

# 面向聚变中子探测的宽禁带半导体探测器 关键问题与研究挑战

苏 凯<sup>1,2</sup>, 张金凤<sup>1,2\*</sup>, 张逸韵<sup>3</sup>, 蒋树庆<sup>4</sup>, 郭 辉<sup>1,2</sup>, 张进成<sup>1,2</sup>, 郝 跃<sup>1,2</sup>

- (1. 西安电子科技大学集成电路学部宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 陕西西安 710071;  
2. 西安电子科技大学宽禁带半导体国家工程研究中心, 陕西西安 710071; 3. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;  
4. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900)

**摘 要:** 近年来国际聚变反应研究获得重大进展, 选择抗位移能力强的宽禁带半导体探测器是推动聚变研究的关键技术之一. 金刚石超宽禁带半导体具备卓越抗辐照和时间响应等特性, 是聚变诊断特别是高能中子诊断的理想材料, 碳化硅宽禁带半导体也可测量中子, 且大尺寸外延技术更成熟, 可覆盖聚变研究装置上的大规模应用. 通过这两种宽禁带半导体辐射探测器的研究并实现自主可控的高性能器件制备, 将显著提高我国核聚变反应测量系统的性能, 支持我国在未来的全球能源革命中处于领先优势. 本文将对这两种宽禁带半导体探测器在聚变中子探测应用场景下研制的关键问题 and 研究挑战进行探讨, 助力我国聚变能源开发和应用.

**关键词:** 中子探测器; 金刚石; 碳化硅; 能量分辨; 脉冲响应

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.62134006, No.62204193, No.62127812, No.62374122); 国家重点研发计划(No.2022YFB3608600); 中国博士后科学基金(No.2021TQ0256)

**中图分类号:** TN3; TM23; TL814

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)08-2933-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20240293

## Key Issue and Research Challenges of Wide Bandgap Semiconductor Detectors for Fusion Neutron Detection

SU Kai<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-feng<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Yi-yun<sup>3</sup>, JIANG Shu-qing<sup>4</sup>, GUO Hui<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Jin-cheng<sup>1,2</sup>, HAO Yue<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Wide Band-gap Semiconductor Devices and Integrated Technology, Faculty of Integrated Circuit, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;  
2. National Engineering Research Center of Wide Band-gap Semiconductor, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;  
3. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;  
4. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract:** In recent years, significant progress has been made in international fusion reaction research. The neutron detection technology which can meet requirements of nuclear energy systems such as controlled fusion reactors featuring high-energy and high-dose radiation has always been one of the core technologies in fusion research and application. Choosing wide bandgap semiconductor materials with strong radiation hardness to develop radiation detectors is an inevitable requirement for the development of radiation detectors in fusion installation. Diamond has excellent radiation hardness and ultra-fast time response, and is considered an ideal semiconductor material for fusion detection, especially for high-energy neutron diagnosis. Silicon carbide is also qualified to directly measure fusion neutrons, and its large-size epitaxial growth technology is quite mature. Large-area and highly sensitive neutron detectors prepared using silicon carbide can cover large-scale applications in fusion research installation. By studying these two types of wide bandgap semiconductor radiation detectors and achieving completely self-dependent preparation of high-performance devices, we can significantly improve the performance of China's nuclear fusion reaction measurement systems, and support China standing at the leading edge in the future global energy revolution. Therefore, this article will elaborate on the key issues and research challenges in the devel-

opment of these two wide bandgap semiconductor detectors in the application scenarios of fusion neutron detection, to assist in the development and application of fusion energy in China.

**Key words:** neutron detector; diamond; silicon carbide; energy resolution; pulse response

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62134006, No.62204193, No.62127812, No.62374122); National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3608600); China Postdoctoral Science Foundation (No.2021TQ0256)

## 1 引言

金刚石与碳化硅具备禁带宽度大、抗位移能力强、载流子迁移率高、介电常数及暗电流小等优异特性,已经成为当前高性能半导体辐射探测器发展的前沿方向,在辐射能谱测量、剂量监测、脉冲甄别等方面展现了突出的性能,相比传统气体、闪烁体、高纯锗,以及硅基等辐射探测器,其抗辐照性能、脉冲响应速度,以及恶劣环境生存能力等皆有极大提升,十分适合极端环境下的强辐射场测量<sup>[1]</sup>. 受控热核聚变能源是解决全球能源问题的重要途径,目前国际上直接瞄准氦氘(DT)热核聚变的装置建设全面开花,技术路线涵盖磁约束聚变(Magnetic Confinement Fusion, MCF)、惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF,分为激光和Z箍缩)等多种途径. 在磁约束聚变方面,我国一方面参与建设了国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER),预计在2025年完成首次等离子体实验,进而证明大规模可控聚变的可行性;另一方面自2011年起开始论证建设中国聚变工程试验堆(China Fusion Engineering Testing Reactor, CFETR),在获得主要磁聚变科学目标的同时,还需要实现所有关键技术的自主可控<sup>[2]</sup>. 在惯性约束聚变方面,美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)已在实验室创造出十分逼近氦氘点火的氦氘等离子体温度、密度和约束时间三大条件,并在2022—2024年重复实现了聚变反应的净能量增益<sup>[3,4]</sup>. 依据国际聚变研究趋势判断,氦氘点火已临近突变点. 中国工程物理研究院建设了世界上输出能力第二的神光Ⅲ大型激光装置<sup>[5]</sup>,在极端条件下高能量密度物理领域等前沿问题研究中取得了诸多突破性进展,为实现激光约束聚变能源奠定了基础. 国际上Z箍缩惯性约束有望近期在Z装置上实现约100 kJ的DT聚变等效产额演示,我国也建设了聚龙一号装置等大型Z箍缩装置<sup>[6]</sup>,探索实现聚变的物理问题. 基于Z箍缩的聚变裂变混合堆演示装置建设即将在四川落地,推进聚变能源的尽快利用.

辐射探测器一直是聚变研究和应用的关键核心技术之一,尤其是中子探测技术是研究等离子体聚变反应最重要的诊断手段之一. ITER装置针对聚变产物,包括中子以及约束/逃逸 $\alpha$ 粒子的测量计划发展了相应

的诊断系统,主要包括径向和垂直中子相机,内部、外部和偏滤器区域的中子通量监视器、中子活化系统、中子光谱和 $\gamma$ 射线谱仪. 在ITER等大型磁约束聚变装置上,中子诊断系统面临的主要挑战是需要很宽的动态范围内进行可靠和精确的中子探测. 中子辐射率从氦氘运行时的 $10^8$  n/s可上升到氦氘反应时的 $10^{20}$  n/s,后者比现有的中子标定源的强度高出大约十个数量级. 在如此大的动态范围内,ITER要求中子诊断提供的聚变产出及其相应的时间演化信息的测量精度为偏差10%以下,并且探测器不应出现明显的性能退化导致标定精度降低. 传统使用的硅基半导体辐射探测器在中子探测应用中表现出的一个致命缺点是抗辐照能力有限、响应速度较慢、暗电流较大,在强中子辐照环境下生存能力不佳,性能衰减较快,需要比较频繁地更换. 因此,选择抗位移能力强、耐高温、暗电流小的宽禁带半导体金刚石和碳化硅材料研制辐射探测器,是聚变装置辐射探测器发展的必然要求.

超宽禁带半导体金刚石拥有卓越的抗辐照性能,被认为是用于聚变产物特别是高能中子诊断最理想的半导体探测器材料,ITER或CFETR上均计划采用金刚石探测器替代硅探测器. 金刚石具有极低的本征载流子浓度和很高的击穿场强,室温下高纯金刚石电阻率高达 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ,可获得pA级的暗电流. 金刚石原子序数低,具有较强的 $n/\gamma$ 比,非常适合中子能谱测量. 磁约束聚变等离子体内聚变功率分布使用发射率分布诊断系统获取,由多路准直的中子测量阵列组成. 金刚石探测器由于抗辐照能力强、可直接获取中子能谱的特点,现已应用在托卡马克装置的聚变中子能谱诊断当中,ITER也将金刚石探测器作为下一代中子相机的备选探测器之一<sup>[7]</sup>. 惯性约束聚变关注的内爆压缩和聚变点火燃烧过程会发射大量超快X射线和超快中子,发射时间为100 ps量级;同时,大部分用于聚变产物和X射线诊断的辐射探测器要在 $10^{12} \sim 10^{17}$ 中子产额状态下正常工作,这就对探测器的响应速度和抗辐照能力提出了极高的要求. 金刚石探测器可以在强辐射、高偏置电压下以极高的载流子输运特性和时间响应速度工作,非常适合瞬态脉冲辐射场测试. 在NIF和神光Ⅲ装置用于离子温度测量的飞行时间谱仪、中子、X光发射峰值测量中,金刚石探测器都发挥了重要

作用<sup>[8]</sup>.

由于大型磁聚变装置等离子体的体积已经接近 1 000 m<sup>3</sup>, 未来中子相机水平和垂直探测器通道会增加数十路的规模, 大范围使用金刚石探测器成本较高. 碳化硅(SiC)也是典型的宽禁带半导体材料, 耐压和抗辐照特性好, SiC 探测器已验证可直接测量聚变中子<sup>[9]</sup>. 而且, 大尺寸 SiC 外延材料生长技术已比较成熟, 可制备探测器的灵敏面积比金刚石大得多(碳化硅为平方厘米级对比金刚石平方毫米级). 因此, SiC 可制备大尺寸的高灵敏度中子探测器, 覆盖磁聚变研究装置上的大规模应用. 通常磁聚变等离子物理现象的时间尺度在数十毫秒的量级, 对于高强度、短时间尺度的中子探测, 探测器的高计数率能力是至关重要的. SiC 经验证可在 1 MHz 高计数率条件下测量聚变等离子体快中子能谱. 另外, SiC 辐射探测器主流结构为 PIN 和肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)结构, 具备耐辐照、灵敏区厚度可调的优势, 非常有利于实现低背景噪声的重粒子探测. 研制满足现阶段国内磁聚变研究中子诊断需求和未来 ITER 需求的 SiC 中子探测器, 对磁约束聚变中子诊断具有现实意义和科学研究价值.

## 2 研究进展与关键问题

### 2.1 金刚石辐射探测器

金刚石辐射探测器对聚变中子进行探测的基本原理是利用中子与物质的核反应产生次级带电粒子, 从而通过次级带电粒子的电离效应产生电信号进行测量. 对于热中子等低能中子, 金刚石无法直接与其发生核反应, 通常需要在探测器表面涂覆核素转化层, 中子入射转化层后发生核反应, 产生的带电粒子进入金刚石探测器发生电离后实现中子探测, 常用的转化层材料为 <sup>6</sup>LiF, 其对热中子的反应方程为 <sup>6</sup>Li(n, α)T, 生成的 T 和 α 粒子能量分别约为 2.73 MeV 和 2.08 MeV. 对于如快中子的高能中子, 则可直接与碳元素发生核反应, 探测利用的反应方程通常为 <sup>12</sup>C(n, α)<sup>9</sup>Be, 产生的 α 和 <sup>9</sup>Be 总能量  $E_{\alpha+Be} = E_n - 5.7$  (MeV), 其中,  $E_n$  为入射的快中子能量<sup>[1]</sup>.

化学气相沉积法(Cheical Vapor Deposition, CVD)制备金刚石技术的快速发展, 使得超高纯、低缺陷、大尺寸、低成本的金金刚石单晶片的获取成为可能, 为金刚石辐射探测器的研制奠定了良好的基础. 由于金刚石体掺杂在室温下难以激活, PN 结型、PIM 肖特基型金刚石辐射探测器性能较差且研究少, 国际主流的金金刚石探测器结构一直是金属-本征半导体-金属(Metal-Semiconductor-Metal, MSM)匀质体电导型结构. 欧洲核子中心(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN)在大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)

上装配了金刚石探测器, 目前已经稳定工作了超过 10 年, 承受了高达 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup> 质子辐照、3×10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup> 中子辐照, 以及 250 Mrad 的光子辐照, 初步验证了此类器件性能. 金刚石探测器由早期的电荷收集效率(Charge Collection Efficiency, CCE)约 20%~33% 发展到现在, 已实现 CCE 值可达接近 100% (理论极限), 对 α 粒子的最佳能量分辨率约为 0.3%<sup>[10]</sup>, 快中子的 <sup>12</sup>C(n, α)<sup>9</sup>Be 峰的最佳能量分辨率约为 1.5%. 脉冲响应上升时间也由 2009 年的 400 ps 达到当前的 186 ps, 已运用于飞行时间中子解谱. 当前金刚石探测器的发展态势如下.

首先, 探测器级金刚石材料生长制备和选型的方法还不够成熟. 高温高压(High Pressure High Temperature, HPHT)法制备的金刚石杂质浓度高, 并不适合探测器级器件的应用; CVD 技术虽然在高纯、低缺陷的材料生长方面更具优势, 但金刚石中的痕量材料缺陷包括杂质和位错等通常表现为散射中心、陷阱以及深能级复合中心, 对与探测器电荷收集效率密切相关的载流子迁移率寿命积影响极大; 位错形成的漏电通路还会增大器件噪声, 引起器件过早失效<sup>[11]</sup>. 国际上从反应气体杂质耦合机制、生长工艺参数优化、衬底质量优化与预处理等方面研究了超高纯 CVD 金刚石的生长方法以及位错等缺陷的控制方法. 然而, 金刚石中痕量杂质的耦合机制还不明确, 不能有效地指导超高纯单晶金刚石材料生长, 杂质(如氮、硅等)的控制性生长还需要继续突破关键技术; CVD 金刚石生长过程中的位错产生和湮灭机理还不明晰, 导致材料质量和品控能力距离产业应用需求差距较大. 此外, 辐射探测器的测试成本和测试安全要求很高, 因此能够事先检测出金刚石材料是否符合探测器需求非常重要. 然而目前国际上还没有建立探测器级金刚石材料的专门、精准、快速的材料无损表征方法体系和选型指南.

其次, 探测器结构和工艺方面, 电极的制备仍然需要优化<sup>[12]</sup>. 高纯金刚石上形成金半欧姆接触非常困难, 非欧姆接触导致的界面极化会使得电荷收集在临近界面处发生困难, 从而降低器件的 CCE, 加之界面的陷阱效应, 容易发生电子与空穴收集的非对称特性. 为了改善界面极化带来的问题, 国际上已报道过多层 TiC/Pt/Au 结构, 类金刚石碳(Diamond-Like Carbon, DLC)层结构, 脉冲激光沉积接触, 氧化石墨烯/Au 电极、单质及复合金属等多种电极结构; 西安电子科技大学也提出了表面终端调控探测器新结构, 以电极材料结合不同的金刚石表面终端特性进行双维度控制, 并取得了国际先进的器件指标水平<sup>[10, 12]</sup>.

再次, 非理想效应研究仍需深入. 金刚石探测器中的体极化、界面极化、辐射诱导极化效应, 以及 priming/pumping 效应对器件性能影响严重, 虽然整体上都可以

用材料缺陷、界面陷阱态等去解释,但是由于金刚石材料中缺陷类型多样,痕量缺陷对器件性能影响极大,目前还没有成熟的理论解释上述问题.现阶段已报道的金刚石辐射探测器的CCE与能量分辨率参数离散化严重,高性能器件依然占比很低;起源于金刚石晶格缺陷和表/界面缺陷的陷阱俘获/释放过程会引起脉冲探测失真,影响脉冲测量.

总而言之,在金刚石辐射探测器领域,国内的总体研究应用水平与国际水平还有较大的差距.国内对金刚石辐射探测器的研究还是以测量性研究为主<sup>[13]</sup>,在“探测器”级材料生长、材料筛选技术、响应机理、高性能器件研制等方面更是鲜有报道,还需针对性地进行深入研究.

## 2.2 碳化硅辐射探测器

碳化硅辐射探测器对 neutron 测量的原理与金刚石类似,其对快中子的响应包含了<sup>28</sup>Si和<sup>12</sup>C的中子核反应两种,当中子能量大于6.4 MeV时,考虑到反应截面和探测信号强度,探测时利用的最为重要的反应方程依然为<sup>12</sup>C(n,α)<sup>9</sup>Be<sup>[1]</sup>.随着非故意掺杂外延型及高纯半绝缘型SiC材料的商品化以及器件工艺(如氧化、金属-半导体接触、掺杂和封装等)的日渐成熟,SiC辐射探测器的制备、探测能力以及损伤和性能退化情况都有了一些研究.SiC辐射探测器主要是PIN或SBD结构.实验结果表明SiC中子探测器比传统硅探测器具有更好的抗辐射、高温工作以及中子/γ射线分辨能力,已实现对快中子的<sup>12</sup>C(n,α)<sup>9</sup>Be峰的能量分辨率小于3%.在反应堆功率范围监测、硼俘获中子治疗中的中子监测、隐藏核材料检测、乏燃料监测等方面均有相关研究报道.西安电子科技大学与中国工程物理研究院核物理与化学研究所合作,成功实现PIN结构SiC辐射探测器对中子的高性能探测<sup>[14]</sup>,对氦气中子探测能谱的<sup>12</sup>C(n,α)<sup>9</sup>Be特征峰能量分辨率约为2.4%.

SiC辐射探测器性能提升的首要问题在于结构仍需优化,要实现体电场峰值优化与耗尽层厚度匹配.体电场峰值优化主要以终端结构设计提升器件耐压,保证SiC辐射探测器高压工作可靠性并提高能量分辨率;耗尽层厚度匹配则是为了实现耗尽层对粒子射程的覆盖,从而使辐生载流子的收集效率最大化.然而这些基于传统二极管结构的设计优化中,增厚耗尽层只能通过降低外延层非故意掺杂浓度或者提升工作反偏电压获得,极低的非故意掺杂浓度工艺可控性差,提升工作反偏电压又将恶化器件表面及结区附近的电场峰值,加剧电场不均匀分布,这些问题将不利于高能中子探测过程中产生的高浓度辐生载流子的分离与收集.SiC外延材料质量也会显著影响辐生载流子的产生、运输

和收集,从而恶化SiC辐射探测器的探测性能,但目前SiC辐射探测器的结构优化设计,并没有针对核辐射探测发展出能够进一步弱化材料质量因素影响的新型结构.

在SiC辐射探测器的电极研究方面,镍是常用的固相化接触电极材料,含铝合金是液相化接触电极方案.对于镍基材料,高能/剂量中子辐射容易引起金属活化,对探测器的稳定性维护和人员安全产生重大影响;含铝合金表面形貌差,欧姆层覆盖和厚度一致性均存在较大问题,严重制约探测器的欧姆特性和粒子入射均匀性.因此,传统金属接触方案并不完全适用于新一代聚/裂变堆中子监测用探测器的制备,需对阻值低、一致性好、抗活化的接触电极方案进行深入研究.

在SiC探测器辐照效应研究方面,主要问题是不同辐照类型与剂量下探测器件的电学特性与辐射探测性能退化.电学特性方面,辐照退化主要表现在正向、反向I-V特性的漂移以及有效掺杂浓度降低,其原因一般推断为辐照产生的位移损伤以及金属接触特性的退化;辐射探测性能方面,辐照退化主要表现为α粒子能谱峰质心道址数的下降以及能量分辨率的退化.然而,对于电学特性退化的具体机理缺乏深入细致的研究,对于探测器总体辐照退化中,材料微观缺陷、金半接触和钝化介质的辐照效应有怎样的贡献和相互联系,研究还很少.

## 3 未来研究挑战

为了推动我国聚变科技的研究发展和应用,满足其对抗辐射能力强、响应速度快的高性能中子探测器的迫切需求,实现探测器关键技术自主可控,未来还存在以下研究挑战:

(1)建立探测器级高迁移率寿命积单晶金刚石材料制备和表征方法.重点需要突破制约金刚石材料非平衡载流子迁移率寿命积的关键因素的精准确定和抑制方法,并在外延缺陷密度调控、外延痕量杂质元素调控,以及材料综合表征评价等技术领域进行攻关,并开发出厘米级的大尺寸探测器级材料.

(2)探明金刚石辐射探测器非理想效应产生机制及抑制方法.重点解决金刚石辐射探测器非理想效应的物理成因及对器件性能的影响机理,将材料和新型器件结构的研究紧密耦合,根据器件辐射探测结果中非理想效应的表现,结合材料和器件工艺的表征分析结果,探明器件的非理想效应的来源,突破探测器研制的瓶颈.

(3)揭示金刚石辐射探测器脉冲探测响应机理,确立性能优化方法.重点解决瞬态、强脉冲辐射场下金刚

石辐射探测器响应机制与性能提升,定量分析载流子输运和陷阱俘获/释放过程等影响脉冲响应的机理,构建器件脉冲响应模型,优化器件结构。

(4)深入探索SiC中子探测器辐照效应。重点解决PIN结构SiC中子探测器辐照效应机理,对探测器灵敏区、钝化介质及其界面和金属电极结构及其界面的辐照效应进行综合表征分析,揭示影响探测器性能的关键因素。

(5)实现新型超级结SiC探测器结构及工艺优化。重点解决基于超级结灵敏区的SiC中子探测器体电场调制技术,包括平面型超级结、沟槽型超级结和浮结结构的电学特性,根据结构和工艺研究结果,从性能和工艺难度两方面综合考量,优化探测器结构。

(6)获得新型碳基SiC中子探测器电极的制备方法和机理。重点解决SiC中子探测器的薄碳基电极的可控反应和调控机制,制备具有碳基电极接触的SiC中子探测器,研究满足低阻值、高一一致性、抗活化需求的碳基SiC电极制备新策略。

## 4 总结

聚变能源是研究未来新型能源的新方向,近年来国际聚变反应研究获得重大进展。我国要利用聚变核能,需要实现所有关键技术的自主可控。通过开展宽禁带半导体金刚石和SiC辐射探测器研究,从根本上解决金刚石辐射探测器的材料器件关键问题,突破瓶颈技术,并通过SiC探测器的辐照效应研究,以及新型超级结灵敏区结构和薄碳基电极的研究,提升探测器性能,抑制辐照退化。这两种宽禁带半导体辐射探测器的研究和未来应用,将为我国核聚变反应过程提供自主可控的高性能高可靠辐射探测技术,助力我国的聚变能源开发和应用。

**致谢** 感谢中国人民解放军火箭军工程大学蔡幸福主任给本文提出的参考意见。

## 参考文献

- [1] OBRAZTSOVA O, OTTAVIANI L, KLIX A, et al. Comparing the response of a SiC and a sCVD diamond detectors to 14-MeV neutron radiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(9): 2380-2384.
- [2] 高翔, 万元熙. 磁约束聚变能源的发展机遇与挑战[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 59-65.  
GAO X, WAN Y X. Opportunities and challenges for the development of magnetic confinement fusion energy[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(19): 59-65. (in Chinese)
- [3] ABU-SHAWAREB H, ACREE R, ADAMS P, et al. Achievement of target gain larger than unity in an inertial fusion experiment[J]. Physical Review Letters, 2024, 132(6): 065102.
- [4] SUI Z, LAN K. Driver at 10 MJ and 1 shot/30 Min for inertial confinement fusion at high gain: Efficient, compact, low-cost, low laser-plasma instabilities, beam color selectable from  $2\omega/3\omega/4\omega$ , applicable to multiple laser fusion schemes[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2024, 9(4): 043002.
- [5] MENG G W, SHE J, SONG T M, et al. Theoretical investigations on X-ray transport in radiation transport experiments on the Shenguang-III prototype laser facility[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2022, 7(2): 025901.
- [6] 《强激光与粒子束》编辑部. “聚龙一号”装置荣获国家科技进步一等奖[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(2): 114.
- [7] WEISS C, GRIESMAYER E. Fusion neutron diagnostics with CVD diamond detectors[J]. Fusion Engineering and Design, 2024, 203: 114453.
- [8] BARRIOS M A, MACPHEE A, REGAN S P, et al. X-ray bang-time measurements at the National Ignition Facility using a diamond detector[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10): 10E105.
- [9] KUSHORO M H, ANGELONE M, BOZZI D, et al. Operation of a 250 $\mu\text{m}$ -thick SiC detector with DT neutrons at high temperatures[J]. Fusion Engineering and Design, 2024, 204: 114486.
- [10] SU K, WANG H X, HE Q, et al. A large gain and high resolution diamond radiation detector with Au/hydrogen termination ohmic contact[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(3): 454-457.
- [11] SU K, HE Q, ZHANG J F, et al. Device performance of chemical vapor deposition monocrystal diamond radiation detectors correlated with the bulk diamond properties [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2021, 54(14): 145105.
- [12] SU K, REN Z Y, ZHANG J F, et al. High performance hydrogen/oxygen terminated CVD single crystal diamond radiation detector[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(9): 092104.
- [13] HUANG G W, ZHOU C Z, ZHANG Y Y, et al. A precise measurement of D-T neutrons with a single-crystal diamond detector[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2022, 69(1): 61-67.
- [14] 黄海粟. SiC粒子辐照探测器性能及其性能退化的研究

[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

HUANG H L. Study on Performance and Performance Degradation of SiC Particle Irradiation Detector[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)

### 作者简介



**苏凯** 男, 1988年10月出生, 陕西铜川人. 现为西安电子科技大学集成电路学部副教授. 主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料及器件.

E-mail: ksu@xidian.edu.cn



**张金凤** 女, 1977年9月出生, 陕西铜川人. 现为西安电子科技大学集成电路学部教授、博士生导师, 国家级人才. 主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料及器件.

E-mail: jfzhang@xidian.edu.cn



**张逸韵** 男, 1986年4月出生, 江苏连云港人. 现为中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师, 中国科学院高层次人才. 主要研究方向为氮化镓基等宽带隙及新兴超宽带隙半导体新型光电子器件及半导体探测器.

E-mail: yzhang@semi.ac.cn



**蒋树庆** 男, 1983年7月出生, 四川岳池人. 现为中国工程物理研究院核物理与化学研究所副研究员, 工学博士. 主要研究方向为宽禁带半导体辐射探测器和Z-Pinch物理诊断.

E-mail: jiangshq@aliyun.com



**郭辉** 男, 1978年5月出生, 陕西西安人. 现为西安电子科技大学集成电路学部研究员、博士生导师. 主要研究方向为宽禁带半导体和超宽禁带半导体材料和器件.

E-mail: guohui@mail.xidian.edu.cn



**张进成** 男, 1976年7月出生, 陕西富平人. 现为西安电子科技大学党委常委、副校长、二级教授、博士生导师, 国家级人才. 主要研究方向为宽禁带与超宽禁带半导体材料、器件与集成系统. 中国电子学会会员编号: E190008613M.

E-mail: jchzhang@xidian.edu.cn



**郝跃** 男, 1958年3月出生, 安徽阜阳人. 中国科学院院士, 微电子学家, 全国教书育人楷模. 现为西安电子科技大学教授、博士生导师, 兼任国家自然科学基金委员会信息学部主任, 第九、第十、第十三届全国政协委员和第十一、第十四届全国人大代表. 主要研究领域包括新型宽禁带半导体器件和材料、新型微纳米半导体器件与材料、集成电路可制造性和可靠性理论与方法等. 曾获国家技术发明奖、国家科技进步奖、国家教学成果奖及陕西省最高科学技术奖等.

E-mail: yhao@xidian.edu.cn