. Study on the process of silicon microstructure semiconductor neutron detectors[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- 16 赖兴阳. GaN基微结构中子探测器制备与性能研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2024.  
LAI Xingyang. Research on preparation and performance of GaN based microstructures neutron detector[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2024.
- 17 Kwon J, Han Y S, Park S Y, *et al.* Uniformity of neutron absorber distribution in Gd-containing neutron absorber materials[J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, **198**: 110288. DOI: 10.1016/j.anucene.2023.110288.
- 18 Tingsuwatit A, Maity A, Grenadier S J, *et al.* Boron nitride neutron detector with the ability for detecting both thermal and fast neutrons[J]. Applied Physics Letters, 2022, **120**(23): 232103. DOI: 10.1063/5.0093591.
- 19 Smolyar V P, Tarasov V A, Mileva A O, *et al.* Geant4 simulation of the moderating neutrons spectrum[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, **212**: 111151. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111151.