4H-SiC探测器对D-T聚变中子响应的实验研究

汪 屹[1,2] 钟国强[2,4] 许明远[3,4] 张宇博[3,4] 洪翔宇[1,2] 李子昂[1,2] 朱其威[1,2]
杨亚军[1,4] 何锦妙[1,4] 马凯迪[3,4] 潘贝贝[3,4] 廖龙勇[5,6] 小川国大[5,6]
磯部光孝[5,6,7] Siriyaporn Sangaroon[7]

1（安徽理工大学 淮南 232001）
2（合肥综合性国家科学中心能源研究院 合肥 230001）
3（中国科学技术大学 合肥 230026）
4（中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031）
5（核融合科学研究所 日本岐阜 529-5292）
6（综合研究大学院大学 日本神奈川 240-0193）
7（玛哈沙拉堪大学 泰国 44150）

摘要 本文围绕4H-SiC探测器在D-T聚变快中子场中的响应特性开展实验与数值模拟研究。实验在日本AIST加速器D-T中子源（14.80 MeV）条件下展开，探测器在测试前采用α粒子源完成能量刻度。基于Geant4的蒙特卡罗模拟结果表明，能谱中的主特征峰由^{12}C（n，α）^{9}Be反应贡献，次要峰来自^{28}Si（n，α）^{25}Mg反应。为提高模拟与实验测量谱形的可比性，在模拟结果中引入高斯能量展宽，并采用最小二乘法对能量刻度进行修正；修正后的模拟能谱在主特征峰附近与实验测量结果一致。进一步结合实验测量的能峰计数与核反应贡献，反演得到平均中子注量率为1.4×10^{4} n·cm^{-2}·s^{-1}，与加速器标准探测器监测值2.2×10^{4} n·cm^{-2}·s^{-1}接近。研究结果验证了4H-SiC探测器用于D-T快中子测量的可行性，并为聚变中子注量及活化诊断参数的定量评估提供参考。

关键词 碳化硅探测器，聚变中子，Geant4，中子测量
中图分类号 TL99
DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.260014
CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.260014

Experimental study on the response of a 4H-SiC detector to D-T fusion neutrons

WANG Yi[1,2] ZHONG Guoqiang[2,4] XU Mingyuan[3,4] ZHANG Yubo[3,4] HONG Xiangyu[1,2] LI Ziang[1,2]
ZHU Qiwei[1,2] YANG Yajun[1,4] HE Jinmiao[1,4] MA Kaidi[3,4] PAN Beibei[3,4] LIAO Longyong[5,6]
Kunihiro Ogawa[5,6] Mitsutaka Isobe[5,6,7] Siriyaporn Sangaroon[7]

1(*Anhui University of Science and Technology*, *Huainan 232001*, *China*)
2(*Institute of Energy*, *Hefei Comprehensive National Science Center*, *Hefei 230001*, *China*)

国家自然科学基金(No.12575224)、安徽省科技重大专项—聚变点火关键核心技术攻关(No.E35AH205B3, No.E35AH205B4)、安徽省生态环境科研项目(No.2023hb0017)资助
第一作者：汪屹，男，2001年出生，2023年毕业于中南林业科技大学，现为硕士研究生，研究领域为SiC快中子响应研究
通信作者：钟国强，E-mail：gqzhong@ipp.ac.cn
收稿日期：2026-01-09，修回日期：2026-04-08
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12575224), the Anhui Provincial Major Science and Technology Project (No. E35AH205B3, No.E35AH205B4), and the Anhui Province Ecological Environment Research Project (No.2023hb0017)
First author: WANG Yi, male, born in 2001, graduated from Central South University of Forestry and Technology in 2023, master student, focusing on fast neutron response of SiC
Corresponding author: ZHONG Guoqiang, E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn
Received date: 2026-01-09, revised date: 2026-04-08

3(*University of Science and Technology of China*, *Hefei 230026*, *China*)

4(*Institute of Plasma Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Hefei 230031*, *China*)

5(*National Institute for Fusion Science*, *Gifu 509-5292*, *Japan*)

6(*The Graduate University for Advanced Studies*, *SOKENDAI*, *Kanagawa 240-0193*, *Japan*)

7(*Mahasarakham University*, *Maha Sarakham 44150*, *Thailand*)

Abstract **[Background]** Silicon carbide (4H-SiC) detectors have attracted increasing attention for fast-neutron measurements in fusion environments due to their radiation hardness, high-temperature stability and wide bandgap properties; however, their response characteristics under D-T fusion neutron irradiation require further experimental validation. **[Purpose]** This study aims to experimentally and numerically investigate the response of a 4H-SiC detector in a D-T fusion fast-neutron field and to assess its feasibility for quantitative fast-neutron fluence measurements. **[Methods]** Experiments were conducted at the accelerator-based D-T neutron source (14.80 MeV) of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan. The detector was energy-calibrated using an α-particle source (^{241}Am-^{244}Cm-^{237}Np) prior to irradiation. Based on the experimental setup, Monte Carlo simulations based on Geant4 were performed to analyze the neutron-induced reaction contributions to the measured energy spectrum. Gaussian energy broadening was applied to the simulated spectra, and the energy calibration was refined using a least-squares fitting procedure to improve agreement with experimental results. **[Results]** The simulation results indicate that the dominant spectral features arise primarily from the ^{12}C(n, α)^{9}Be reaction, while secondary peaks are mainly associated with the ^{28}Si(n, α)^{25}Mg reaction. After applying energy broadening and calibration correction, the simulated energy spectrum shows good agreement with the measured spectrum near the main characteristic peaks. The average neutron fluence rate is inferred by combining the measured peak counts with the reaction contributions to be 1.4×10^{4} n·cm^{-2}·s^{-1}, which is close to the value of 2.2×10^{4} n·cm^{-2}·s^{-1} monitored by the accelerator's standard detector. **[Conclusions]** The results of this study confirm the feasibility of using 4H-SiC detectors for D-T fast-neutron measurements, providing a reference for the quantitative evaluation of neutron fluence and activation-related diagnostic parameters in fusion neutron fields.

Key words Silicon carbide, Fusion neutron, Geant4, Neutron measurement

中子诊断在聚变能实验研究中具有至关重要的作用。聚变反应产生的快中子携带着有关等离子体参数的重要信息，例如燃料离子温度、燃料离子浓度比、等离子体旋转特征等[1-2]。因此，准确获取中子能谱与中子注量是认识聚变等离子体物理过程的关键手段之一。在聚变环境中，快中子探测器的核心目标是对所在位置的中子场参数进行精确测量[3]。随着聚变装置向更高通量、诊断系统小型化、更高辐照强度方向发展，开发结构紧凑、抗辐照能力强、性能稳定的快中子探测器显得尤为重要[4]。

在众多候选探测材料中，碳化硅（4H-SiC）因其高温稳定性[5-7]、优异的辐射耐受能力[8-9]以及成熟的器件制备技术[10]被认为是一种极具潜力的快中子探测材料。金刚石[11]是另一种广泛使用的宽带隙探测器材料，然而碳化硅在器件制备与工程应用层面具有明显优势，包括更低的制造成本、更易实现大面积器件制造以及更易获得高质量商用晶圆，这使其成为中子探测应用中的竞争性选择。碳化硅还被认为非常适合测量热等离子体参数，如离子温度。在存在严格尺寸限制的环境中（例如中子相机系统），基于碳化硅的探测器可作为紧凑且有效的诊断组件[12]。

由于中子本身不带电荷，不能直接产生电离信号，因此通常需要利用中子与材料发生的散射或核反应过程实现间接探测。对于热中子的探测，通常需要引入硼和锂等转化反应材料[13-15]，其转化反应如^{6}Li(n,α)T和^{10}B(n,α)^{7}Li在热中子能区具有很高的反应截面；而对于快中子[16-17]，则主要通过与轻核的弹性散射，或者过阈值的核反应来实现能量转换。

4H-SiC探测器晶体由轻核C与Si组成，可通过弹性散射或阈值核反应直接探测快中子[18]。对于14 MeV D-T中子，主要反应通道包括^{12}C(n,α)^{9}Be、^{28}Si(n,α)^{25}Mg与^{28}Si(n,p)^{28}Al等，其中不同反应对应于能谱中不同特征能区。因而，SiC材料在无需额外转换层的情况下，即可实现对快中子的直接探测。

1 实验配置

1.1 4H-SiC 探测器系统

4H-SiC基PIN结构探测器（JW-SC10，中国成都晶威科技有限公司）具有100 mm^{2}的灵敏面积和30 μm的外延层厚度。其n型4H-SiC衬底厚度约为360 μm，n型掺杂浓度低于1×10^{14} cm^{-3}。器件正面通过离子注入形成p型掺杂层，注入深度为0.3~0.5 μm，从而构建用于带电粒子收集的PIN结结构。

欧姆电极采用Ni/Au金属化工艺制备。正面欧姆接触由0.1 μm的Ni层与1.4 μm的Au焊盘组成；背面电极为1.4 μm的Au烧结金属层，以保证器件在加偏条件下的稳定电连接。探测器封装于铜—陶瓷壳体中，可提供良好的机械强度与热传导性能；输出信号通过Axial Microdot母头连接器引出，以实现低噪声信号传输。

在信号采集方面，4H-SiC探测器输出的脉冲信号首先经电荷灵敏前置放大器（CIVIDEC Instrumentation GmbH，Cx-L）处理，随后输入至四通道、1 GHz、14位数字脉冲处理器（APV8104，TechnoAP Co.，Ltd.），其输入阻抗为50 Ω。数据采集（Data acquisition，DAQ）系统对脉冲电荷积分值及时间戳进行记录，并将数据传输至计算机进行后续分析。图1给出了4H-SiC探测器系统的框图示意。

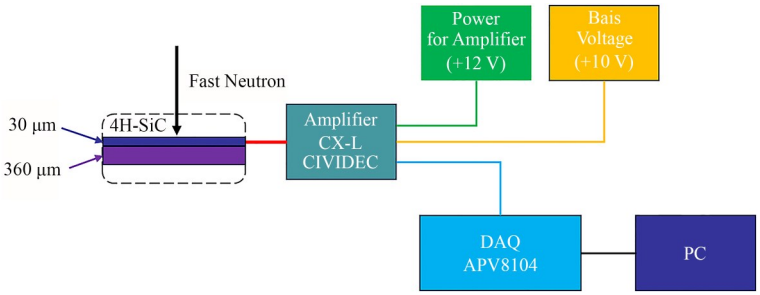


图1 4H-SiC探测器和数据采集系统示意图（彩图见网络版）
Fig.1 Schematic diagram of the 4H-SiC detector and the data acquisition system (color online)

4H-SiC半导体探测器与快中子的反应通道如表1所示。这些反应通道提供独特的脉冲高度谱，可用于将中子谱与γ背景区分开来。

^{12}C(n,α)^{9}Be、^{28}Si(n,α)^{25}Mg和^{28}Si(n,p)^{28}Al反应截面取自ENDF/B-VII[19]数据库（300 K），如图2所示。当快中子能量高于3 MeV时，^{28}Si(n,α)^{25}Mg和^{28}Si(n,p)^{28}Al的反应截面逐渐增大，当快中子能量高于6 MeV时，^{12}C(n,α)^{9}Be的反应截面增大。在5 MeV以上能量区间，Si的相关反应可以生成相对明显的能量峰，在7~20 MeV的中子能量范围内，C和Si的反应截面相对较高，因此适合探测D-T反应产生的快中子。

表1 碳化硅中快速中子诱发反应
Table 1 Fast neutron-induced reactions in silicon carbide

反应道 Reaction	Q 值 Q value / MeV	反应阈值 Energy threshold / MeV
^{12}C(n,n')^{12}C^{2+}	−4.439	4.809
^{12}C(n,α)^{9}Be	−5.701	6.420
^{12}C(n,n')3α	−7.367	8.429
^{12}C(n,p)^{12}B	−12.587	13.740 1
^{28}Si(n,n')^{28}Si^{2+}	−1.779	1.843
^{28}Si(n,α)^{25}Mg	−2.654	2.765
^{28}Si(n,p)^{28}Al	−3.860	4.004

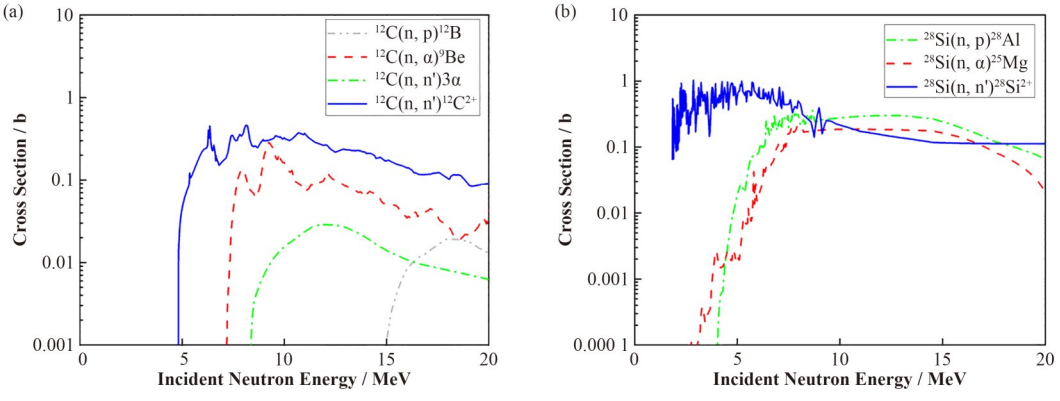


图2 探测器与快中子反应的激发函数图（彩图见网络版） (a) ^{12}C，(b) ^{28}Si
Fig.2 Excitation function diagram of detector and fast neutron reaction (color online) (a) ^{12}C, (b) ^{28}Si

在氘-氚聚变阶段(T(d,n)^{4}He),聚变中子的能量为14.80 MeV。在此能量下,^{12}C(n,α)^{9}Be的反应截面约为53 mb,^{28}Si(n,α)^{25}Mg和^{28}Si(n,p)^{28}Al的反应截面分别约为167 mb和251 mb。4H-SiC半导体可用于探测D-T聚变产生的快中子。

1.2 4H-SiC 能量刻度

使用日本国家核聚变科学研究所(National Institute for Fusion Science, NIFS)的^{241}Am-^{244}Cm-^{237}Np α粒子源对4H-SiC探测器进行了能量刻度。该源发射的α粒子能量为:^{241}Am 5.486 MeV、^{244}Cm 5.805 MeV、^{237}Np 4.789 MeV。为了最大限度地减少空气散射造成的能量损失,4H-SiC探测器和α粒子源放置在真空室中,彼此距离约为5 mm,真空室压力保持在0.1~1 Pa。

图3(a)为脉冲电荷积分谱,其中纵轴y为计数,横轴x为脉冲电荷积分。三个α粒子峰^{237}Np、^{244}Cm和^{241}Am的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)分别为183 keV、152 keV和133 keV。图3(b)为脉冲电荷积分与能量的线性拟合图,采用最小二乘拟合方法建立脉冲能量与电荷积分的线性关系,得到y=(135.135 1±1.103)x+(−88.740 1±5.26),拟合误差R^2=0.999 9,其中纵轴y为脉冲电荷积分对应的能量,横轴x为α粒子能量。

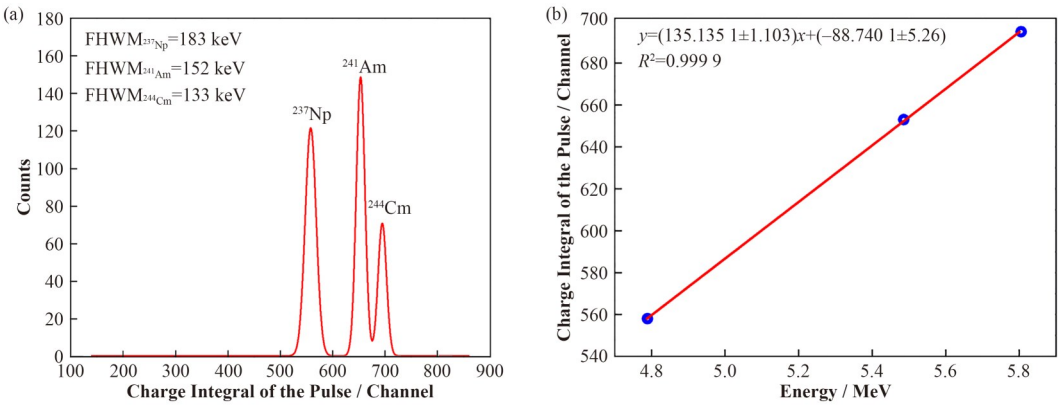


图3 4H-SiC探测器的能量刻度 (a) ADC上采集的光谱,(b) 线性拟合
Fig.3 Energy calibration for 4H-SiC detector (a) Spectra acquired on ADC, (b) Linear fitting

1.3 单能中子实验

本研究的14.80 MeV单能快中子辐照实验在日本国家先进工业科学与技术研究所(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)的D-T倍加器中子源平台完成。该平台采用氘离子束轰击吸附氚的金属靶产生D-T聚变中子,主要核反应为T(d,n)^{4}He。实验期间,入射d+束流能量设置为230 keV,靶材为吸氚钛(TiT_2)薄层结构,钛层厚度约500 nm,实验在室温条件下进行,真空室环境温度保持在室温范围内。由靶端产生的快中子在几何发散与材料散射作用下向外传播,在探测器布置位置形成近似单能的快中子场。根据AIST提供的源项与场点评估数据,探测器位置处中子主峰能量约为14.80 MeV,其半高宽约为0.74 MeV,其能谱分布如图5所示;在该位置的中子注量率参考值约为2.2×10^4 n·cm^{-2}·s^{-1}。

为保证测量几何条件稳定可复现,实验中将4H-SiC探测器沿束流方向固定布置,并保持探测器有效面尽可能正对中子来向,以减小入射角变化带来的有效响应差异。靶材与探测器之间的直线距离固定为25 cm,如图4所示,该距离的选择保证探测

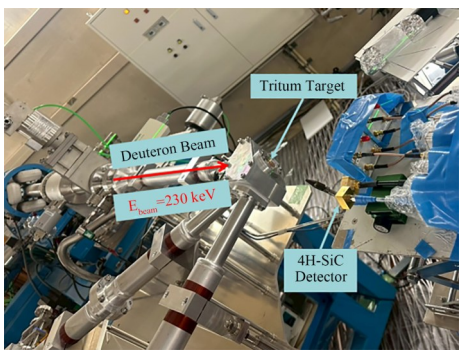


图4 AIST的D-T中子测量实验装置照片(彩图见网络版)
Fig.4 Snapshot of AIST's D-T neutron measurement experimental setup (color online)

器获得足够计数以形成可辨识的脉冲高度谱结构。实验过程中探测器安装于稳定支架上,测量前对探测器与靶端的相对位置进行对准与固定,确保长时间运行中几何参数保持不变,探测器亦在室温条件下工作,与实验环境保持一致。在数据采集上,为提高特征峰的统计显著性,并降低随机涨落对后续谱形对比与注量反演的影响,单次辐照测量持续约4 800~5 400 s。较长的采集时间使得探测器灵敏层中发生的中子诱发核反应事件数达到足够的统计

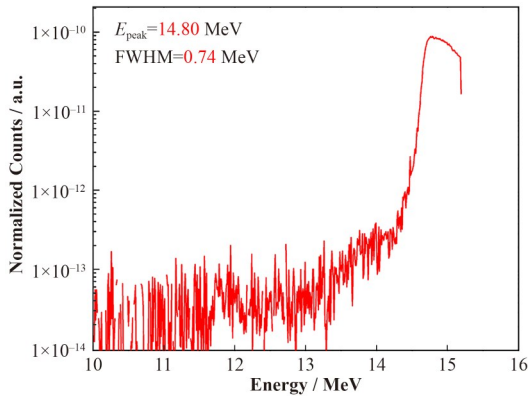


图5 4H-SiC探测器位置处的中子能谱
Fig.5 Neutron energy spectrum at the location of the 4H-SiC detector

量，从而能够进行可靠的峰积分和谱形拟合，形成稳定的脉冲高度谱计数分布。

2 Geant4模拟

本研究使用开源的Geant4（10.5.0版本）进行模拟，Geant4是由CERN RD44组开发的用于模拟粒子通过物质过程的通用工具包，广泛应用于粒子物理与核物理、加速器设计、空间工程和医学物理中。采用Geant4程序中的QGSP_BERT_HP参考物理表进行模拟，其中中子与材料的弹性散射、非弹性散射、俘获等过程主要由HP（ParticleHP/NeutronHP）处理，其能量覆盖从热中子到20 MeV[20]，截面库选用ENDF/B-VII核数据库。本次模拟运行2×10^8个14.80 MeV单能中子射入4H-SiC半导体探测器，输出其能量沉积和每个对应粒子种类的能谱，探测器和实验设置的参数与实际实验环境保持一致。

Geant4的模拟结果以“步”（step）的形式输出。每个step记录了事件编号（event）对应的二次粒子信息，包括粒子类型以及该step中各个粒子的能量沉积。能量沉积输出部分只记录能量不为0的事件。

由图6可知，4H-SiC与中子相互作用后的能量沉积主要包括散射产生的^{12}C、^{28}Si及其他反应产物。在能谱分析中，^{12}C(n,α)^{9}Be反应会同时生成α粒子和^{9}Be粒子，并伴随一定强度的γ射线与电子辐射。对于^{28}Si反应体系，(n,α)反应产生的主要粒子为α粒子和^{25}Mg粒子，同时也可观察到微弱的γ与电子信号；而(n,p)反应则以质子和^{28}Al为主要产物，同样伴有少量γ射线与电子的释放。筛选出其中主要的反应产物后，将某一粒子所属event的各step的能量沉积进行累加，并按划分的能量区间，统计粒子个数，得到图7。

由图7(b)与(c)的结果可以看出，α粒子和^{9}Be粒子在约9.1 MeV处表现出相同的能量沉积，说明

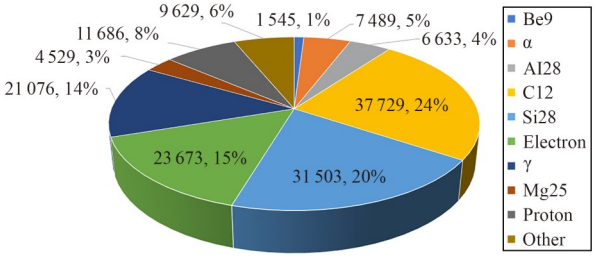


图6 4H-SiC与中子反应产生沉积能量的粒子及其占比图（彩图见网络版）
Fig.6 Pie chart of deposition energy particles generated by the reaction of 4H-SiC with neutrons and their proportion (color online)

两者属于同一物理事件。由此可推断，该能区对应的是^{12}C与中子发生(n,α)反应的产物，这也揭示了能谱中^{12}C(n,α)^{9}Be特征峰的起源。同时，从图7(g)和(h)中可以观察到，电子和γ射线的能量沉积与上述反应能区一致，说明在反应过程中除粒子生成外，还伴随电离辐射的释放。

进一步观察图7(c)和(f)，可以发现，在^{12}C(n,α)^{9}Be反应峰附近及能谱高能区，还存在部分^{28}Si(n,α)^{25}Mg和极少数的^{28}Si(n,p)^{28}Al反应的贡献。这一叠加效应导致总能谱中^{12}C(n,α)^{9}Be特征峰的能量分辨率略有展宽，其中^{12}C(n,α)^{9}Be的占比约为89.77%，^{28}Si(n,α)^{25}Mg的占比约为9.77%，^{28}Si(n,p)^{28}Al的占比约为0.46%。与此同时，图7(e)与(i)表明，^{28}Si(n,p)^{28}Al反应的能量沉积主要集中在低能区域。此外，中子与^{12}C、^{28}Si发生非弹性碰撞产生的反冲核能量沉积也主要分布在低能连续区，未在^{12}C(n,α)^{9}Be等特征峰附近形成明显峰结构。因此，在特征峰计数分析中，其贡献可以忽略不计。

3 实验结果与分析

3.1 能量展宽

在实际测量中，探测器的能量分辨率会导致入射粒子能量信号出现展宽现象，因此，实验能谱$S_{exp}(E)$与理想模拟能谱$S_{sim}(E)$之间存在一定差异。为了在模拟结果中重现这种展宽效应，引入能量相关的高斯展宽函数，FWHM可表示为：

$$\mathrm{FWHM}(E)=a+b\times\sqrt{E+c\times E^2} \tag{1}$$

式中：a、b和c为待定参数，分别对应探测器的电子噪声、统计涨落和非线性分辨率项。通过该函数可计算高斯分布的标准差：

$$\sigma(E)=\frac{\mathrm{FWHM}(E)}{2\sqrt{2\ln 2}} \tag{2}$$

随后，模拟谱中每个离散能量点E_i通过与高斯函数卷积得到展宽后的谱形：

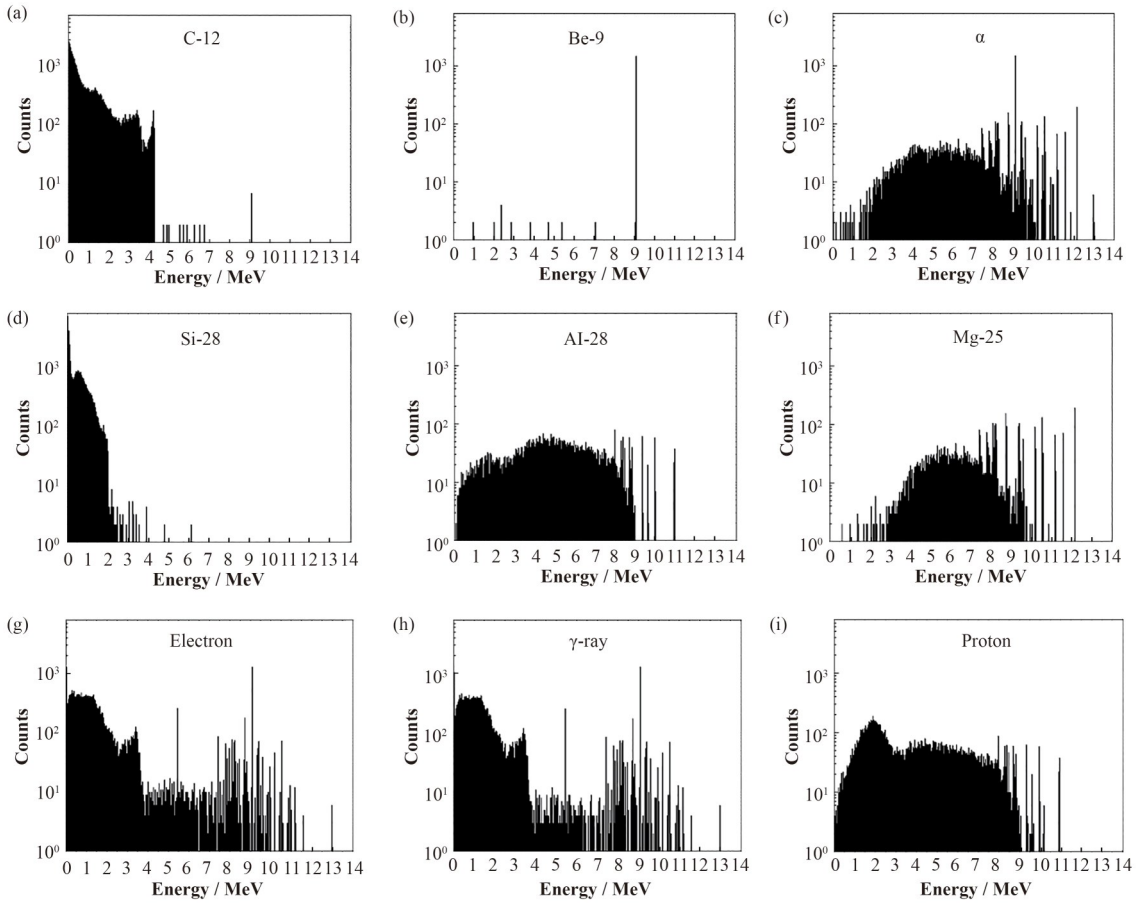


图7　不同粒子的能量沉积谱　(a) ^{12}C能量沉积，(b) ^{9}Be能量沉积，(c) α粒子能量沉积情况，(d) ^{28}Si能量沉积，(e) ^{28}Al能量沉积，(f) ^{25}Mg能量沉积，(g) 电子能量沉积，(h) γ射线能量沉积，(i) 质子能量沉积

Fig.7　Energy deposition spectra of different particles for ^{12}C (a), ^{9}Be (b), α (c), ^{28}Si (d), ^{28}Al (e), ^{25}Mg (f), electrons (g), γ rays (h) and proton (i), respectively

$$S_{\mathrm{fit}}(E)=\sum_i S_{\mathrm{sim}}(E_i)\times\exp\left[-\frac{(E-E_i)^2}{2\sigma^2(E_i)}\right] \quad (3)$$

得到的$S_{\mathrm{fit}}(E)$即为考虑了探测器能量分辨率的模拟能谱。

为了确定展宽函数中的待优参数(a,b,c)，将实验谱与展宽后模拟谱进行逐点比较，采用最小二乘法定义误差函数：

$$\chi^2(a,b,c)=\sum_i\left[S_{\mathrm{exp}}(E_i)-k\times S_{\mathrm{fit}}(E_i,a,b,c)\right]^2 \quad (4)$$

其中：k为归一化系数，用于补偿实验与模拟总计数差异。通过最小化χ^2，即可得到最优参数组合$(a,b,c,k)_{\mathrm{opt}}$，使展宽后的模拟能谱与实验能谱的差异最小。

最终目标为：

$$(a,b,c,k)_{\mathrm{opt}}=\arg\min_{a,b,c,k}\left[\chi^2(a,b,c,k)\right] \quad (5)$$

3.2　实验与模拟对比

最终得到的模拟谱和实测谱对比如图8所示，经过能量展宽的模拟谱能与实测谱中的主特征峰^{12}C(n,α)^{9}Be基本吻合。此外，实测谱中主特征峰以上的高能区检测到脉冲计数，但并未形成明显的能峰结构，主要原因有三个方面：一是高能区的能峰较弱，模拟计算显示其强度与主特征峰相比低一个数量级；二是探测器对于高能区的效率较低，^{28}Si(n,α)^{25}Mg该反应产生的α粒子能量较高，绝大部分无法在30 μm的灵敏层完全沉积，从而导致探测效率低；三是中子源强度较弱且测量时间较短，导致能谱总体计数偏低，检测到高能脉冲计数但无法形成有效的特征峰。尽管单次辐照测量时间达到4 800 s以上，但受制于较低探测效率和较弱源强，高能区检测到的脉冲事件计数仍明显不足，统计涨落过大导致高能区能谱分布存在一定的不确定性。以泊松统计估计，相对统计涨落约为$1/\sqrt{N}$：本实验主峰能窗积分计数约为400，对应相对涨落约5%；而高能拖尾能区积分计数不足30，对应相对涨落大于18%。因此，相比主特征峰区，高能区更容易受到统计涨落影响，表现为高能侧连续拖尾及次峰不清晰。

为对本文实验谱中关键特征峰的可辨识程度进行量化描述，本文将14.80 MeV单能中子照射下^{12}C(n,α)^{9}Be特征主峰的能量分辨率按R=FWHM/E_{peak}

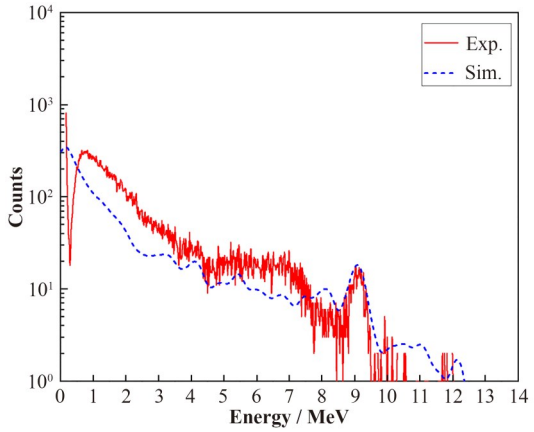


图8 实验谱与展宽后的模拟谱对比（彩图见网络版）
Fig.8 Comparison between the experimental spectrum and the broadened simulated spectrum (color online)

定义进行统一表述。文献报道显示，单晶金刚石探测器在D-T 14 MeV中子场下对^{12}C(n,α)^{9}Be特征峰通常可实现1%~3%的能量分辨率，部分工作在优化电荷收集与系统噪声后可达到更优水平[21-22]；厚敏感层SiC探测器在提高耗尽深度与电荷收集效率的条件下，也有2%~4%的能量分辨率[23-24]。相比之下，本文采用室温工作的大面积商用4H-SiC PIN器件（100 mm^{2}灵敏面积、30 μm灵敏层），受器件电容与前端电子学噪声，以及薄灵敏层导致的部分能量沉积等因素影响，^{12}C(n,α)^{9}Be主峰分辨率为3.7%~5.3%，该水平虽低于部分高性能小面积器件的报道值，但已满足本文对特征主峰稳定识别与谱形拟合的需求。需要指出的是，本文工作的重点并非追求分辨率，而是基于可工程化的SiC器件建立实验—模拟一致的响应模型，并在此基础上实现特征峰识别、谱形拟合与注量评估。

对于在灵敏层中能够实现完全能量沉积的事件（如图9(a)所示），大量带电粒子在材料内部完全停止并沉积其全部能量，从而形成可清晰观测的事件，表现为能谱中的明显特征峰。以^{12}C(n,α)^{9}Be反应为例，如图7(b)直方图所示，当沉积能量低于最大值9.1 MeV时，这类事件通常源自发生在灵敏层边缘的核反应。此时产生的带电粒子（如图9(b)所示）仅在灵敏层中传播极短距离后便逸出材料。此反应所生成的α粒子能量约分布在2.8~8 MeV。根据SRIM（Stopping and Range of Ions in Matter）[25]计算结果，这些α粒子在4H-SiC灵敏层中的能量射程范围约为7~35 μm。因此，其沉积能量取决于反应发生的位置以及粒子在材料中的行进路径。若粒子在逸出前未能完全停止，则其在探测器中记录的能量仅对应其在灵敏层内沉积的部分，而非其初始能量。由此可知，当核反应发生在灵敏层中较深位置时，带电粒子往往无法在灵敏层内完全沉积其能量，如图9(c)所示，这些事件虽然对整体能量谱仍有贡献，但不会参与形成最大能量沉积对应的特征峰。

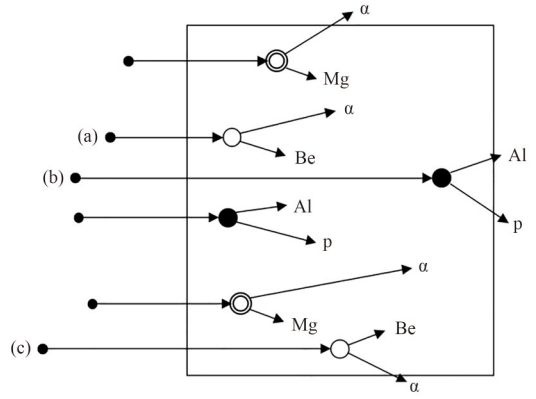


图9 带电粒子的沉积能量示意图 (a) 当所有能量沉积在灵敏层时, (b) 当粒子几乎不沉积时, (c) 当只有一部分能量沉积时
Fig.9 Schematic illustration of the energy deposition of charged particles (a) When all the energy is deposited in the sensitive layer, (b) When the particles hardly deposit any energy, (c) When just a fraction is deposited

3.3 中子注量反演方法

在本实验中，为精确估算4H-SiC探测器测得的快中子注量率，采用了基于探测器灵敏层原子数及核反应截面的计算方法，同时考虑了能谱中特征峰中不同核反应的贡献。具体而言，根据模拟计算的特征峰计数，^{12}C(n,α)^{9}Be反应和^{28}Si(n,α)^{25}Mg反应的占比分别为f_C=0.897 7和f_{Si}=0.097 7。将实验测得的总峰计数$N_{peak,exp}$按占比分配后，可得到每种反应对应的计数：

$$N_i = f_i \cdot N_{peak,exp} \tag{6}$$

考虑到并非所有核反应事件均可在灵敏层内实现“峰能量”对应的完全能量沉积，定义反应通道i（i=C,Si）的峰收集效率（亦可称“峰形成效率”）：

$$\eta_j = \frac{N_{peak,j,sim}}{N_{react,j,sim}} \tag{7}$$

式中：$N_{react,j,sim}$为模拟中在灵敏层内发生反应j的总次数；$N_{peak,j,sim}$为其中落入特征峰能窗并形成峰计数的事件数。η_j将灵敏层边缘逃逸、带电粒子射程效应、能窗选取及部分沉积等因素统一包含在内。

4H-SiC灵敏层中可参与反应的目标原子数由材料参数确定。对于化学计量比近似为1∶1的SiC，碳原子与硅原子的数目相等，均可用N_T表示：

$$N_{T,C} = N_{T,Si} = N_T \tag{8}$$

$$N_T = \frac{\rho \cdot A \cdot d \cdot N_A}{M_{SiC}} \tag{9}$$

式中：N_T为探测器灵敏层总原子数；ρ为碳化硅密度，g·cm^{-3}；A为探测器面积，cm^2；d为灵敏层厚度，

cm；M_{SiC}为碳化硅摩尔质量，g·mol^{-1}；N_A为阿伏伽德罗常数，mol^{-1}。各反应对应的中子注量率由式（10）计算：

$$\Phi_i = \frac{N_i}{t \cdot N_{T,i} \cdot \sigma_i \cdot \eta_j} \tag{10}$$

式中：反应通道i（i=C，Si）；t为测量时间；σ_C和σ_{Si}分别为^{12}C（n，α）^{9}Be反应和^{28}Si（n，α）^{25}Mg的核反应截面。最终计算出来的平均中子注量率为1.4×10^4 n·cm^{-2}·s^{-1}。该计算得到的平均注量率略低于加速器提供的平均中子注量率2.2×10^4 n·cm^{-2}·s^{-1}，二者在数量级上保持一致，但仍存在约36%的相对差异。鉴于注量率反演结果由峰计数、测量时间、灵敏层有效靶核数以及核反应截面等多项输入量共同决定，其中不确定度往往主要由灵敏层厚度（或有效反应体积）导致的靶核数估算误差以及核数据截面精度所主导。此外，峰积分能窗选取、本底扣除、电子学链路响应与计数效率等因素亦会引入额外的系统偏差。综合考虑这些主要误差来源，注量率反演结果的合成不确定度通常可达几十个百分点的量级。因此，本文计算值与实验参考值之间约36%的相对差异仍可视为处于该不确定度量级范围内，具有一定可接受性；在此基础上，本文更侧重于验证该方法在量级一致性与反应贡献分解方面的有效性。

4　结语

本文系统研究了4H-SiC探测器在14.80 MeV D-T单能快中子场中的响应特性与探测原理。通过α粒子源刻度验证了探测器的能量响应线性关系，获得了稳定可靠的能量校准结果。在AIST D-T中子加速器的实验中，4H-SiC探测器展现出清晰的特征能谱结构，其中^{12}C（n，α）^{9}Be特征峰的能量分辨率为3.7%~5.3%，该分辨能力处于同类半导体谱测工作的百分比量级范围内，表明该探测器能够在高能中子场中保持良好的能谱分辨能力。

利用Geant4进行了相同几何条件下的蒙特卡罗模拟，成功重现了中子与碳、硅原子的主要核反应过程。通过引入能量相关的高斯展宽并采用最小二乘法优化参数后，模拟谱与实验谱在峰位与谱形上均表现出良好一致性。基于实验数据、模拟占比及核反应截面计算得到的中子注量率为1.4×10^4 n·cm^{-2}·s^{-1}，与实验测得的2.2×10^4 n·cm^{-2}·s^{-1}相比，计算值与实验参考值之间存在约36%的相对差异。

综上所述，本研究验证了4H-SiC探测器在高能D-T中子场中的稳定性、能谱分辨能力以及测量精度，表明其具备作为快中子注量与能谱诊断探测器的应用潜力，可为未来聚变装置中的D-T中子计量、能谱重建及反应通道分析提供可靠的实验基础与技术支撑。

作者贡献声明　汪屹完成代码编写、实验数据采集与数据分析，并撰写论文初稿；钟国强提供经费支持并指导文章结构，负责论文修改；许明远提供实验指导并参与论文修改；张宇博协助代码实现与调试；洪翔宇负责设备保障与技术支持；李子昂参与论文修改与润色；朱其威协助实验与数据处理；杨亚军协助实验与数据处理；何锦妙负责论文审阅与修改；马凯迪协助实验与数据处理；潘贝贝参与论文修改与格式整理；廖龙勇负责论文审阅与修改；小川国大提供实验平台与实验协助；磯部光孝提供实验平台与实验协助；Siriyaporn Sangaroon协助代码实现与调试。所有作者均阅读并同意论文最终稿。

参考文献

1　Tardocchi M, Gorini G, Henriksson H, *et al*. Ion temperature and plasma rotation profile effects in the neutron emission spectrum[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, **75**(3): 661 – 668. DOI: 10.1063/1.1646733.

2　Källne J, Batistoni P, Gorini G. On the possibility of neutron spectrometry for determination of fuel ion densities in DT plasmas[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, **62**(12): 2871 – 2874. DOI: 10.1063/1.1142174.

3　Potiron Q, Destouches C, Dubus L, *et al*. Estimation of the fast-neutron fluence rate with a 4H-SiC-based detector in a 14.1-MeV mono-energetic field[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2024, **71**(2): 196 – 204. DOI: 10.1109/tns.2023.3348147.

4　Capan I. 4H-SiC Schottky barrier diodes as radiation detectors: a review[J]. Electronics, 2022, **11**(4): 532. DOI: 10.3390/electronics11040532.

5　Szalkai D, Ferone R, Issa F, *et al*. Fast neutron detection with 4H-SiC based diode detector up to 500 ℃ ambient temperature[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, **63**(3): 1491 – 1498. DOI: 10.1109/tns. 2016. 2522921.

6　Kushoro M H, Angelone M, Bozzi D, *et al*. Operation of a 250 μm-thick SiC detector with DT neutrons at high temperatures[J]. Fusion Engineering and Design, 2024, **204**: 114486. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2024.114486.

7　Weiss C, Wilson J, Tiebel G, *et al*. High-temperature performance of solid-state sensors up to 500 ℃ [J].

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1040**: 167182. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167182.

8 Nava F, Vittone E, Vanni P, *et al*. Radiation tolerance of epitaxial silicon carbide detectors for electrons, protons and gamma-rays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **505**(3): 645 – 655. DOI: 10.1016/s0168-9002(02)01558-9.

9 Ruddy F H, Siedel J G. Effects of gamma irradiation on silicon carbide semiconductor radiation detectors[C]// 2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. October 29-November 1, 2006. San Diego, CA, USA. IEEE, 2006: 583 – 587. DOI: 10.1109/nssmic.2006.356223.

10 Tudisco S, Altana C, Boscardin M, *et al*. Silicon carbide for future intense luminosity nuclear physics investigations[J]. Il Nuovo Cimento C, 2019, **42**(2 – 3): 74.

11 Rebai M, Milocco A, Giacomelli L, *et al*. Response of a single-crystal diamond detector to fast neutrons[J]. Journal of Instrumentation, 2013, **8**(10): P10007. DOI: 10.1088/1748-0221/8/10/P10007.

12 Rebai M, Rigamonti D, Cancelli S, *et al*. New thick silicon carbide detectors: Response to 14 MeV neutrons and comparison with single-crystal diamonds[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **946**: 162637. DOI: 10.1016/j. nima. 2019.162637.

13 Dulloo A R, Ruddy F H, Seidel J G, *et al*. The neutron response of miniature silicon carbide semiconductor detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, **422**(1 – 3): 47 – 48. DOI: 10.1016/s0168-9002(98)01060-2.

14 Ruddy F H, Dulloo A R, Seidel J G, *et al*. Nuclear reactor power monitoring using silicon carbide semiconductor radiation detectors[J]. Nuclear Technology, 2002, **140**(2): 198 – 208. DOI: 10.13182/nt02-a3333.

15 Dulloo A R, Ruddy F H, Seidel J G, *et al*. The thermal neutron response of miniature silicon carbide semiconductor detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **498**(1 – 3): 415 – 423. DOI: 10.1016/s0168-9002(02)01987-3.

16 Kushoro M H, Rebai M, Dicorato M, *et al*. Silicon Carbide characterization at the n_TOF spallation source with quasi-monoenergetic fast neutrons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **983**: 164578. DOI: 10.1016/j. nima. 2020.164578.

17 Ruddy F H, Ottaviani L, Lyoussi A, *et al*. Performance and applications of silicon carbide neutron detectors in harsh nuclear environments[J]. EPJ Web of Conferences, 2021, **253**: 11003. DOI: 10.1051/epjconf/202125311003.

18 He R, Niu X Y, Wang Y, *et al.* Advances in nuclear detection and readout techniques[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(12): 205. DOI: 10.1007/s41365-023-01359-0.

19 Chadwick M B, Herman M, Obložinský P, *et al*. ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data[J]. Nuclear data sheets, 2011, **112**(12): 2887 – 2996.

20 Geant4 Collaboration. Guide for physics lists, Release 11.4[R]. Geneva: CERN, 2024: 1 – 71.

21 Shimaoka T, Kaneko J H, Ochiai K, *et al*. A diamond 14 MeV neutron energy spectrometer with high energy resolution[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, **87**(2): 023503. DOI: 10.1063/1.4940929.

22 Rigamonti D, Giacomelli L, Gorini G, *et al*. Neutron spectroscopy measurements of 14 MeV neutrons at unprecedented energy resolution and implications for deuterium – tritium fusion plasma diagnostics[J]. Measurement Science and Technology, 2018, **29**(4): 045502. DOI: 10.1088/1361-6501/aaa675.

23 Kushoro M H, Angelone M, Bozzi D, *et al*. Partially depleted operation of 250 μm-thick silicon carbide neutron detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, **1058**: 168918. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168918.

24 De Napoli M. SiC detectors: a review on the use of silicon carbide as radiation detection material[J]. Frontiers in Physics, 2022, **10**: 898833. DOI: 10.3389/fphy. 2022. 898833.

25 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.