



单晶金刚石探测器对14 MeV单能中子的响应

黄广伟 吴坤 陈晔 李林祥 张思远 王尊刚 朱红英 周春芝 张逸韵 刘志强 伊晓燕 李晋闽

Response to 14MeV neutrons for single-crystal diamond detectors

Huang Guang-Wei Wu Kun Chen Ye Li Lin-Xiang Zhang Si-Yuan Wang Zun-Gang Zhu Hong-Ying
Zhou Chun-Zhi Zhang Yi-Yun Liu Zhi-Qiang Yi Xiao-Yan Li Jin-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 202901 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210891

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210891>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单晶金刚石边缘表面倾斜角度对同质外延生长的影响

Effect of edge inclination of single crystal diamond on homoepitaxial growth

物理学报. 2018, 67(24): 248101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181537>

不同晶面的氢终端单晶金刚石场效应晶体管特性

Characteristics of hydrogen-terminated single crystalline diamond field effect transistors with different surface orientations

物理学报. 2020, 69(2): 028101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191013>

籽晶尺寸对宝石级金刚石单晶生长的影响

Effects of seed crystal size on growth of gem-diamond single crystal

物理学报. 2019, 68(2): 020701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181855>

基于微结构气体探测器对单能和连续谱快中子的模拟解谱

Unfolding simulation of single-energy and continuous fast neutrons spectrum based on micro-pattern gas detector

物理学报. 2021, 70(11): 112901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201954>

降温工艺对宝石级金刚石单晶品质的影响

Effects of cooling process on qualities of Gem-diamond single crystals

物理学报. 2018, 67(14): 140702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180207>

基于前冲康普顿电子高能伽马能谱测量系统设计

Optimization design of a Gamma-to-electron spectrometer for high energy gammas induced by fusion

物理学报. 2017, 66(1): 010703 <https://doi.org/10.7498/aps.66.010703>

单晶金刚石探测器对 14 MeV 单能中子的响应

黄广伟¹⁾²⁾ 吴坤¹⁾ 陈晔¹⁾ 李林祥¹⁾ 张思远¹⁾ 王尊刚¹⁾ 朱红英¹⁾
周春芝^{1)†} 张逸韵^{2)3)‡} 刘志强²⁾³⁾ 伊晓燕²⁾³⁾ 李晋闽²⁾³⁾

1) (国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

2) (中国科学院半导体研究所照明研发中心, 北京 100083)

3) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100190)

(2021 年 5 月 12 日收到; 2021 年 6 月 9 日收到修改稿)

为探索单晶金刚石材料在辐射探测器上的应用, 尤其是用于监测 D-T 中子源产生的 14 MeV 单能中子束流, 研制了高性能单晶金刚石辐射探测器, 并在中国工程物理研究院 K-400 型中子发生器上测试其对 14 MeV 单能中子的响应. 利用 Geant4 蒙特卡罗仿真程序, 结合 ENDF-VIII.0, JEFF-3.3, BROND-3.1, JENDL-4.0u 和 CENDL-3.1 五个评价核数据库对 14 MeV 单能中子在金刚石中的能量沉积和探测效率进行模拟计算和对比, 并给出了仿真能量沉积谱展宽和实测谱能量刻度的方法. 研究表明, 利用 CENDL-3.1 库计算本文的仿真模型, 可以更精准地模拟 14 MeV 中子入射金刚石探测器能量沉积情况, 结合本文给出的能量沉积谱刻度和展宽方法能够很好地匹配实测中子谱 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 特征峰, 其对于弹性散射和 $^{12}\text{C}(n, 3\alpha)$ 相较其他核数据库的描述也更为准确, 仿真计算探测效率与实际测量值仅相差 0.61%; 在长达 2 h、 2×10^{10} n/s 的高通量测试环境下, 探测器对于 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应特征峰的探测效率、能量分辨率和峰位道址基本保持稳定, 有望用于 14 MeV 快中子束流的监测.

关键词: 单晶金刚石, 14 MeV 中子监测, 蒙特卡罗模拟, 能谱测量

PACS: 29.30.Hs, 29.40.-n, 29.85.Fj

DOI: 10.7498/aps.70.20210891

1 引言

14 MeV 能区中子是国际标准化组织推荐的一系列参考辐射场之一^[1], 其注量率的准确测量是中子计量的重要内容, 在核参数测量、反应堆设计和运行、中子核技术应用及中子计量仪表的校准等方面均有应用, 具有重要意义^[2,3]. 由于其测量的准确程度直接影响到其他中子参数的准确性, 因此人们一直致力于减少它的测量不确定度. 14 MeV 能区中子主要由 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应产生, 通过该反应, 中子

产额可达到 10^{12} n/s 甚至更高, 个别反应堆中子源在堆的活性区注量率可达 10^{15} — 10^{16} n/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)^[4]. 在这样的束流强度下, 以硅为代表的传统半导体材料极易受到辐射损伤, 导致探测器性能变差, 使测量结果变得不可靠. 金刚石材料具有强耐辐照能力强、载流子迁移率高、热导率高等优点^[5-8], 是制备辐射探测器的理想材料. 近年来单晶金刚石材料生长技术日益成熟^[9], 金刚石探测器在能谱和计数方面的应用成为可能, 目前已经应用于 α 粒子、电子^[10]、X 射线和 γ 射线^[11] 的测量. 此外 ^{12}C 可与快中子相互作用产生独立的特征峰, 因此其特别适合用于

† 通信作者. E-mail: zhouch6622@163.com

‡ 通信作者. E-mail: yzyzhang@semi.ac.cn

14 MeV 能区中子场的准确测定^[12-15]. 本文介绍了高性能金刚石中子探测器的制备工艺, 并搭建中子监测系统测试了其对于 14 MeV 中子的响应, 最后与基于不同核数据库的蒙特卡罗仿真结果进行对比.

2 实验介绍

2.1 金刚石探测器

利用 Element Six 公司生产的商品化电子级单晶金刚石材料制备快中子探测器, 尺寸为 4.5 mm × 4.5 mm × 0.3 mm, 电子顺磁共振表征结果显示其氮杂质含量低于 5×10^{-9} , 二次离子质谱表征结果显示其硼杂质含量低于 1×10^{-9} , 对于 0.5 mm 厚度的单晶金刚石, 其电荷收集效率典型值大于 95%^[16]. 首先使用浓硫酸和双氧水按体积比 1:1 配置氧化剂, 对材料表面进行氧化处理, 去除表面石墨相以提高薄膜表面质量, 降低表面漏电流; 然后在此基础上进行电极制备, 采用金属-半导体-金属 (metal-semiconductor-metal, MSM) 结构, 通过硬掩膜分别在材料两侧蒸镀 Ti (50 nm) 和 Au (200 nm), 随后在氮气气氛和 800 °C 温度下退火 10 h, 以保证电极与材料形成良好的欧姆接触; 最后利用导电银浆和金线将探测器键合在印刷电路板上, 并利用共地射频连接器进行封装. 探测器的结构和实物如图 1 所示.

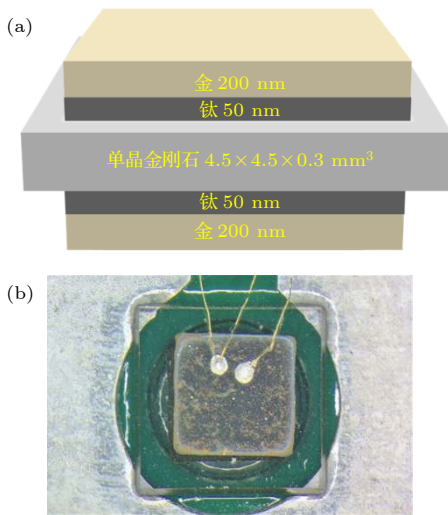


图 1 (a) 金刚石探测器结构; (b) 探测器实物

Fig. 1. (a) The schematic diagram of the single-crystal diamond detector structure; (b) the as-fabricated device for test.

2.2 金刚石探测器快中子测量原理

14 MeV 快中子与 ^{12}C 主要发生的反应如表 1 所示^[17]. 其中 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 的反应产物能量明显高于其他反应道的产物能量, 会在能谱上形成独立的特征峰, 因此可利用该反应进行 14 MeV 快中子监测.

表 1 ^{12}C 与中子主要相互作用方式

Table 1. Main interaction modes between ^{12}C and neutron.

反应方式	反应 Q 值/MeV	带电粒子产物能量
$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$	5.701	8.299
$^{12}\text{C}(n, 3\alpha)$	7.275	6.725
$^{12}\text{C}(n, n)^{12}\text{C}$	0	3.977
$^{12}\text{C}(n, p)^{12}\text{B}$	12.587	1.413
$^{12}\text{C}(n, d)^{11}\text{B}$	13.732	0.268

2.3 测试装置及流程

实验测量系统如图 2 所示. 14 MeV 中子由中国工程物理研究院 K-400 型中子发生器提供, 金硅面垒探测器用于监测中子产额, 金刚石探测器放置于束流夹角约 96° 处以保证出射中子能量的单色性, 与氚靶距离为 26.5 cm. 前置放大器型号为 ORTEC 142 AH (电荷灵敏), CAEN Hexagon 型数字多道分析仪用于为前放提供工作电压、为探测器提供偏置电压 (150 V) 及对前放输出信号进行数字梯形滤波成型和能谱测量, 计算机上利用 Quantus 软件进行能谱分析, 主要包括死时间修正和特征峰参数提取.

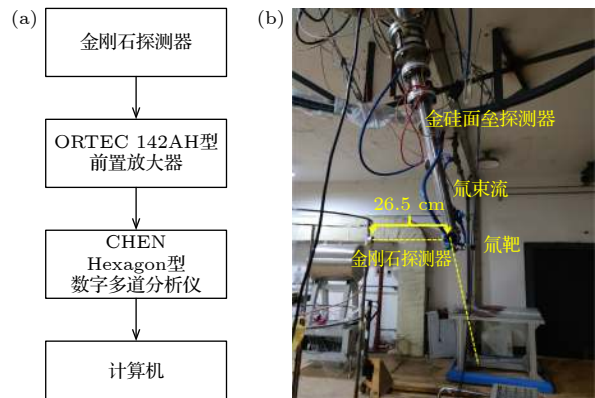


图 2 (a) 金刚石探测器中子能谱测量系统; (b) 14 MeV 中子测量实验场景

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the setup for measurement of neutron spectrum; (b) experimental scenario for measurement of 14 MeV neutrons.

3 蒙特卡罗模拟

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^[18]. 采用 Geant4 程序 10.5 版本中的 QGSP_BERT_HP 模型, 截面库分别选用 ENDF-VIII.0 (美国)、JEFF-3.3(欧洲)、BROND-3.1(俄罗斯)、JENDL-4.0u (日本) 和 CENDL-3.1 (中国) 五大公认的评价核数据库, 其中 CENDL-3.1 数据库中¹²C的截面是使用 UNF 代码系统进行理论计算得到的, 该系统包含球型光学模型、统一的 Hauser-Feshbach 理论和激子模型等, 并结合了实验数据进行评估^[19]. 本次模拟记录了 3000 万个 14 MeV 单能中子入射在金刚石探测器中的能量沉积及对应的粒子种类, 探测器的几何形状、密度、源距、入射角等参数与实际实验环境保持一致.

Geant4 的运行结果以步 (step) 形式输出, 每个 step 中包含事件号 (event)、粒子种类及其在该 step 中沉积的能量, 同一个 event 可能包含多个 step. 以 CENDL-3.1 库为例, 统计每个 step 下能量沉积不为 0 的不同粒子, 其占比如图 3 所示.

由图 3 可知, 产生能量沉积的粒子主要包括散

射导致的¹²C, ¹²C(n, α)⁹Be 反应产生的 α 粒子和⁹Be 粒子、伴随核反应产生的 γ 射线和电子, 以及极少量的¹³C 和其他与空气相互作用产生的¹⁶O, ¹⁵N 等粒子. 筛选其中主要成分, 将某一种粒子所在 event 的各个 step 能量沉积进行累加, 并放到划分的能量区间中, 统计各个区间的粒子个数并进行最大值归一化, 得到图 4.

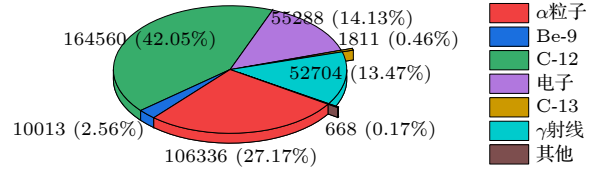


图 3 沉积能量粒子及其占比

Fig. 3. Energy-deposited particles and their proportion.

从图 4(b) 和图 4(c) 可以看出, ⁹Be 与 α 粒子所在事件沉积能量相同, 因此为同一事件, 即⁹Be 与 α 粒子总是成对产生, 证明了¹²C(n, α)⁹Be 反应的发生, 这也是能谱中¹²C(n, α)⁹Be 特征峰的成因; 图 4(e) 和图 4(f) 中, γ 射线和电子所在事件沉积能量也与该反应相同, 证明反应会伴随 γ 射线和电子产生; 由于¹²C 与中子发生碰撞沉积能量较低, 基本不影响特征峰的计数; 此外, 图 4(c) 中还有少部分 α 粒子来自于¹²C(n, 3α) 反应. 最终能量沉积谱的仿真结果如图 5 所示.

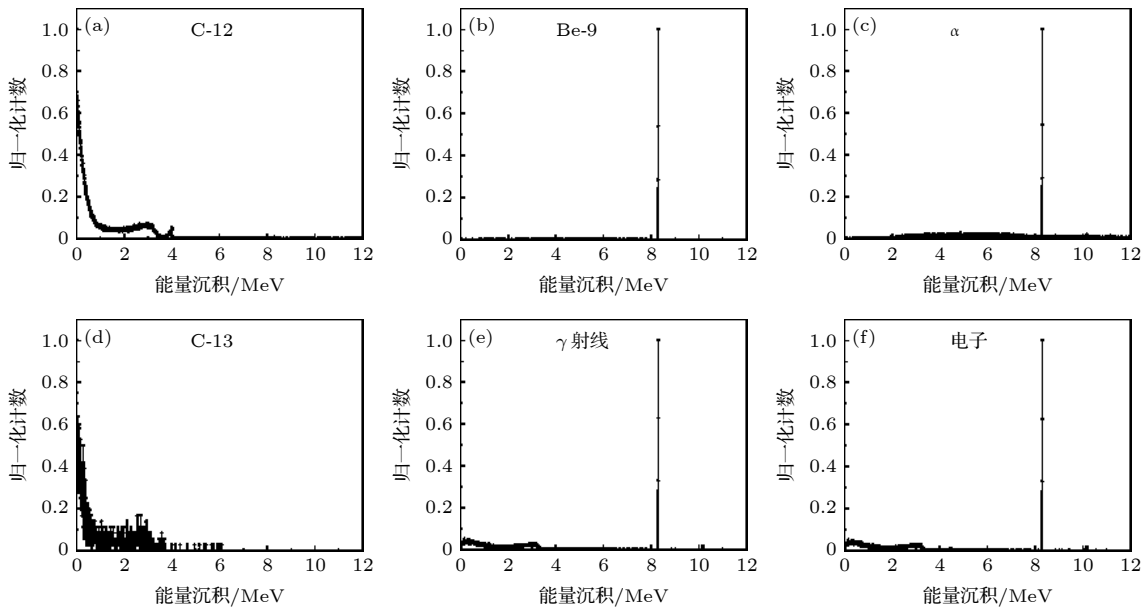


图 4 不同粒子所在事件能量沉积情况 (a) ¹²C 能量沉积; (b) ⁹Be 能量沉积; (c) α 粒子能量沉积情况; (d) ¹³C 能量沉积; (e) γ 射线能量沉积; (f) 电子能量沉积

Fig. 4. Energy deposition for different particles in their events: (a)–(f) are for ¹²C, ⁹Be, alpha particles, ¹³C, gamma rays and electrons, respectively.

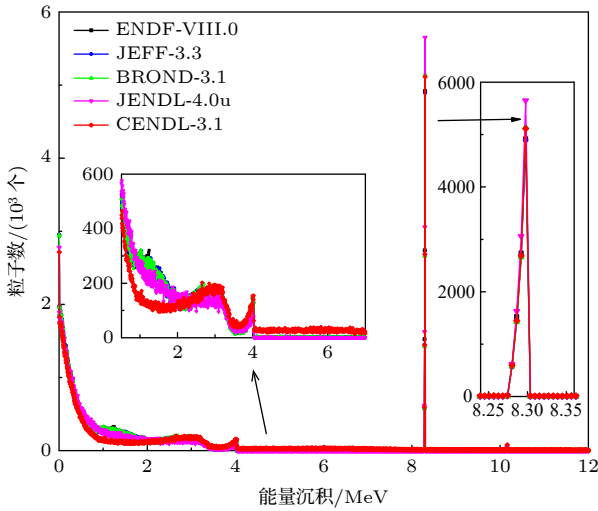


图5 不同核数据库能量沉积对比(内插图是能量沉积谱的局部放大)

Fig. 5. Comparison of energy deposition calculated via different nuclear databases. A close-up view of the energy-deposition spectra is in the inset.

从图5中可以看出,各个中子核数据库的计算结果主要有以下几点区别:一是在于 ^{12}C 散射部分的差异,CENDL-3.1库在散射部分粒子数相对更多;二是对于 $^{12}\text{C}(n, 3\alpha)$ 反应,其他几种数据库在能量范围约5—8 MeV区间内沉积能量粒子数基本为0,CENDL-3.1库可以相对较好的计算出该反应的结果;三是对于 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应的探测效率,各个数据库之间存在一定差异,其中JENDL-4.0u库的探测效率计算结果略高于其他数据库.各个方法的特征峰位及散射边界能量值基本一致.

4 能量刻度与能谱展宽方法

需要指出的是,由于统计涨落、电子学噪声等存在,实测能谱往往存在一定展宽,与仿真计算能谱之间不可避免地存在差异,为了使二者保持一致,通常需要对仿真谱进行高斯展宽.另外实测能谱的道数和能量刻度关系往往和仿真谱不一致,因此需要进行能谱计数的重分配.

4.1 能量刻度

为了将仿真能谱的能量刻度与实测谱调整一致,这里首先给出能谱计数重分配的方法:设实测谱为 S ,计数重分配后能谱为 S' , S 在第 j 道的计数为 S_j ,对应的能量为 E_j , S' 在第 i 道的计数为 S'_i ,对应的能量为 E'_i , $j = 1, 2, \dots, M$, $i = 1, 2, \dots, N$,

M 和 N 分别为 S 和 S' 的总道数. E_j 的值根据 S 的能量刻度信息确定.对于 E'_i ,因为 S' 与仿真能谱具有相同的能量刻度关系,可知第 i 道对应的能量为 i keV:

$$E'_i = i(\text{keV}). \quad (1)$$

能谱的本质可认为是不同能量射线的概率密度函数,设该函数为 $f(E)$, E 为能量,能谱 S 的计数与 $f(E)$ 的关系可以表示为

$$S_j = \int_{E_j}^{E_{j+1}} f(E) dE. \quad (2)$$

假设在 S 每一道内的计数是随能量均匀分布的,可以利用 S_j 反求 $f(E)$:

$$f(E) = S_j / (E_{j+1} - E_j), \quad E_j \leq E < E_{j+1}. \quad (3)$$

那么由 S 到 S' 的能谱计数重分配方法为

$$S'_i = \int_{E'_i}^{E'_{i+1}} f(E) dE = \int_i^{i+1} f(E) dE. \quad (4)$$

4.2 能谱展宽

通常来讲,可以通过抽样与高斯随机数结合的方式进行展宽,但是此方法所需的运算量很大,且得到的展宽结果中会伴有统计涨落,导致展宽后的能谱响应不够光滑.这里利用高斯展宽矩阵实现展宽.设 D 为道数为 N 的未展宽仿真谱, G 为 $N \times N$ 大小的高斯展宽矩阵, $G_{i,j}$ 为 G 的第 i 行第 j 列的值,FWHM $_j$ 为 D 的第 j 列对应的FWHM值,则有

$$G_{i,j} = a_j \exp\left(-\frac{(i - u_j)^2}{2\sigma_j^2}\right), \quad (5)$$

其中, u_j 和 σ_j 分别为高斯的中心和标准差, a_j 为归一化系数,计算方法为

$$\begin{cases} a_j = \frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\sqrt{\pi}\text{FWHM}_j}, \\ u_j = j, \\ \sigma_j = \frac{\text{FWHM}_j}{2\sqrt{2\ln(2)}}. \end{cases} \quad (6)$$

将 G 和 D 相乘即可完成展宽,得到展宽后仿真谱 A :

$$A = GD. \quad (7)$$

上述展宽方法可以灵活调整FWHM刻度信息,并且可以得到光滑的系统响应矩阵.

对于FWHM刻度,这里借鉴了 γ 谱处理中的高斯展宽系数确定方法^[20],即

$$\text{FWHM}(E) = a + b \times \sqrt{E + c \times E^2}, \quad (8)$$

其中 a, b, c 均为待定展宽系数; E 为刻度后的能量; $\text{FWHM}(E)$ 是沉积能量 E 处的展宽. 由于本次实验单能中子仅有 14 MeV 一个测量点, 因此采用特征峰匹配最优的方法来确定展宽系数, 设 $a_{\text{opt}}, b_{\text{opt}}, c_{\text{opt}}$ 分别为 a, b, c 的最优估计值, 则可通过求解 (9) 式得到 $a_{\text{opt}}, b_{\text{opt}}, c_{\text{opt}}$:

$$a_{\text{opt}}, b_{\text{opt}}, c_{\text{opt}} = \arg \min_{a, b, c} \left[\sum_{n=P_{\text{start}}}^{P_{\text{end}}} (S_n - S'_n(a, b, c))^2 \right], \quad (9)$$

其中 P_{start} 和 P_{end} 分别是特征峰位起始道和终止道, S_n 是实测谱, $S'_n(a, b, c)$ 是使用一组 a, b, c 参数展宽后的仿真谱.

最终得到的仿真能谱与实测谱的结果对比如图 6 所示. 这里展示了 CENDL-3.1 截面库的结果. 从图 6 中可以看出, 仿真谱与实测谱的特征峰经过展宽和能量刻度、道址分配后基本吻合, 几个 ^{12}C 散射峰位也与实测谱一致, 实测谱中出现了一定程度的低能拖尾和少量高能拖尾. 低能拖尾的成因主

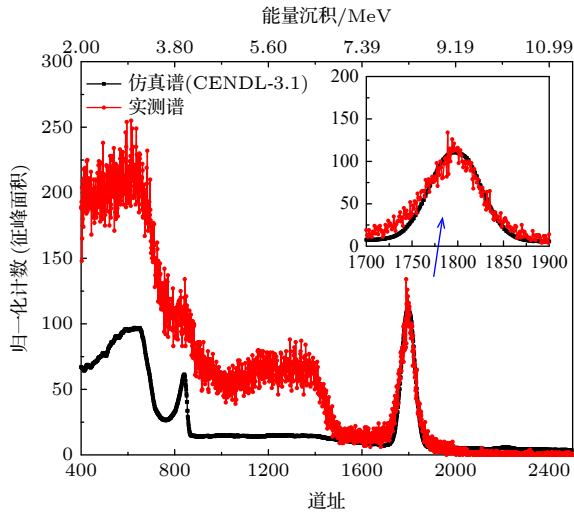


图 6 实测谱与刻度、展宽后仿真谱对比(内插图是仿真谱和实测谱的局部放大)

Fig. 6. Comparison of measured spectrum with calibrated and widen simulated spectrum. A close-up view of the two spectrums is in the inset.

要有以下两点: 一是探测器的电荷收集不完全, 二是少部分在探测器边缘发生的核反应产生的带电粒子射出探测器, 能量未能完全沉积. 而高能拖尾则是由于在探测器有限的响应时间内, α 粒子和 ^9Be 粒子与低能电子、光子的符合产生的^[21]. 此外, 虽然 CENDL-3.1 截面库中可计算出 $^{12}\text{C}(n, 3\alpha)$ 反应, 优于其他截面库, 但与实际测量值仍存在较大偏差. 由于所建仿真模型没有考虑环境中子带来的影响, 因此在 ^{12}C 散射部分也存在一些差异. 在仅关注 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应特征峰的情况下, 该模型的计算结果可与实际测量情况相符. 由于 Geant4 模拟计算过程中不考虑电荷收集效率的问题, 即认为电荷收集效率为 100%, 因此能量沉积谱与实测能谱的一致性也表明探测器的优越性能.

5 讨论部分

将几种数据库仿真计算 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应特征峰的结果列表如表 2 所示.

实测能谱的绝对探测效率 η_{eff} 需要结合探测器面积 $A(0.45 \text{ cm} \times 0.45 \text{ cm})$, 特征峰峰计数 N' , 测量活时 t' , 实际测量时间 t , 以及探测器处的中子注量 ϕ 来进行计算:

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{N'}{A\phi} \cdot \frac{t'}{t}, \quad (10)$$

(10) 式中, N', t', t 可由 Quantus 软件给出, 中子注量 ϕ 可由下式进行计算:

$$\phi = \frac{N}{4\pi R^2}, \quad (11)$$

其中, R 为探测器到源的距离 ($R = 26.5 \text{ cm}$), N 为中子发生器在测量时间 t 内产生的中子个数, 可由基于金硅面垒探测器的伴随粒子法给出 (中子发生率平均为 $2 \times 10^{10} \text{ n/s}$, 不确定度 2.5%). 结合 (10) 式、(11) 式, 可计算得出该探测器的绝对探测效率. 在 2 h 时间内, 进行 24 次重复测量, 每次测量时间 5 min, 图 7 展示了每次测量得到的探测器探测效率、能量分辨率和特征峰位道址. 最终的

表 2 不同核数据库 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应特征峰统计结果

Table 2. Statistical results of characteristic peaks of $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ reaction calculated via different nuclear databases.

核数据库	ENDF-VIII.0	JEFF-3.3	BROND-3.1	JENDL-4.0u	CENDL-3.1
粒子沉积数/个	9766	9612	9814	10969	9862
探测效率/($10^{-4} \text{ counts} \cdot \text{n}^{-1}$)	3.26	3.20	3.27	3.66	3.29
统计不确定度/%	1.01	1.02	1.01	0.95	1.01

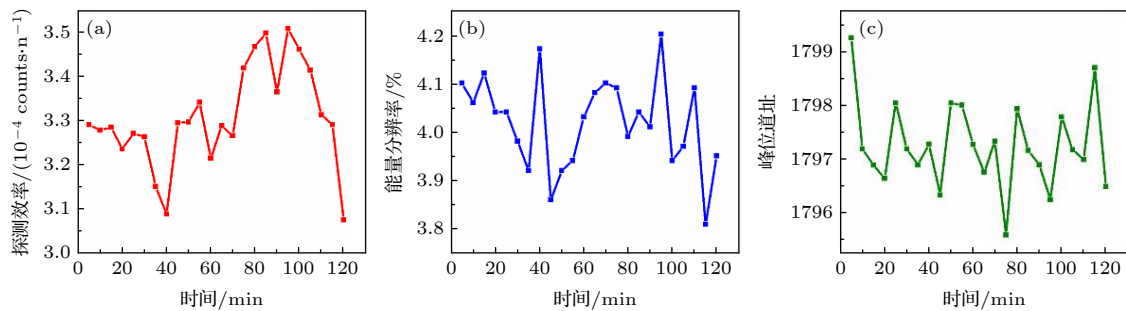


图7 金刚石探测器长时间稳定性测量结果 (a) 探测效率随测量时间的变化; (b) 能量分辨率随测量时间的变化; (c) 峰位道址随测量时间的变化

Fig. 7. Long-term stability measurement results of the single-crystal diamond detector: (a), (b) and (c) respectively represent the results of detection efficiency, energy resolution, and peak channel that change over measuring time.

结果为: 探测效率 $(3.31 \times 10^{-4} \pm 0.11 \times 10^{-4})$ counts/n, 能量分辨率 $4.02\% \pm 0.09\%$, 峰位道址 1797.24 ± 0.80 . 其中探测效率与 CENDL-3.1 库仿真计算结果相比, 仅相差 0.61%, 在合理的不确定度范围内.

6 结论

本研究制备了单晶金刚石中子探测器, 并提供了基于该探测器的 14 MeV 中子监测方案, 测量了其对于 14 MeV 中子的响应, 并与仿真计算结果进行比较, 结果表明: 对于 14 MeV 中子, 该探测器的 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应特征峰明显且独立于其他反应道的能量沉积; 不同核数据库 ^{12}C 对于 14 MeV 快中子各个通道反应截面之间略有差异, 其中 CENDL-3.1 核数据库对比其他数据库仿真计算结果更为接近实验值, 二者之间探测效率仅相差 0.61%, 这可为其他仿真工作提供一定借鉴; 在长时间、高通量的照射环境下探测器性能始终保持稳定, 因此本文研究成果有望成为新的 14 MeV 中子监测的可靠解决方案. 下一步可以进行更加精确的实验环境仿真建模分析, 从而使 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应特征峰外的仿真能谱更好地匹配测量结果, 并研究金刚石探测器的中子/ γ 射线识别问题, 减少环境 γ 射线对测量结果的影响.

感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所提供测试条件.

参考文献

- [1] Thomas D, Bedogni R, Méndez R, Thompson AZimbal A 2018 *Radiat. Prot. Dosim.* **180** 21
- [2] Bertalot L, Krasilnikov V, Core L, Saxena A, Yukhnov N, Barnsley R, Walsh M 2019 *J. Fusion Energ.* **38** 283
- [3] Cazzaniga C, Sunden E A, Binda F, et al. 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 43506
- [4] Luo J H 2021 *14MeV Neutron Physics and Cross Section Measurements* (Beijing: Science Press) p17 (in Chinese) [罗均华 2021 14 MeV 中子物理及截面测量 (北京: 科学出版社) 第 17 页]
- [5] Osipenko M, Ripani M, Ricco G, Caiffi B, Pompili F, Pillon M, Angelone M, Verona-Rinati G, Cardarelli R, Mila G, Argiro S 2015 *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **799** 207
- [6] Weilhammer P, Adam W, Bauer C, et al. 1998 *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **409** 264
- [7] Isberg J, Hammersberg J, Johansson E, Wikström T, Twitchen D J, Whitehead A J, Coe S E, Scarsbrook G A 2002 *Science (American Association for the Advancement of Science)* **297** 1670
- [8] Lee C, Ban C, Lee H, Choo K, Jun B 2019 *Appl. Radiat. Isotopes* **152** 25
- [9] Tallaire A, Collins A T, Charles D, Achard J, Sussmann R, Gicquel A, Newton M E, Edmonds A M, Cruddace R J 2006 *Diam. Relat. Mater.* **15** 1700
- [10] Laub W U, Kaulich T W, Nüsslin F 1999 *Physics in Medicine & Biology* **44** 2183
- [11] Schirru F, Kisielwicz K, Nowak T, Marczevska B 2010 *Journal of Physics. D, Applied Physics* **43** 265101
- [12] Zbořil MZimbal A 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 11D
- [13] Pillon M, Angelone M, Batistoni P, Loreti S, Milocco A 2016 *Fusion Eng. Des.* **106** 93
- [14] Dankowski J, Drozdowicz K, Kurowski A, Wiącek U, Nowak T, Zabala Y 2017 *Diam. Relat. Mater.* **79** 88
- [15] Giacomelli L, Nocente M, Rebai M, et al. 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11D
- [16] Element six_{TM} <https://www.e6.com/> [2021-5-12]
- [17] Pillon M, Angelone M, Krása A, Plompen A J M, Schillebeeckx P, Sergi M L 2011 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **640** 185
- [18] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. 2003 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **506** 250

- [19] Ge Z G, Zhao Z X, Xia H H, Zhuang Y X, Liu T J, Zhang J SWu H C 2011 *J. Korean Phys. Soc.* **59** 1052
 [20] Li F L, Zhang X J, Wang R B 2013 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **33** 1266 (in Chinese) [李福龙, 张雄杰,

- 王仁波 2013 *核电子学与探测技术* **33** 1266]
 [21] Shi R 2018 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Chengdu University of Technology) (in Chinese) [石睿 2018 博士学位论文(成都: 成都理工大学)]

Response to 14 MeV neutrons for single-crystal diamond detectors

Huang Guang-Wei¹⁾²⁾ Wu Kun¹⁾ Chen Ye¹⁾ Li Lin-Xiang¹⁾
 Zhang Si-Yuan¹⁾ Wang Zun-Gang¹⁾ Zhu Hong-Ying¹⁾
 Zhou Chun-Zhi^{1)†} Zhang Yi-Yun^{2)3)‡} Liu Zhi-Qiang²⁾³⁾
 Yi Xiao-Yan²⁾³⁾ Li Jin-Min²⁾³⁾

1) (*State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China*)

2) (*Research and Development Center for Solid State Lighting, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

3) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 12 May 2021; revised manuscript received 9 June 2021)

Abstract

Single-crystal diamond (SCD) detectors promise to have applications in neutron spectrometers and fusion neutron monitoring under high flux deuterium plasma. The response to 14 MeV neutrons for the SCD detector is studied in this paper. A high-performance SCD neutron detector is developed by processing cleaning wafer, depositing metal electrodes, annealing and wire-bonding. A fast-neutrons monitoring system containing the detector, preamplifier and digital multichannel analyzer is constructed, and the response to 14 MeV neutrons for the detector is measured on the K-400 neutron generator supported by China Academy of Engineering Physics. In addition, computational simulations of the energy deposition and detection efficiency of 14 MeV neutron through diamond are performed via Geant4 toolkit based on evaluated nuclear data libraries of ENDF-VIII.0, JEFF-3.3, BROND-3.1, JENDL-4.0u and CENDL-3.1. The methods of widening the simulation spectrum and calibration of measuring spectrum are presented in order that simulation results are in reasonable agreement with measured values. The results indicate that the energy deposition of 14 MeV neutrons incident on the ¹²C can be more accurately calculated with CENDL-3.1 than with other data libraries. The elastic scattering and reaction of ¹²C(n, 3α) are described more accurately with the CENDL-3.1, and the characteristic peaks of ¹²C(n, α)⁹Be matched well the calibrated testing spectrum and the after-widening simulation spectrum, with a difference between the simulated detection efficiency and measuring results being as low as 0.61%. The outcome measures are described as the standardized mean difference, with a detection efficiency of $(3.31 \times 10^{-4} \pm 0.11 \times 10^{-4})$ counts/n, an energy resolution of $4.02\% \pm 0.09\%$, and a peaking channel of 1797.24 ± 0.80 , which suggest that the detector keeps stable well under a high neutron flux of 2×10^{10} n/s for as long as 2 h. The results demonstrate that the SCD detector can be a promising candidate for monitoring 14 MeV D-T neutrons.

Keywords: single-crystal diamond, 14 MeV neutron monitoring, Monte-Carlo simulation, spectrum measurement

PACS: 29.30.Hs, 29.40.-n, 29.85.Fj

DOI: 10.7498/aps.70.20210891

† Corresponding author. E-mail: zhoucz6622@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: yyzhang@semi.ac.cn