

单晶金刚石探测器 γ 射线响应研究

王利斌^{1,2} 张逸韵³ 黄广伟³ 马志海² 席善学² 吴 坤² 赵 鑫² 宋玉收¹
周春芝² 李海俊² 刘辉兰¹

1(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院 哈尔滨 150001)

2(国民核生化灾害防护国家重点实验室 北京 102205)

3(中国科学院半导体研究所 宽禁带半导体研发中心 北京 100083)

摘要 传统半导体探测器无法长期工作在高剂量率辐射环境下,金刚石探测器具有禁带宽度大、载流子迁移率高、耐辐照能力强、时间响应快等优点,适用于极端环境下辐射探测。本文制备了高性能氧终端单晶金刚石(Single Crystal Diamond, SCD)探测器(4.5 mm×4.5 mm×0.3 mm),并对其电学特性、能量分辨率、电荷收集效率及⁶⁰Co γ 辐射响应特性进行了研究;并利用²³⁸Pu α 源辐照测试了其电荷收集谱。结果表明,制备的单晶金刚石探测器在150 V偏压下暗电流低至0.26 pA·mm⁻²;该探测器电子和空穴电荷收集效率分别高达98.9%和99.2%,能量分辨率分别为2.54%和2.86%。制备的SCD探测器工作在脉冲模式、电流模式下 γ 剂量率响应下限分别为0.001 3 Gy·h⁻¹及0.2 Gy·h⁻¹,响应下限至64 Gy·h⁻¹时探测器线性相关度可达99.3%以上,且响应下限均优于国外商用金刚石探测器。研究金刚石探测器对 γ 射线的响应,有助于后续进一步深入研究基于单晶金刚石探测器的中子/ γ 射线甄别方法,并应用于实时 γ 剂量测量。

关键词 金刚石探测器, 半导体探测器, γ 剂量, 脉冲计数, 电流响应

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240346

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240346

Single crystal diamond detector for gamma dose measurement

WANG Libin^{1,2} ZHANG Yiyun³ HUANG Guangwei³ MA Zhihai² XI Shanxue² WU Kun²
ZHAO Xin² SONG Yushou¹ ZHOU Chunzhi² LI Haijun² LIU Huilan¹

1(College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

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

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

Abstract [Background] Traditional semiconductor detectors cannot operate for long periods in high-dose-rate radiation environments. Diamond detectors, with their wide bandgap, high carrier mobility, high radiation hardness, and fast time response, are suitable for radiation detection in extreme environments. [Purpose] This study aims to investigate the electrical properties, energy resolution, charge collection efficiency, and response characteristics to ⁶⁰Co gamma radiation of single crystal diamond (SCD) detectors. [Methods] Initially, the SCD material in the size of 4.5 mm×4.5 mm×0.3 mm from Element Six Ltd. UK was characterized using Atomic Force Microscope (AFM), X-

国家重点研发计划(Nos.2022YFB3608600, 2022YFB3604604)、国家自然科学基金(Nos.12227810, 62134006)资助

第一作者: 王利斌, 男, 1992年出生, 2020年于新疆大学获硕士学位, 现为博士研究生, 从事金刚石核辐射探测器方向研究

通信作者: 宋玉收, E-mail: songyushou80@163.com; 周春芝, E-mail: zhouch6622@163.com

收稿日期: 2024-08-23, 修回日期: 2024-10-27

Supported by National Key Research and Development Program of China (Nos.2022YFB3608600, 2022YFB3604604), National Natural Science Foundation of China (Nos.12227810, 62134006)

First author: WANG Libin, male, born in 1992, graduated from Xinjiang University with a master's degree in 2020, doctoral student, focusing on diamond nuclear radiation detector

Corresponding author: SONG Yushou, E-mail: songyushou80@163.com; ZHOU Chunzhi, E-mail: zhouch6622@163.com

Received date: 2024-08-23, revised date: 2024-10-27

ray Diffraction (XRD) and Photoluminescence Spectroscopy (PL). Subsequently, oxygen-terminated diamond detector was fabricated. Then, the dark current of the detector was measured using a Keithley 4200 Semiconductor Parameter Analyzer, and the energy resolution and charge collection efficiency of the fabricated SCD detector were obtained by comparing them with a silicon detector using a ^{238}Pu α source. Finally, the response and stability of the SCD detector to ^{60}Co gamma dose rates in both current and pulse modes were studied and compared with commercial diamond detector from MICRON, UK. **[Results]** The detector's electron and hole charge collection efficiencies are as high as 98.9% and 99.2%, respectively, with energy resolutions of 2.54% and 2.86%. The fabricated SCD diamond detector operates in pulse mode and current mode, with gamma dose rate responses ranging from $0.001\ 3\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ to $64\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ and from $0.2\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ to $64\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. The linear correlation can reach over 99.3%, which is superior to the commercial MICRON diamond detector. **[Conclusions]** Measurement results demonstrate that SCD detector can be applied to real-time gamma dose measurement. Investigating the response of diamond detectors to gamma rays helps to further in-depth research on neutron/gamma-ray discrimination methods based on single-crystal diamond detectors, and can be applied to real-time gamma dose measurement.

Key words Diamond detector, Semiconductor detector, Gamma dose measurement, Pulse counting, Current response

金刚石探测器是近年来国际核辐射探测技术的研究前沿和热点。金刚石材料作为“终极半导体材料”,与其他半导体材料相比,其具有禁带宽度大、原子离位阈能高、电阻率高、介电系数小、击穿电压高、载流子迁移率高、热导率高等性质,是制作新一代半导体辐射探测器的理想材料^[1-2]。基于金刚石材料这些优异的性质,制备的金刚石探测器具有耐辐照能力强、能量分辨率高、漏电流小、脉冲上升时间短、可在高温条件使用、结构简单、组织等效性好等优点^[3],能够探测从紫外线^[4]、X射线^[5-7]到 γ ^[8]、质子^[9]、中子^[10-14]、重带电粒子等多种射线、辐射粒子。

国内外研究人员对金刚石探测器在 γ 射线辐照下的探测器响应进行了相关研究。Sato等^[15]将硅探测器与金刚石探测器结合开发了一种宽剂量率范围 γ 辐射剂量仪,可工作在 $1\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}\sim 1\ \text{kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围。其中 $0.2\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}\sim 1\ \text{kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 为金刚石探测器应用范围,并且其所采用的金刚石探测器抗辐照强度可达 $0.7\ \text{MGy}$ 。Brambilla等^[16]利用 ^{60}Co γ 源研究了不同尺寸的单晶金刚石探测器在剂量率为 $1.16\ \text{kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 、总剂量积累为 $0.5\ \text{MGy}$ 时的金刚石探测器的抗辐射特性。同时研究了探测器在 $1\ \text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}\sim 1\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 下X射线的线性响应。Baranova等^[17]制造了一个用于 γ 辐射测量的核应急宽量程金刚石探测器装置,该装置脉冲模式下的灵敏度为 $1\ \text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}\sim 0.4\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,电流模式下的探测器从 $0.1\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}\sim 20\ \text{kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 呈线性关系。Pompili等^[18]研究了单晶金刚石探测器在国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) γ 剂量率为 $1.4\ \text{kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 、总剂量为 $4.7\ \text{MGy}$ 时金刚石探测器的抗辐射特性。Xue等^[19]在掺硼硅衬底上生长了单晶金刚石材料并

制备成探测器,用于高剂量率辐射环境下($444\ \text{TBq}$)的 ^{60}Co γ 剂量响应测量。探测器电流工作模式下,在 $10\sim 190\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 的剂量率范围内探测器响应电流与剂量率呈良好的线性关系。王子业等^[20]研究了TW60019型商用金刚石探测器在 $100\sim 10\ 000\ \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 剂量率范围内的 ^{60}Co γ 辐照下剂量率响应。以上研究均只对单晶金刚石探测器响应上限及抗辐照能力进行了研究,但是对探测器响应下限并没有充分研究,而探测器响应的下限决定了探测器应用范围。

本文制备了金属-半导体-金属(Metal-Semiconductor-Metal, MSM)结构金刚石探测器并对探测器电学特性、 ^{238}Pu α 粒子电荷收集效率、能量分辨率及单晶金刚石探测器在脉冲计数及电流工作模式下 ^{60}Co γ 射线剂量率响应特性进行研究,并将英国MICRON单晶金刚石探测器放置在同样 ^{60}Co γ 辐射条件测试,进行对比研究分析。

1 探测器制备

本研究所选单晶金刚石材料为英国元素六(Element six)公司电子级单晶金刚石(Single Crystal Diamond, SCD)材料,尺寸为 $4.5\ \text{mm}\times 4.5\ \text{mm}\times 0.3\ \text{mm}$,晶向为(111),氮杂质含量小于 5×10^{-9} ,硼杂质含量小于 1×10^{-9} 。单晶金刚石材料的好坏直接决定探测器性能的优劣。在探测器制备之前,我们首先对单晶金刚石材料进行了表征。使用Veeco原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)观察了材料表面形貌粗糙度,扫描面积为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$,均方根粗糙度仅为 $0.372\ \text{nm}$,结果如图1(a)所示。为了研究其晶体质量,使用Bede X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)仪对单晶金刚石材

料样品进行了X射线衍射测试,如图1(b)所示。(111)晶向单晶金刚石材料X射线衍射峰理论值为 43.9° ,实测值为 43.91° ,与理论值基本一致,半高宽为 $149\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 。采用Horiba Scientific仪器对材料进行了光致发光谱(Photoluminescence Spectroscopy, PL)测试,目的是表征材料内部痕量氮杂质及缺陷,激发波长为 532 nm ,结果如图1(c)所示。可以看出,材

料本征峰为 572 nm ,未观察到明显杂质峰,尤其是未发现位于 575 nm 及 637 nm 处的氮杂质峰。最后采用拉曼光谱仪进行了拉曼光谱测试,其 sp^3 峰为 $1\,332.8\text{ cm}^{-1}$,半高宽为 2.90 cm^{-1} ,半高宽比理论值稍大,表面晶格内部存在少许应力。通过以上对E6材料表征测试结果表明,我们选用的单晶金刚石材料质量良好,适合做辐射探测器材料。

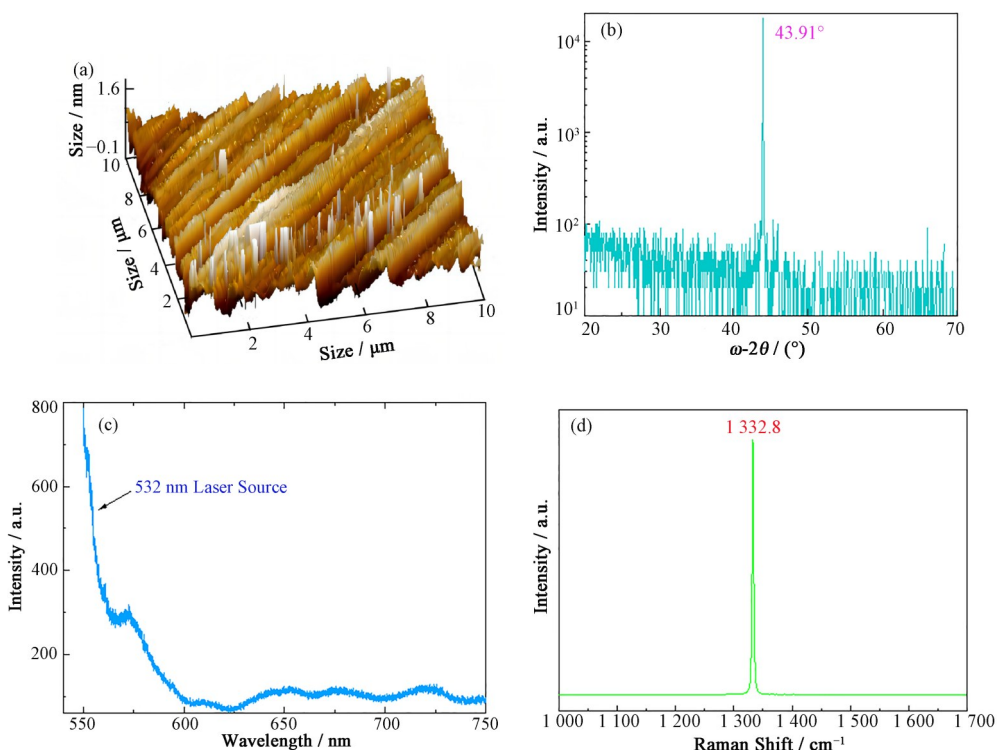


图1 单晶金刚石材料表征 (a) 表面粗糙度, (b) X射线衍射图, (c) 光致发光谱, (d) 拉曼光谱

Fig.1 Materials characterization of SCD

(a) Surface roughness, (b) X-ray diffraction pattern, (c) Photoluminescence spectrum, (d) Raman spectrum

材料表征之后,进行了金刚石探测器的制备。探测器整体结构设计为氧终端型MSM结构。首先对单晶金刚石材料进行了预处理,浓度为98%的浓硫酸及浓度为70%的双氧水1:1比例的混合液作为氧化剂,浸泡 30 min ,直至材料表面无气泡产生。这样做的目的,一方面是去除金刚石表面的石墨相及材料磨抛过程中引入的金属杂质,另一方面是在材料表面形成氧终端。预处理完成后,将材料取出用丙酮及酒精清洗干净。紧接着进行探测器电极制备,为了形成更好的欧姆接触,采取光刻及电子束蒸发的方式在探测器上下表面制备了面积为 $3.5\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ 的钛/金(Ti/Au)金属电极,厚度分别为 $40\text{ nm}/300\text{ nm}$ 。实物如图2(a)所示。然后,将镀完电极的材料利用少量环氧树脂固定在专门设计双面开孔的印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)上,

正面直接打线至阳极,背面通过通孔打线至阴极。最后,将其放置在专门设计的具有电磁屏蔽功能的金属保护外壳中。如图2(b)所示,所制备的探测器外壳和PCB板前后都有入射窗,适用于多种粒子同时测量。

2 探测器性能测试

2.1 暗电流测试

在室温条件下对所制备探测器及MICRON探测器进行 I - V 及 C - V 特性的测试,使用仪器为Keithley 4200半导体参数测试分析仪。测试过程中,将探测器放置在外接的电磁屏蔽盒中, I - V 特性测试电压扫描范围为 $-150\sim+150\text{ V}$,扫描步长为 5 V ,每个扫描电压下时间设置为 600 s ; C - V 特性测

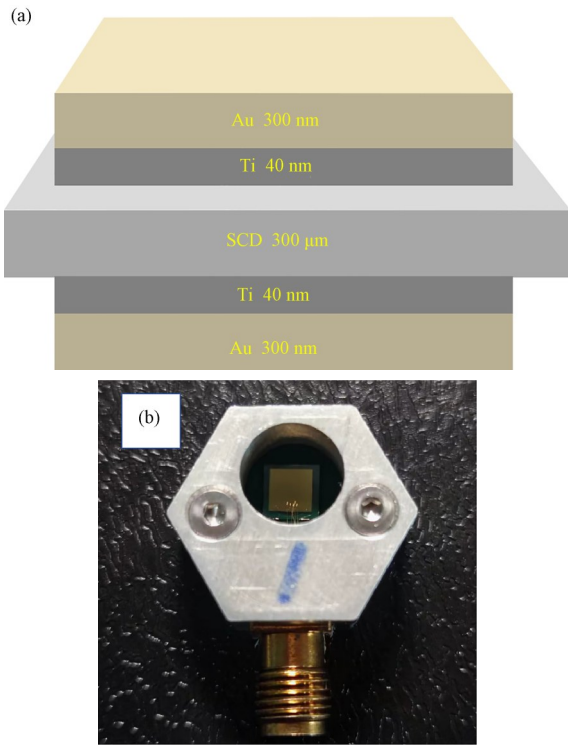


图2 SCD探测器结构示意图(a)及制备的金刚石探测器照片(b)

Fig.2 Structure diagram of SCD detector (a) and the snapshot of fabricated diamond detector in this study (b)

试电压扫描范围为 $-30 \sim +30$ V, 扫描步长为 0.5 V, 频率为 1 MHz。暗电流及 C - V 特性结果如图3所示。

从图3测试结果可知, 所制备的金刚石探测器在 150 V偏压下、电场强度为 $0.5 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时, 室温下暗电流密度仅为 $0.26 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。MICRON探测器在 $0.3 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时, 暗电流密度为 $34.04 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。 I - V 测试结果表明, 制备的金刚石探测器暗电流极低, 即使工作在室温, 也具有相当低的暗电流水平。MSM结构单晶金刚石探测器本身可以被认为是一个平行板电容器, 从 C - V 测试可知, 制备的探测器电容为 0.19 pF , 接近金刚石材料电容理论值。

2.2 电荷收集效率与能量分辨率

探测器电荷收集效率与能量分辨率是衡量探测器性能优劣的关键指标。本研究采用 ^{238}Pu α 源对所制备的单晶金刚石探测器进行了能量分辨率测试。使用百分之百硅探测器对比法测量了金刚石探测器的电荷收集效率, 因硅探测器工艺相对成熟, 该方法假设硅探测器电荷收集效率为 100% 。收集效率计算公式如式(1)。

$$\eta_{\text{Dia}} = \frac{P_{\text{Dia}} \cdot \varepsilon_{\text{Dia}}}{P_{\text{Si}} \cdot \varepsilon_{\text{Si}}} \quad (1)$$

式中: ε_{Dia} 和 ε_{Si} 分别是金刚石和Si探测器的平均电离能, 分别取 13.1 eV 和 3.67 eV ; P_{Dia} 和 P_{Si} 分别是两种

探测器的能谱峰位道址。搭建测试系统如图4(a)所示, 将金刚石探测器和 ^{238}Pu α 源置于真空腔室内, 以减少 α 粒子在空气中的能量损失, 通过ORTEC 142AH型电荷灵敏前置放大器对信号放大成形, CAEN Hexagon型数字多道分析仪用于为前置放大器提供必要的工作电压(12 V)以及为探测器加偏压(150 V), 还对前置放大器输出信号进行采集, 后端上位机上搭配Quantus软件进行信号的数字梯形滤波成型和能谱测量及分析。能谱测量结果如图4(b)所示。

对上述能谱进行拟合得到峰位道址, 代入式(1)中计算可知, 对于电子和空穴, 制备的单晶金刚石探测器的电荷收集效率分别为 98.9% 和 99.2% , 能量分辨率分别 2.54% 和 2.86% 。

2.3 γ 剂量率响应

由于 γ 射线的穿透能力强, 而金刚石探测器灵敏体积小, 无法直接进行能谱测量。在 γ 射线测量方法上, 金刚石探测器有脉冲和电流两种工作模式。两种工作模式都有其侧重点。

脉冲型是指将不断进入探测器的粒子产生的脉冲信号彼此分开, 把它们当作单个信号进行处理, 其优点是灵敏度高, 且可以给出时间、能量等多种信息, 缺点则是大量粒子到来时, 由于脉冲的饱和堆积导致其探测上限不够高。

电流型则是指测量大量粒子产生的平均电流, 电流型探测器通常用于大剂量的监测和反应堆控制等方面, 这种工作模式的优点是探测上限高, 缺点则是由于探测器本身存在由热激发载流子引起的暗电流, 导致使其灵敏度低于脉冲工作模式, 且精度较低。

对制备的金刚石探测器及英国MICRON探测器进行了两种工作模式下的 ^{60}Co γ 射线剂量率响应研究。脉冲型剂量率响应研究选取的测试系统包含 ^{60}Co γ 放射源、金刚石探测器、CAEN A1425快时间电荷灵敏前置放大器、CAEN DT5519EM高压电源、GW1016型定标器、数字示波器。相关试验在防化研究院 γ 刻度室进行, 可提供测试剂量率范围为 $0.0002 \sim 64 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。测试过程中, 探测器偏置电压为 150 V , 通过对定标器设置合理的阈值(20 mV), 计数信号的同时不会记录到噪声, 定标器每次记录 10 s 内的脉冲计数, 同一剂量率下测 10 次, 取其平均值。对于脉冲型金刚石探测器相应研究选取的测试点选择分别为 $0.0002 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.0013 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.0026 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.0052 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.01 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1.5 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $2 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $5 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $10 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

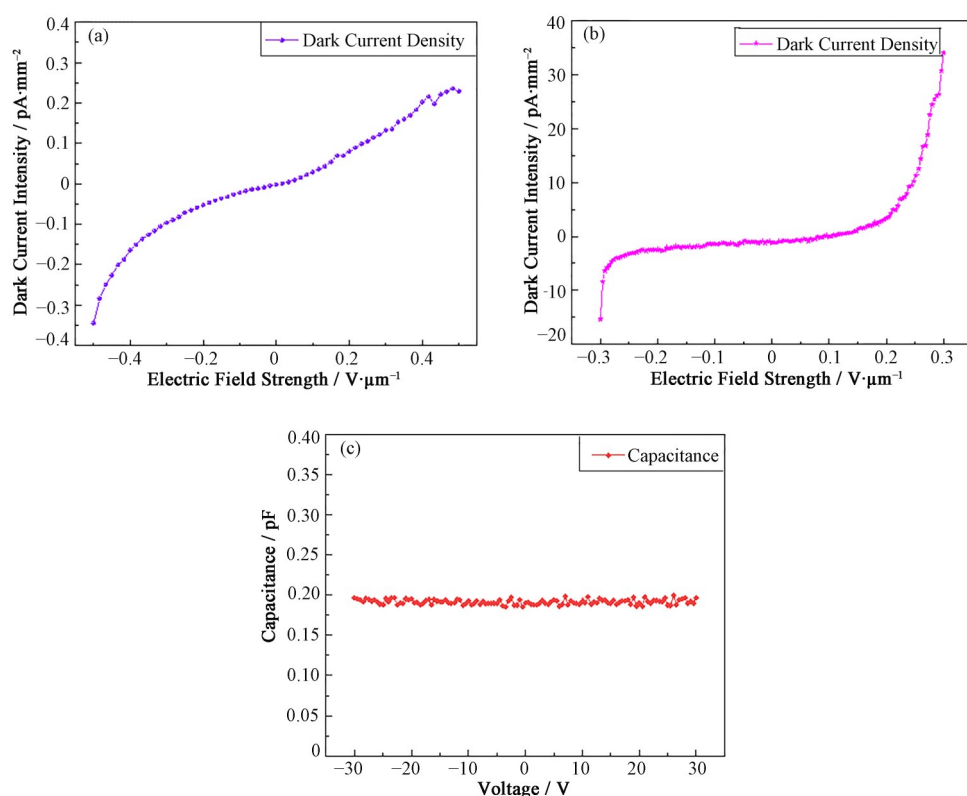
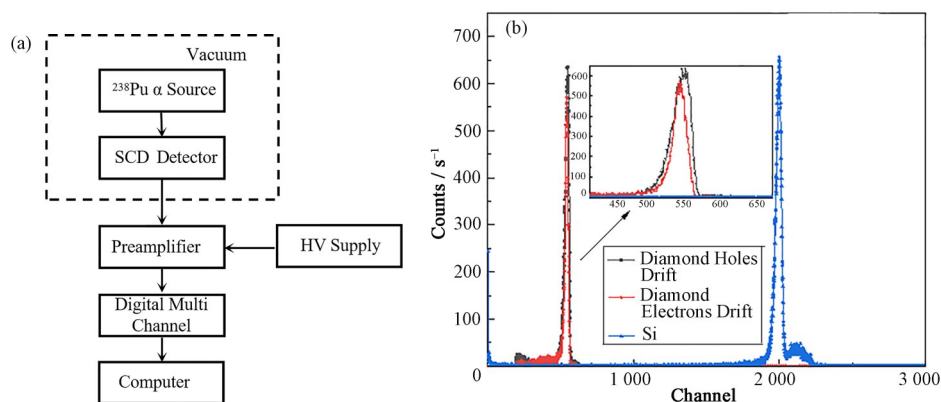


图3 单晶金刚石探测器的电学特性曲线

(a) 制备探测器的 I - V 特性, (b) MICRON 探测器的 I - V 特性, (c) 制备探测器的 C - V 特性Fig.3 Electrical characteristics of single crystal diamond detectors (a) I - V characteristics of fabricated detector in this study, (b) I - V characteristics of MICRON detector, (c) C - V characteristics of fabricated detector in this study图4 ^{238}Pu α 响应谱测试系统框图(a)及能谱测试结果(b)Fig.4 Block diagram of ^{238}Pu α response spectrum testing system (a) and energy spectrum test results of energy spectrum (b)

15 Gy·h⁻¹、20 Gy·h⁻¹、30 Gy·h⁻¹、40 Gy·h⁻¹、50 Gy·h⁻¹、60 Gy·h⁻¹、64 Gy·h⁻¹, 共覆盖 6 个数量级。对定标器采集到的数据处理后得到计数率随剂量率的关系图, 拟合后结果如图 5 所示。

制备的探测器在 0.001 3~64 Gy·h⁻¹ 剂量率下展现了非常优异的线性相关, 拟合结果显示, 其线性相关度达到 99.98%。同时探测器的响应下限为 0.001 3 Gy·h⁻¹, 探测器响应上限受实验条件限制, 后

将继续研究。MICRON 探测器响应下限为 0.005 2 Gy·h⁻¹, 线性相关性为 99.75%。

同时为了研究金刚石探测器的抗辐射特性, 对制备的探测器进行了长时间、高累积剂量测试。剂量率点选择为 30 Gy·h⁻¹, 连续测量时间 9 h, 观察探测器计数率随累积剂量变化情况, 得到的结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 累积剂量达到 270 Gy 时, 探测器性能并无衰退, 且由于 priming 效应(即辐照

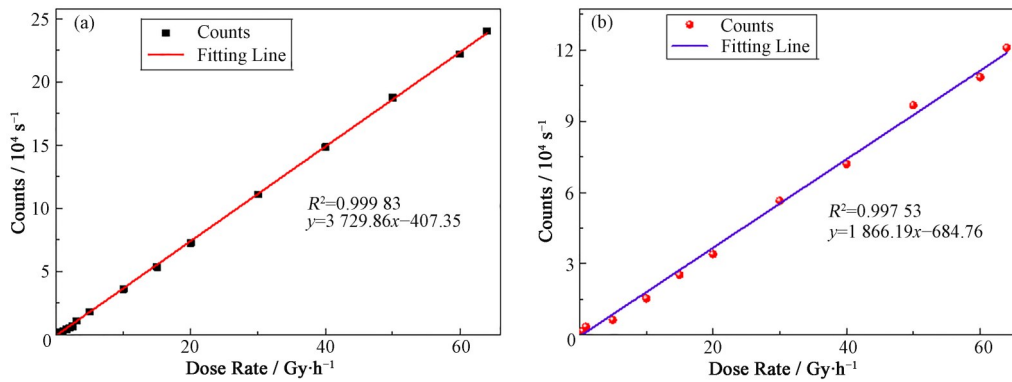


图5 金刚石探测器计数率随 γ 剂量率变化关系 (a) 制备的探测器, (b) MICRON探测器
Fig.5 Relationship between the count rate of SCD detector and the γ dose rate
(a) Fabricated detector in this study, (b) MICRON detector

诱导的陷阱态钝化)的存在,性能略有提升,但探测器随着测试时间增长,极化效应的存在使得探测器内部产生相反的电场,使得有些累积剂量下探测器计数出现下降情况,整个辐照过程探测器计数率波动在7.1%以内。

使用6517B静电计开展了探测器电流型工作模

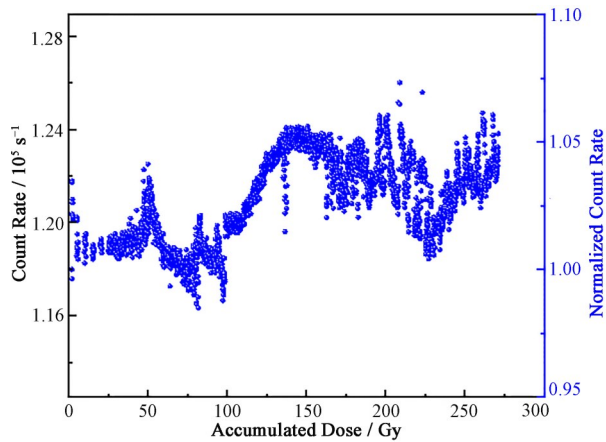


图6 金刚石探测器计数率随累积剂量的变化
Fig.6 Variation of the count rate of the diamond detector with cumulative dose

式下 γ 射线响应研究。测试方法为记录单晶金刚石探测器在150 V恒定电压下对应不同剂量率 γ 射线时扣除本底暗电流后探测器响应电流的变化。对于电流型金刚石探测器研究选取的测试点选择分别为0.000 2 Gy·h⁻¹、0.005 Gy·h⁻¹、0.05 Gy·h⁻¹、0.2 Gy·h⁻¹、0.3 Gy·h⁻¹、0.5 Gy·h⁻¹、5 Gy·h⁻¹、15 Gy·h⁻¹、35 Gy·h⁻¹、64 Gy·h⁻¹,从0.000 2~64 Gy·h⁻¹涵盖6个数量级。对采集到的响应电流数据处理后得到响应电流随剂量率的变化关系图,拟合后结果如图7所示。

研究发现,制备的SCD探测器电流型响应下限为0.2 Gy·h⁻¹。MICRON探测器响应下限为0.3 Gy·h⁻¹。制备的SCD探测器灵敏度优于商用MICRON探测器,可能原因有以下几个方面:从单晶金刚石材料上来看,制备的SCD探测器所选用材料缺陷密度低于MICRON探测器;探测器制备工艺及电极材料的选择上优于MICRON探测器,制备的探测器电极材料与金刚石材料接触更为紧密。后续将进行更为详细的研究。

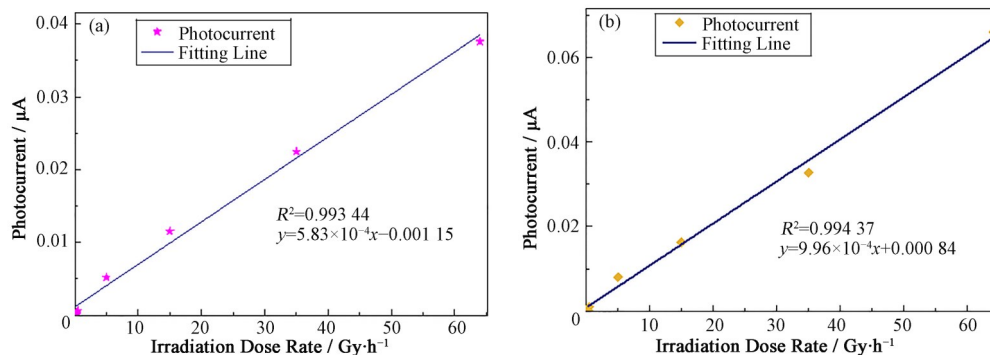


图7 探测器响应电流随 γ 剂量率的变化 (a) 制备的探测器, (b) MICRON探测器
Fig.7 Variation of SCD detector photocurrent with irradiation γ dose rate
(a) Fabricated detector in this study, (b) MICRON SCD detector

3 结语

本文成功制备了单晶金刚石辐射探测器并重点对探测器的 γ 射线响应进行研究,发现所制备探测器在脉冲工作模式及电流工作模式下表现出极佳的线性响应。制备的SCD探测器在低剂量率下灵敏度优于英国MICRON探测器。由于金刚石材料具有较好的组织等效特性,在医用辐射剂量学方面具有很大应用潜力,未来将继续进行金刚石探测器脉冲计数型及电流型响应上限的研究。

作者贡献声明 王利斌负责实验设计、实验数据分析、论文初稿撰写;张逸韵、黄广伟、马志海、席善学负责本文工作中的文献查阅、实验测试与总结;吴坤、赵鑫作为放射性实验安全员参与了本项工作;宋玉收、周春芝、李海俊、刘辉兰对文章进行了统筹修改与指导,并对文章的撰写提供了积极意见。全体作者均已阅读并同意最终文本。

参考文献

- 1 Girolami M, Bellucci A, Calvani P, *et al.* Mosaic diamond detectors for fast neutrons and large ionizing radiation fields[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2015, **212**(11): 2424 - 2430. DOI: 10.1002/pssa.201532191.
- 2 Shimaoka T, Koizumi S, Kaneko J H, *et al.* Recent progress in diamond radiation detectors[J]. *Functional Diamond*, 2021, **1**(1): 205 - 220. DOI: 10.1080/26941112.2021.2017758.
- 3 Tsubota M, Kaneko J H, Miyazaki D, *et al.* High-temperature characteristics of charge collection efficiency using single CVD diamond detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, **789**: 50 - 56. DOI: 10.1016/j.nima.2015.04.002.
- 4 Periale L, Bizzaro S, Gervino G, *et al.* CVD diamond sensor for UV-photon detection[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, **695**: 276 - 278. DOI: 10.1016/j.nima.2011.10.047.
- 5 Freund A K. Diamond single crystals: the ultimate monochromator material for high-power X-ray beams[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(2): 432. DOI: 10.1117/12.195195.
- 6 Trucchi D M, Allegrini P, Calvani P, *et al.* Very fast and primingless single-crystal-diamond X-ray dosimeters[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, **33**(4): 615 - 617. DOI: 10.1109/LED.2012.2185476.
- 7 崔莹, 汪启胜, 黄胜, 等. 穿透型金刚石 X 射线位置灵敏探测器及其在同步辐射光束线上的应用[J]. *核技术*, 2016, **39**(7): 070101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.070101.
- 8 CUI Ying, WANG Qisheng, HUANG Sheng, *et al.* Transmission-mode diamond X-ray position sensitive detector and its applications in synchrotron radiation beamlines[J]. *Nuclear Techniques*, 2016, **39**(7): 070101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.070101.
- 9 Williams T, N'Diaye C, Breton D, *et al.* Operation of a fast diamond γ -ray detector at the HI γ S facility[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, **830**: 391 - 396. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.014.
- 10 Cirrone G A P, Cuttone G, Lo Nigro S, *et al.* Dosimetric characterization of CVD diamonds irradiated with 62 MeV proton beams[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, **552**(1 - 2): 197 - 202. DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.031.
- 11 Rebai M, Cazzaniga C, Croci G, *et al.* Pixelated single-crystal diamond detector for fast neutron measurements [J]. *Journal of Instrumentation*, 2015, **10**(3): C03016. DOI: 10.1088/1748-0221/10/03/c03016.
- 12 刘金龙, 朱肖华, 郭彦召, 等. 金刚石探测器材料研制与中子探测性能研究[J]. *真空电子技术*, 2021(5): 46 - 53, 72. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2021.05.06.
- 13 LIU Jinlong, ZHU Xiaohua, GUO Yanzhao, *et al.* Material development and neutron detection performance of diamond detector[J]. *Vacuum Electronics*, 2021(5): 46 - 53, 72. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2021.05.06.
- 14 Miyake T, Nakagawa H, Masuzawa T, *et al.* Diamond radiation detector with built-In boron-doped neutron converter layer[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2022, **219**(3): 2100315. DOI: 10.1002/pssa.202100315.
- 15 黄广伟, 吴坤, 陈晔, 等. 单晶金刚石探测器对 14 MeV 单能中子的响应[J]. *物理学报*, 2021, **70**(20): 40 - 46. DOI: 10.7498/aps.70.20210891.
- 16 HUANG Guangwei, WU Kun, CHEN Ye, *et al.* Response to 14 MeV neutrons for single-crystal diamond detectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, **70**(20): 40 - 46. DOI: 10.7498/aps.70.20210891.
- 17 任欢, 张志宏, 夏晓彬, 等. 金刚石中子探测器结构的模

- 拟研究[J]. 核技术, 2023, **46**(7): 070403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070403.
- REN Huan, ZHANG Zhihong, XIA Xiaobin, *et al.* Simulation study on the structure of diamond neutron detectors[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(7): 070403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070403.
- 15 Sato H, Yamaguchi A, Maida O, *et al.* Survey meter combining CVD diamond and silicon detectors for wide range of dose rates and high accumulated doses[J]. Radiation Measurements, 2012, **47**(4): 266 - 271. DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.02.011.
- 16 Brambilla A, Tromson D, Aboud N, *et al.* CVD diamond gamma dose rate monitor for harsh environment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, **458**(1 - 2): 220 - 226. DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00865-2.
- 17 Baranova M A, Boyko A V, Chebyshev S B, *et al.* Development of wide-ranged diamond-based detector unit for gamma radiation measurement[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, **675**(4): 042003. DOI: 10.1088/1742-6596/675/4/042003.
- 18 Pompili F, Esposito B, Marocco D, *et al.* Radiation and thermal stress test on diamond detectors for the Radial Neutron Camera of ITER[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **936**: 62 - 64. DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.110.
- 19 Xue J L, Hou Q F, Niu L M, *et al.* Silicon substrate diamond film detector for gamma dose rate measurement in a high radiation environment[J]. Diamond and Related Materials, 2022, **121**: 108752. DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108752.
- 20 王子业, 高飞, 王菲菲, 等. 金刚石探测器脉冲响应特性实验研究[J]. 同位素, 2024, **37**(1): 42 - 48. DOI: 10.7538/tws.2023.youxian.063.
- WANG Ziyue, GAO Fei, WANG Feifei, *et al.* Experimental study of the impulse response of a diamond detector[J]. Journal of Isotopes, 2024, **37**(1): 42 - 48. DOI: 10.7538/tws.2023.youxian.063.