

4H-SiC探测器对强激光等离子体下反应产物的测量

浮海娟^{1,2} 王林军¹ 王宏伟² 曹喜光² 刘龙祥² 范功涛² 马余刚²
薛韩^{2,3} 张岳^{2,3} 胡新荣^{2,3}

1(上海大学 材料科学与工程学院 上海 200444)

2(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 研制了一款采用PCB (Printed Circuit Board)板封装、直接信号波形采样引出、用于激光等离子体飞行时间测量的4H-SiC探测器,探测器灵敏面积5 mm×5 mm,灵敏层厚度80 μm,全耗尽电压为350~600 V。利用标准α源和强激光反应产物对4H-SiC的性能进行了测试:标准α源(²²⁸Th, ²²⁶Ra)的能量刻度表明,4H-SiC探测器具有良好的能量线性响应,能量分辨率达到1.19%@7 666.75 keV,具有2~3 ns的快时间响应和飞行时间离子甄别的功能,是用于强激光等离子体反应产物的离子诊断和能量测量的有力工具。

关键词 4H-SiC探测器, 波形采样器, 能量分辨, 飞行时间

中图分类号 O571.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020501

The R&D of 4H-SiC detector for laser plasma products measurement

FU Haijuan^{1,2} WANG Linjun¹ WANG Hongwei² CAO Xiguang² LIU Longxiang² FAN Gongtao²
MA Yugang² XUE Han^{2,3} ZHANG Yue^{2,3} HU Xinrong^{2,3}

1(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

2(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] In laser plasma nuclear physics experiments, products can be measured by pulse shape recording, time-of-flight (TOF) particle discrimination and pulse count rate measurements. However, high-radiation background caused by the strong laser makes strict requirements for detectors. [Purpose] This study aims to develop a 4H-SiC detector for laser plasma products TOF measurement in a high-radiation environment laser field and should detect many particle types with large energy dynamic range and fast time response conditions. [Methods] A new type of TOF 4H-SiC detector was developed using printed circuit board (PCB) board packaging technology with a sensitive thickness of 80 μm and direct waveform digital reading. Experimental tests were conducted to evaluate its performance in particle types detection with large energy dynamic range and fast time response conditions. [Results] The energy resolution was 1.19%@7 666.75 keV at 350~600 V full depletion voltage with standard α source

国家自然科学基金(No.11475245, No.11305239)、国家自然科学基金创新研究群体(No.11421505)、上海光源线站工程(No.1173SRCZ01)、中国科学院战略性先导科技专项B (No.XDB160203)

第一作者: 浮海娟, 女, 1991年出生, 2015年毕业于黑龙江大学, 现为硕士研究生, 实验核物理专业

通信作者: 王林军, E-mail: ljwang@t.shu.edu.cn; 王宏伟, E-mail: wanghongwei@sinap.ac.cn

收稿日期: 2018-03-13, 修回日期: 2018-12-04

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11475245, No. 11305239), National Natural Science Fund for Creative Research Groups (No. 11421505), Shanghai Light Source Beam Line Station Project (No. 1173SRCZ01), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDB160203)

First author: FU Haijuan, female, born in 1991, graduated from Heilongjiang University in 2015, master student, major in nuclear physics

Corresponding author: WANG Linjun, E-mail: ljwang@t.shu.edu.cn; WANG Hongwei, E-mail: wanghongwei@sinap.ac.cn

Received date: 2018-03-13, revised date: 2018-12-04

(^{228}Th , ^{226}Ra). **[Conclusion]** The detector can work well in high intensity laser field with good characters of fast time response 2~3 ns and TOF particle discrimination.

Key words 4H-SiC detector, Waveform digitizer, Energy resolution, TOF

强激光等离子体反应产物在短时间内大量产生,因此要求探测装置具有快速时间响应特性,同时强激光实验的强光、强电磁场、强辐射的本底条件,也要求探测器具有耐辐照、对可见光不灵敏、可飞行时间(Time-of-flight, TOF)离子鉴别等特征,因此具有这样一些特点的新型探测器已成为激光核反应产物离子甄别、能量测量的主要设备^[1-6],特别是SiC和CVD Diamond(化学气相沉积金刚石)等新型半导体材料探测器,成为目前强激光等离子体产物飞行时间测量的首选。

新型半导体材料在最近几年得到了快速的发展,主要优势在于高温和高辐射环境下可测量,此时常规Si/Ge半导体探测器无法正常工作,而SiC和Diamond探测器则显示了更卓越的特性:例如接近100%的高电荷收集效率、高辐射硬度、高工作电压、快收集时间、以及室温下低暗电流等特性。由于其宽能带特性使得SiC(3.2 eV)和CVD Diamond(5.5 eV)可以很好地分离出激光等离子体中的可见光、软X-ray、远红外光,有利于提高对于电子、质子和离子的探测灵敏度。基于SiC和CVD Diamond半导体材料的肖特基二极管型探测器具有耐高温、耐辐照、快时间响应和对可见光不敏感等优异性能,在诸多领域得以广泛应用,如:强辐射场环境下中子探测、高温反应堆功率检测、乏燃料贮存场所辐射检测^[7-10],特别是在超强电磁场以及fs/ps的超快时间尺度下的强激光等离子体反应产物的实验测量中,该类探测器以激光脉冲引起的电磁脉冲作为时间起始点,以产物粒子(如中子、带电粒子)作为终止时间的快时间响应飞行时间测量和直接波形记录,可以作为粒子种类鉴别和粒子计数率测量的有效手段^[8,11]。

目前国际上用于强激光等离子体飞行时间测量4H-SiC探测器的研究主要在意大利INFN(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)实验室,其在激光等离子体环境中利用SiC测量带电粒子飞行时间谱的研究处于领先地位^[11],国内主要是SiC器件性能测试和用于X射线探测器等方面的研究^[9],也有少量激光等离子体测量方面的研究,但是用作飞行时间和波形记录探测器还未见报道。我们设计、研制了一款用于飞行时间和波形测量的SiC探测器,以PCB板作为封装支架,便于焊接耐辐照的贴片电阻和电

容,根据待测信号强度的不同可以采用两种工作模式(谱仪模式和飞行时间模式)。

1 SiC肖特基二极管探测器结构与工作模式

SiC半导体探测器典型的结构有肖特基势垒型(金属-N型半导体接触)和PN结型(P型和N型半导体接触)两种,该设计采用肖特基势垒型,灵敏面积 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,灵敏层(外延层)厚度 $80\text{ }\mu\text{m}$,全耗尽电压350~600 V,4H-SiC结构如图1所示。技术参数为:N型基底层厚度 $360\text{ }\mu\text{m}$,外延层厚度 $80\text{ }\mu\text{m}$,外延层氮掺杂浓度约 $10^{14}\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$;欧姆接触层沉积Ti/Pt/Au金属(厚度分别为30 nm、30 nm、150 nm);在外延层表面经处理后沉积Ni/Au制作肖特基接触层(厚度分别为100 nm、100 nm)。

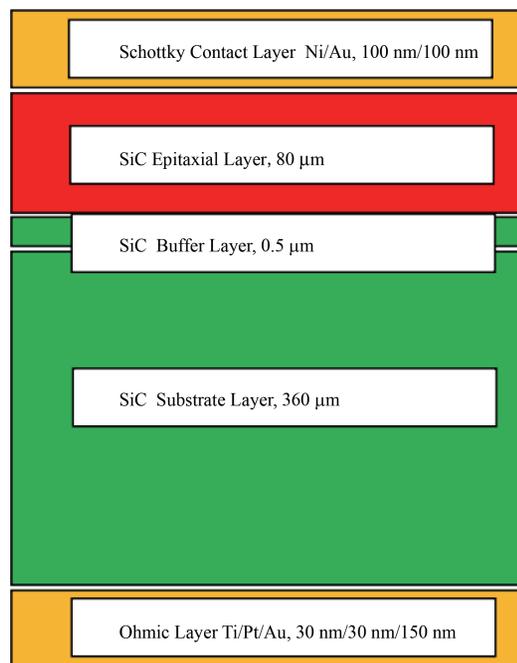


图1 SiC探测器结构示意图
Fig.1 Schematic structure of SiC detector

由于SiC探测器需要工作在强激光等离子体环境下,常规的前置放大器在强电磁场、大电流条件下极易损坏而无法工作,因此探测器设计需要简化电路,采用耐辐照器件,以PCB板作为探测器支架,PCB板上仅焊接贴片电容(陶瓷电容,1 nF,1206型,耐压2 kV)和贴片电阻(片式固定电阻器,100 MΩ,

0603型, 1/8 W功率)^[11], 分别用于脉冲信号隔直、引出和探测器偏压供电, 电容和电阻具有极强的耐辐照和耐高温特性。4H-SiC探测器可以工作在两种模式下(如图2所示): 谱仪模式(Spectroscope Mode)和飞行时间模式(Time of Flight Mode)。在非强激光场条件下, 探测器输出脉冲信号接入电荷灵敏前置放大器和主放大器构成常规谱仪工作模式; 在强场激光条件下, 探测器输出脉冲信号由示波器或者数字化仪(Digitizer)直接记录随时间变化的波形信号, 即为飞行时间工作模式。当探测器工作在飞行时间模式下时, 简单的电容和电阻构成的电路可以有效地避免强电磁脉冲的干扰, 以激光电磁脉冲信号作为起始时间, 探测器具有同时信号幅度记录和时间标记等优势^[11-14]。

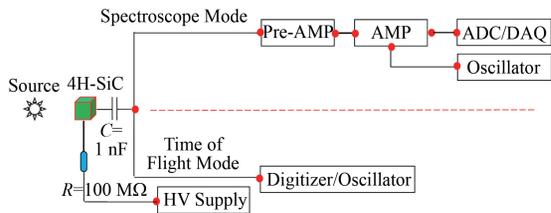


图2 4H-SiC探测器的谱仪模式和飞行时间模式
Fig.2 Spectroscope mode and TOF mode of 4H-SiC detector

2 SiC探测器封装与放射源测试

为了最大限度屏蔽电磁干扰, SiC的封装设计如图3所示, 分别为PCB板原理设计(PCB板直径20 mm, 中心覆铜面积4 mm×4 mm, 安装孔直径2 mm); 焊接电容电阻, 封装后的SiC探测器, SiC正面通过镀金钨丝与PCB板信号端连接, 背面连接到地线端; 屏蔽壳为铝合金材料, 为避免激光反射做了发黑处理, 同时留有真空抽气孔和M6安装孔, 上下端盖分别留有一个直径10 mm的窗口和两个直径7 mm的雷莫(LEMO)座安装孔; 由于SiC具有非常高的热导率, 所有焊接必须快速进行; 两个LEMO接头分别用于偏压引入和脉冲信号引出, 探测器地线和信号线地线连接。

SiC常规谱仪模式在真空室内进行了测试, 真空度好于0.1 Pa, 探测器加300~600 V的偏置电压, 脉冲信号通过1 nF电容引出后, 再接到电荷灵敏前置放大器(类似ORTEC 142A型)以及主放大器中(ORTEC 571, 放大倍数100×0.94, 成型时间0.1 μs), 然后接入到CAEN V1730B波形采样器或者高速采样示波器中进行波形记录。测量中使用²⁴¹Am、²²⁸Th、²²⁶Ra等多组α标准源, 对获取到的数据用ROOT程序进行波形的后处理。谱仪模式下测量到²²⁶Ra、²²⁸Th源α粒子特征峰及能量线性如图4。

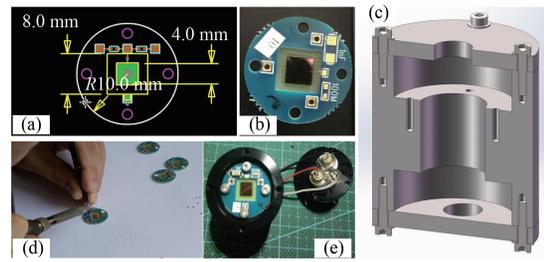


图3 PCB板设计(a), SiC探测器(b), 电磁屏蔽壳(c), PCB板上贴片电容和电阻的焊接(d), 组装后的探测器(e)

Fig.3 Design of silicon carbide in PCB board (a), silicon carbide detector (b), electromagnetic shielding shell (c), soldering capacity and resistor on the PCB board (d), package of detector (e)

图4(a)为²²⁶Ra源α粒子单脉冲波形, 即经过1 nF电容后输出的波形, 脉冲响应时间2~3 ns; 图4(b)为²²⁶Ra的4个特征谱线, 峰值能量为4 773.48 keV、5 484.46 keV、5 993.69 keV、7 666.75 keV(峰值能量数据为来自于美国国家标准于技术研究院NIST(National Institute of Standards and Technology)), 计算得到的能量分辨率分别为: 1.87%、1.70%、1.56%、1.19%, 可以看出SiC在能谱工作模式下具有较好的能量线性和能量分辨, 最佳能量分辨可达到1.19%@7 666.75 keV, 图4(c)为²²⁸Th源的特征谱线, 峰值能量为5 423.0 keV、5 681.5 keV、6 278.5 keV、6 768.2 keV、8 757.4 keV; 图4(d)为α源线性刻度曲线, SiC探测器对低能α源表现出非常好的能量线性。文献[15-16]给出SiC的²²⁶Ra源能量最好分辨在(0.6~0.9)%, 分析表明采用陶瓷支架封装的SiC漏电流为0.5 nA@600 V, 而PCB板封装的SiC漏电流在80 nA@600 V, PCB板封装漏电流水平增加了160倍, 这是导致PCB板型SiC探测器能量分辨稍低的主要原因, PCB板封装的优势在于可以方便地焊接和更换分压电阻和隔直电容, 即可实现SiC探测器的飞行时间工作模式而无需复杂的外接放大器电路。

3 SiC探测器对强激光加速和聚变反应产物测量

在中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室的神光II(SG2)高功率激光实验8路升级装置上, 利用2.4 kJ/1~3 ns脉冲宽度和1路PW·fs⁻¹强度的大型激光器进行的大D+D聚变反应的实验测量中, 对飞行时间SiC探测器进行了在束测试实验。SiC探测器采用飞行时间工作模式, 直接输出波形信号到Digitizer中, SiC距离激光聚焦靶点3 m远, SiC屏蔽壳窗口处采用7~10 μm铝膜封挡, 避免强光和靶碎片直射到SiC探测器。SiC脉冲

信号经靶室真空法兰引出后经过 20 m 长电缆直接接到 V1730B Digitizer 上,由于脉冲信号幅度过大, V1730B 的动态范围只有 2 V,因此采用了 50 dB 衰减器(衰减 316.23 倍),实验中 VME 数据获取插件及微机必须用铜金属网覆盖或者金属箱屏蔽,且放置在距离靶室 10~20 m 远的地方,才能有效降低强激光电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP)的影响,避免激光打靶瞬间 VME 插件死机问题。测量信号如图 5 所示:图 5(a)为 SG2 真空靶室图,靶室半径 1.0 m,中心为靶点位置,图中只显示了对称的 4 路激光入射, SiC 探测器放置在靶室水平方向外接 2 m 长的延伸管道内,距离靶约 3 m,此即带电粒子的飞行

距离;图 5(b)为采用飞行时间模式的 SiC 脉冲波形谱,其中 0 μs 处为激光电磁脉冲,为激光照射反应靶产生的光电峰(Photo peak),作为飞行时间测量的起始时间,紧接着为带电粒子产物峰(Particle peak),其中包括了质子、氦和碳元素的不同电荷态产物($^1\text{C}^-$ ~ ^6+C)的混合,提高时间分辨和飞行距离,有助于分离不同的带电粒子产物,详细的产物分析需要对波形信号做进一步的反卷积分析^[11,17-18]。SiC 探测器在激光核物理实验测量中经受了强电磁脉冲的考验,反应产物脉冲波形输出正常,时间响应快速,粒子飞行时间谱能够清楚地分辨出光电峰和粒子峰,表现出了优异的在线信号测量能力。

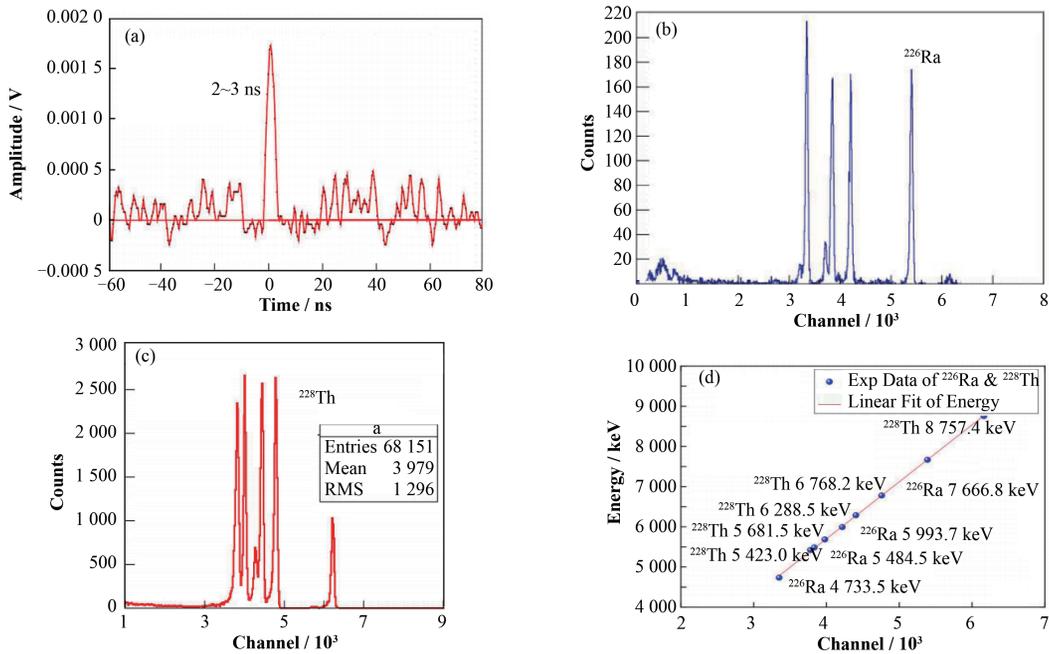


图4 ^{226}Ra 源产生的脉冲波形(a), ^{226}Ra 能谱图(b), ^{228}Th 能谱图(c), α 源能量刻度曲线(d)
 Fig.4 Pulse waveform of ^{226}Ra (a), energy spectrum of ^{226}Ra (b), energy spectrum of ^{228}Th (c), energy scale curve for α source (d)

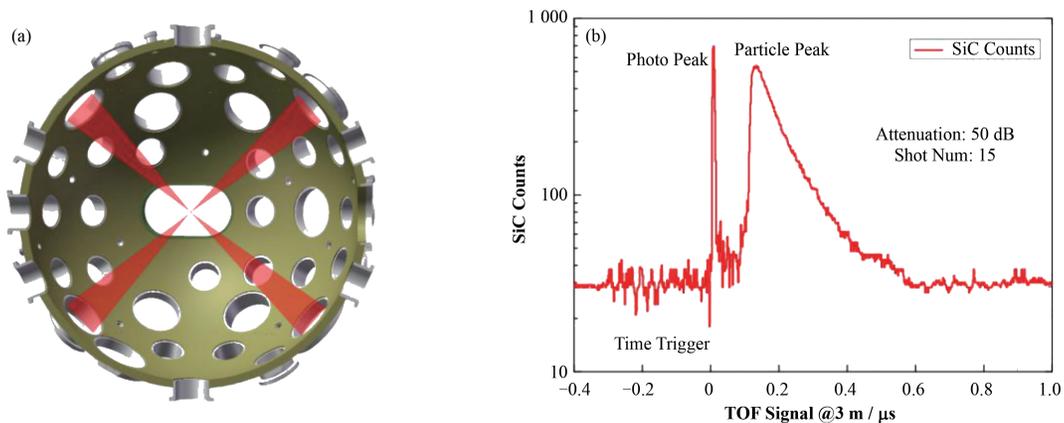


图5 强激光等离子体产物测量
 (a) SG2 真空靶室和激光入射方向示意图, (b) DD 聚变产物飞行时间谱测量结果

Fig.5 High power laser plasma measurement
 (a) Schematic diagram of SG2 vacuum chamber and laser, (b) Time-of-flight signal of ion products of DD fusion experiment

4 结语

为了测量激光核物理实验中的等离子体反应产物,需要克服强激光电磁脉冲的高本底、强辐射的不利条件,同时产物反应时间短、射线种类多、能量范围宽,因此需要探测器具有快时间响应、脉冲波形记录、飞行时间甄别、多脉冲累积等特征,我们研制了采用PCB板封装、直接信号引出和飞行时间测量的肖特基型SiC探测器,在实验室标准 α 源和强激光场中进行了SiC性能的初步测试,SiC探测器全耗尽电压350~600 V,灵敏层厚度80 μm ,灵敏面积5 mm \times 5 mm,未来将用于质子<3.5 MeV和 α 粒子能量<12 MeV的 $p+^{11}\text{B}\rightarrow 3\alpha$ 反应产物测量。利用 α 源(^{241}Am , ^{228}Th , ^{226}Ra)的测试结果表明,该探测器具有良好的能量线性响应,能量分辨率达到1.19%@7 666.75 keV,快时间响应2~3 ns等特征,满足强激光场条件下的带电粒子飞行时间测量需求。通过标准源和强激光实验测试,也发现了一些可以改进的方面:

1) PCB封装电路板的漏电流要远高于陶瓷封装,导致标准源测试时的能量分辨率未能达到谱仪型探测器的最佳分辨,未来计划采用陶瓷和PCB混合组装方式,可以进一步抑制漏电流,降低噪声,提高粒子能量分辨。

2) 1 nF的隔直电容较大,而SiC探测器由理论计算的电容值为26 pF,因此导致引出信号的时间分辨率较低,未来考虑换用合适的隔直电容,电容过小,信号上升时间快、幅度大,但是震荡衰减时间较长。100 M Ω 的分压电阻过大,因此外加电压大部分分配在分压电阻上,而SiC的电压过小,如果要达到SiC的350~600 V的全耗尽电压,需要提高外加电压值,会超出LEMO接头和线缆的允许耐压范围;而过小的电阻值,会使得强激光实验中的加载在SiC探测器两端的瞬时电压过大,导致SiC击穿损坏,因此合适的电容和电阻值还需要根据不同激光器强度来合理选择。

3) SiC探测器的灵敏层厚度为80 μm ,灵敏面积为5 mm \times 5 mm,受到工艺水平的限制,进一步增加耗尽层厚度和扩大灵敏层面积受限于SiC材料成本、材料切割成品率等影响,还有待SiC外延层生长技术的进一步发展和提高。

致谢 感谢中国科学院上海应用物理研究所张桂林研究员的支持并给出有益修改建议,感谢成都晶威科技发展有限公司的技术支持,感谢上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室神光II运行

人员的大力支持。

参考文献

- Manfredotti C, Lo Giudice A, Fasolo F, *et al.* SiC detectors for neutron monitoring[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, **552**(3): 131–137. DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.018.
- Lo Giudice A, Fasolo F, Durisiet E, *et al.* Performances of 4H-SiC Schottky diodes as neutron detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, **583**: 177–180. DOI: 10.1016/j.nima.2007.08.241.
- Ruddy F H, Dulloo A R, Seidel J G, *et al.* Development of a silicon carbide radiation detector[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, **45**(3): 536–541. DOI: 10.1109/23.682444.
- Ren B, Huang J, Wang L J, *et al.* Thermal stability of hydrogenated diamond films in nitrogen ambience studied by reflection electron energy spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy[J]. Applied Surface Science, 2015, **388**: 565–570. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.10.067.
- Shen Y B, Huang J, Gu Q M, *et al.* The investigation of Ga-doped ZnO as an interlayer for ohmic contact to Cd_{1-x}Zn_xTe films[J]. Applied Surface Science, 2017, **425**: 176–179. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.07.028.
- 施朱斌, 王林军, 闵嘉华, 等. 四元并行电容性Frisch栅肖特基CdZnTe探测器[J]. 红外与毫米波学报, 2011, **30**(6): 514–517.
SHI Zhubin, WANG Linjun, MIN Jiahua, *et al.* CdZnTe detectors with parallel capacitive Frisch grid[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, **30**(6): 514–517.
- Runkle R C, Bernstein A, Vanier P E. Securing special nuclear material: recent advances in neutron detection and their role in nonproliferation[J]. Journal of Applied Physics, 2010, **108**(11): 10101–10121. DOI: 10.1063/1.3503495.
- Nava F, Bertuccio G, Cavallini A, *et al.* Silicon carbide and its use as a radiation detector material[J]. Measurement Science & Technology, 2008, **19**(10): 1–25. DOI: 10.1088/0957-0233/19/10/102001.
- 胡青青, 杨俊, 刘国福, 等. SiC中子探测器的研究进展[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(12): 72–77.
HU Qingqing, YANG Jun, LIU Guofu, *et al.* Research progress of silicon carbide neutron detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **31**(12): 72–77.
- Nava F, Castaldini A, Vanni P, *et al.* Radiation detection properties of 4H-SiC Schottky diodes irradiated up to 10¹⁶

- n / cm² by 1 MeV neutrons[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**(5): 2977–2981. DOI: 10.1109/TNS.2006.882777.
- 11 Torrisi L, Foti G, Giuffrida L, *et al.* Single crystal silicon carbide detector of emitted ions and soft X rays from power laser generated plasmas[J]. Journal of Applied Physics, 2009, **105**: 123304. DOI: 10.1063/1.3153160.
- 12 Cannavò A, Torrisia L, Calcagnob L, *et al.* SiC detector characterization for radiation emitted by laser-generated plasmas[J]. Journal of Instrumentation, 2016, **11**(05): C05008. DOI: 10.1088/1748-0221/11/05/C05008.
- 13 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 A, 2003, **498**: 415 – 423. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01987-3.
- 14 Ruddy F H, Flammang R W, Seidel J G, *et al.* Low-background detection of fission neutrons produced by pulsed neutron interrogation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, **598**(2): 518 – 525. DOI: 10.1016/j.nima.2008.09.033.
- 15 蒋勇, 范晓强, 荣茹, 等. SiC 半导体探测器性能测量[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **32**(12): 1372–1375. JIANG Yong, FAN Xiaoqiang, RONG Ru, *et al.* Properties measurement of silicon carbide detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **32** (12): 1372–1375.
- 16 Wu J, Lei J R, Jiang Y, *et al.* Feasibility study of a SiCs and with neutron spectrometer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, **708**: 72 – 77. DOI: 10.1016/j.nima.2013.01.018.
- 17 Bertuccio G, Puglisi D, Torrisi L, *et al.* Silicon carbide detector for laser-generated plasma radiation[J]. Applied Surface Science, 2013, **272**: 128 – 131. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.03.183.
- 18 Margarone D, Krasa J, Giuffrida L, *et al.* Full characterization of laser-accelerated ion beams using Faraday cup, silicon carbide, and single-crystal diamond detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2011, **109**: 103302. DOI: 10.1063/1.3585871.