

第三代半导体辐射探测器研究进展

梁红伟, 廖传武, 夏晓川, 龙泽, 耿昕蕾, 牛梦臣, 韩中元

大连理工大学微电子学院, 大连 116024

摘要 以氮化镓(GaN)、碳化硅(SiC)、金刚石等为代表的第三代半导体具有大的禁带宽度、高击穿电场、高饱和电子速率、高热导率以及具有高的位移阈能, 耐高温、耐辐照能力, 在核装置运行监测、空间探测、高能粒子物理探测等领域具有重要的应用潜力。介绍了第三代半导体的相关性质、辐射探测器主要制备方法以及不同类型辐射探测器的研究进展, 展望了第三代半导体在辐射探测方面的发展趋势。提出第三代半导体辐射探测器的出现必然会促进核科学、空间探测、粒子及高能物理等方面的研究, 对于国家提升核心竞争力具有重要的推动作用。

关键词 第三代半导体; 辐射探测器; 耐高温; 耐辐照; 宽禁带半导体

辐射探测器技术在核医学、核电站检测、环境检测、空间粒子物理学及相关学科交叉性前沿方向和工业应用等众多领域都有极其重要的应用。其中, 半导体辐射探测器具有探测效率高、线性范围好、结构简单、体积小、响应快、能量分辨率好等优点, 在辐射探测器方面得到了越来越广泛的应用。但在反应堆、高能物理前沿、深空探测等极端条件下, 常规半导体已不能满足要求, 需要耐高温、耐辐照的探测器, 因此具有更宽带隙的第三代半导体成为辐射探测器研究领域引人关注的前沿方向^[1]。

1 半导体探测器的原理及发展历史

半导体核辐射测量是基于核辐射对晶体性质

的影响, 重带电粒子通过电离、激发过程损失自身能量, 通过与半导体中原子核之间作用的库仑力发生非弹性碰撞, 产生电子-空穴对。产生的电子-空穴对在器件的电极上诱导出感生电荷。感生电荷量与入射粒子的能量有关, 从而实现入射粒子能量的测量。非相对论性的带电粒子, 如质子和原子核产生的电离密度反比于它们的能量, 正比于它们电荷的平方, 因此, 同时测量总能量及在探测器中的能量损失, 可以用于粒子的鉴别。对于高能带电粒子, 这类辐射以几乎恒定的速度穿透探测器, 沿其路径产生电子-空穴对数目几乎与粒子能量无关, 并且同电离粒子的电荷平方成比例^[2-3]。快电子在半导体中损失要慢一些, 路径较随机。快电子除了通过库仑相互作用损失能量之外, 还通过辐

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-04-13

作者简介: 梁红伟, 教授, 研究方向为第三代半导体耐辐照探测器件, 电子信箱: hwliang@dlut.edu.cn

引用格式: 梁红伟, 廖传武, 夏晓川, 等. 第三代半导体辐射探测器研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 69-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.14.007

射损失能量。 χ 和 γ 射线与半导体的作用原理和带电粒子不同,带电粒子的能量是逐渐损失的,但 χ 和 γ 射线只发生1次作用,就完成了能量交换,其中涉及3种效应——光电效应、康普顿效应和电子对效应。对于中子,由于其不带电,与半导体直接作用产生电子-空穴对的几率很小,因此半导体很难直接用于中子探测。但由于中子可通过与原子核发生反应引起次级带电粒子或 γ 光子,所以半导体中子探测器中一般采用中子转换层来实现对次级带电粒子或光子的探测^[3]。

约20世纪30年代报道了核辐射能够引起晶体导电性的变化,但由于缺乏合适材料,在很长时期内未能作为单独的辐射探测器使用。探测器初期半导体材料通常采用电导型器件,但是由于半导体型器件中存在载流子俘获的问题,因此需要一个强电场来增加载流子收集。后期发展出pn结器件和金属半导体接触的肖特基器件,这些器件在反偏压下即能保证低的漏电流,同时也能提供几乎没有载流子的强场耗尽区,使得半导体探测器的探测性能大幅度提高。

第一个用作核辐射探测器的半导体材料是金刚石,20世纪30—40年代就开始用作带电粒子辐射探测器^[4]。但当时这种材料不易获得,很难获得高质量的大尺寸单晶,能量分辨率不够。随后,贝尔实验室对粒子与半导体Si的相互作用进行了研究^[5]。1960年,Friedland等^[6]详细研究了金锗和金硅面垒型探测器对 α 粒子的测试,发现器件性能与入射粒子能量之间具有很好的线性关系。由于Si

探测器具有较好的性能,逐步在重带电粒子^[7]、中子^[8]、X射线^[9]等辐射探测中占据了重要位置。而对于能量更高的穿透性较强的 χ 和 γ 辐射,由于采用扩散结型探测器及面垒探测器,难以实现2~3 mm的耗尽深度,因此采用Li漂移Si(或Ge)探测器以及高纯锗探测器来实现 χ 和 γ 探测^[10]。

探测器的一个重要指标是抗辐照能力。半导体探测器用于辐射环境,抗辐照性能与其本身的位移阈能(displacement threshold energy) E_d 有关,位移阈能越大,材料的抗辐照能力越强。Si材料由于禁带宽度小、离位能低,导致Si探测器性能对辐照损伤较敏感,对快中子、 α 粒子和裂变碎片的辐照上限分别为 10^{12} 、 10^9 和 $10^8/\text{cm}^2$,抗辐照性能不理想,难以在强辐射环境中长期工作,另外Si的耐高温性能也不理想,对使用环境要求严格^[11]。

第三代半导体材料较Si材料具有更大的位移阈能,更宽的带隙,使之具有天然的抗辐照、耐高温的优势。近年来,随着核聚变反应堆芯、高能物理研究、深空探测等极端环境对探测器的抗辐照、耐高温性能的强烈需求,第三代半导体辐射探测器成为研究热点^[12]。表1列出了第三代半导体及Si的部分相关参数^[13]。在第三代半导体中,以SiC、GaN和金刚石材料发展较为迅速。最近30年,第三代半导体的发光器件、电力电子器件研究有了巨大的进步,这些进步带动了材料晶体质量与器件工艺的提高,使它在辐射探测器方面的应用潜力也逐渐显现。本文主要综述这3种材料在辐射探测方面的研究进展。

表1 几种宽禁带半导体与Si材料的相关参数对比

半导体	禁带宽度/ eV	本征载流子浓度/ cm^{-3}	击穿电压/ $(10^5\text{V}\cdot\text{cm}^{-1})$	介电常数	电子迁移率/ $(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	空穴迁移率/ $(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	电子饱和速度/ $(10^7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	热导率/ $(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	电子-空穴对产生能量/eV
Si	1.12	1.5×10^{10}	3	11.8	1500	600	1.0	1.5	1420	13~20
GaN	3.39	$\sim 10^{-9}$	50	8.9	1000	30	3.0	1.3	2500	8.9
4H-SiC	3.26	$\sim 10^{-9}$	22	9.7	400	50	2.5	5.0	2540	21~35
Diamond	5.5	$\sim 10^{-27}$	100	5.5	2200	1600	2.7	20	4000	13

2 SiC 辐射探测器的研究

2.1 SiC 材料的基本性质

SiC 晶体有 200 多种异构体,每一种异构体的 C/Si 原子的堆垛次序都不相同。其中最常见 3 种的异构体为 3C-SiC、4H-SiC、6H-SiC, H 之前的数字代表着堆垛周期中 C/Si 原子层数。六方体结构的 SiC 晶体通常掺杂菱方结构的 15R、21R,其中数字代表堆积方向上晶体双层的层数,字母代表晶体结构种类。在以上各种类型 SiC 中,通常以 4H-SiC 应用最为普遍^[14]。

SiC 在室温下具有禁带宽度大、良好的抗辐射能力,具有极高的击穿电场强,这使得器件能够耐高压及耐高电流密度。较大的饱和电子迁移速率可以提高探测器的电荷响应速度。同时具有较高的热传导,热导率是 Si 的 3 倍,具有良好的散热性质且化学性质稳定。器件具有电阻率高、暗电流小等特性。特别是在 GaN、SiC 及金刚石这 3 种材料中, SiC 能够获得较大的晶体尺寸(4 英寸及 6 英寸, 1 英寸=25.4 mm),相对较低的单晶价格以及更好的晶体质量,因此 SiC 辐射探测器也是第三代半导体中研究最为深入的探测器。

2.2 SiC 辐射探测器主要研究进展

19 世纪瑞典人发现了 SiC 材料的存在,这种材料当时需要通过冶炼产生。1893 年莫桑(Moissan)在陨石中发现了自然生成的 SiC 晶体。1907 年英国工程师 Round 制造出了第一个 SiC 晶体发光二极管^[15]。1959 年菲利普研究所 Lely 发明了一种生长高质量 SiC 晶体的新方法^[16]。宽带隙半导体 SiC 具有禁带宽度大、离位能高、击穿电场高等固有优势,并具有材料质量好、器件工艺成熟的优点,实验证明 SiC 探测器在质子 1.4×10^{16} p/cm² 和中子 7×10^{15} n/cm² 注量下依然可以使用^[17]。

SiC 电粒子探测器的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代,1957 年就有关于 SiC 中子探测器的报道^[18]。1973 年, Tikhomirova 等^[19]利用 SiC 器件作为裂变碎片计数器,并在高注量(4×10^{14} n/cm²)下对器件进行了测试,与 Si 探测器对比后,证实了 SiC

器件具有良好的抗辐照特性。但接下来的 20 年左右,由于受生长工艺条件的限制, SiC 的材料质量相对较差,使得 SiC 辐射探测器的研究工作进展十分缓慢。

直到 20 世纪 90 年代后期,人们开展了大量卓有成效的研究工作,显著减少了 SiC 晶体生长过程中产生的缺陷(如位错、微管等),同时可控掺杂工艺也获得显著提高,这使得高性能 SiC 器件制造技术得到飞跃式发展。1997 年,美国西屋电气的 Ruddy 等^[20]研制出肖特基势垒二极管(SBD)型和 pn 结型 2 种 SiC 探测器,对 α 粒子的能量分辨率分别为 5.8% 和 6.6%,在 22~89°C 温度范围内对探测器性能无影响。随着 SiC 薄膜外延生长技术的不断发展完善,该研究团队于 2006 年报道了高能量分辨率的成果,制备出外延层厚度为 100 μm 的 SBD 型探测器,对 5.449 MeV 的 α 粒子的能量分辨率达到了 0.37%^[21]。2012 年,美国南卡罗来纳大学的研究团队比较了基于半绝缘体单晶 SiC 和基于 n 型外延 SiC 层制备的探测器的性能,结果表明外延膜探测器的性能要好于体单晶探测器性能, n 型外延探测器在最佳偏压为 100 V 时,对 5.486 MeV 的 α 粒子能量分辨率为 2.7%,在软 X 射线范围内也有很好的响应。2015 年,斯洛伐克科学院 Zat'ko 研究团队将外延层掺杂浓度降低到 1.0×10^{14} cm⁻³,采用 15 nm 厚的 Ni/Au(0.3 mm²)作为肖特基电极,反向电压为 700 V 时,探测器的漏电流仅为 2 pA,对 5.486 MeV 的 α 粒子的能量分辨率达到 0.25%,是已知报道的最好水平之一^[22]。2017 年,意大利墨西拿大学 Torrisi 研究团队在厚度为 25 nm,掺杂浓度为 1.0×10^{14} cm⁻³ 的 4H-SiC 外延层上沉积 20 nm 厚的 Ni₂Si 作为肖特基电极制备 4H-SiC SBD 型探测器,对 5.15 MeV 的 α 粒子能量分辨率为 0.85%,并研究了 300~600 keV 的低能 α 粒子能谱,得到了与 Si 类似的线性度与能量分辨率^[23]。

而在核物理实验的重带粒子鉴别方面,目前有意大利的 Tudisco 等联合十几家单位 40 多名科研人员共同开展的 SiCILIA (silicon carbide detectors for intense luminosity investigations and applica-

tions)项目的相关研究报道,他们基于10及100 μm 的分立式SiC望远镜结构 $\Delta E-E$ 探测器,验证了SiC探测器在强束流下进行粒子鉴别的可行性^[24]。此外,在激光等离子体实验中质子束的监测^[25]、核聚变中 α 粒子诊断^[26]也具有重要应用。此外,近几年,还出现了一些复杂结构的SiC探测器,例如SiC的微条探测器等用于重带电粒子及同位素的鉴别^[27]。

中子探测技术在空间辐射环境探测、违禁品检测、科学实验、医学、军事及工业等众多领域有着广泛的应用前景^[28]。SiC较Si具有更强的耐辐照能力,在中子注量 $3.82 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 仍然可以正常工作^[29]。SiC中的 ^{12}C 和 ^{28}Si 可以与快中子反应释放 α 粒子, α 粒子与SiC作用产生电子-空穴对,实现对快中子探测^[30]。但是,由于 ^{12}C 和 ^{28}Si 的中子反应截面小,所以SiC中子探测器一般选用固体中子转换层材料,如 ^{10}B 、 ^6Li 等复合材料将中子较变为带电粒子进行探测^[31-32]。与此同时,需要模拟合适的转换层厚度以实现最佳的探测效率^[33]。通常SiC探测器采用平面型结构,只有部分入射到半导体中的带电粒子被探测,因此效率很低,通常不超过5%^[34]。

由于 χ 和 γ 射线穿透较深,需要几百微米的厚灵敏区。而SiC探测器由于采用外延技术,灵敏区较薄,薄的灵敏区只能探测低能 χ 和 γ 射线。要想实现高能射线探测,采用的体单晶质量还有待提高,能谱测试较难。尽管如此,在同步辐射中, SiC探测器在X射线能量探测及束流监测等方面也得以应用^[35]。半绝缘块体4H-SiC探测器显示了中等分辨率的 γ 射线谱,4H-SiC的n型外延层探测器显示了对59.5 keV γ 射线的良好分辨率^[36]。

近年来,中国开始大力扶持半导体产业,特别是第三代半导体产业有了快速发展。在SiC衬底材料及其外延薄膜生长技术、器件制备工艺和辐照效应等方面取得很大进展,与国外SiC探测器的研究差距在逐步缩小,甚至在某些方面领先于国外。例如,西北核技术研究院的Ouyang研究组^[37]在耐辐照探测器方面做了大量工作,实现了86 MeV氧离子的探测,证实了在 10^{16} n/cm^2 的中子注量下SiC探测器仍可工作。西安电子科技大学Zhang研究组^[38]

在SiC材料缺陷、器件制备、辐射效应及器件模拟及性能退化等方面做了大量工作。四川大学、中国工程物理研究院及南京电子器件研究所共同合作,在SiC肖特基 α 粒子、中子探测器的制备及性能表征方面取得了一些重要成果^[39-40]。2015年,中国工程物理研究院制备的SiC探测器对4.8~7.7 MeV能量范围内 α 粒子的能量分辨率为0.61%~0.90%,与国际报道的高分辨SiC α 粒子探测器的能量分辨率相当^[41]。2019年,中国工程物理研究院蒋勇^[42]利用SiC探测器进行了中子束流监测,研制了用于绵阳研究堆(CMRR)飞行时间中子反射仪(NR)的中子束流监测仪^[43]。中国工程物理研究院Dong等^[44]研究了SiC探测器的中子辐照损伤效应。2019年,哈尔滨工业大学Yang等^[45]研究了40 MeV Si离子辐照4H-SiC二极管对费米能级的钉扎效应,通过对电活性缺陷浓度的计算,得出 Z_1/Z_2 中心是影响肖特基二极管在40 MeV Si离子辐照下电性能的主要缺陷。大连理工大学与中国科学院高能物理研究所研究组^[46]共同研究了SiC探测器的耐辐照特性,对样品经过总剂量为1000 kGy的 γ 射线辐照后,探测器的正向电流相较于辐照前减小了3个数量级;反向电流值在0~120 V偏压下没有明显变化,当反向偏压高于120 V时,反向电流值变化明显。同时,辐照前后对 α 粒子的能量分辨率没有明显变化。

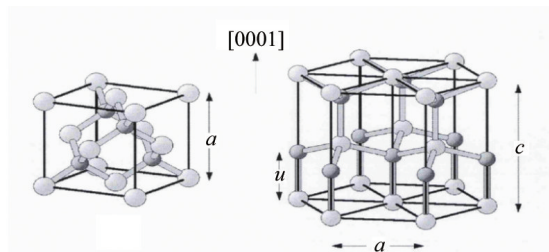
2.3 SiC辐射探测器发展中的问题

从SiC材料质量来看, SiC的外延片已经可以满足质量要求,但是受外延厚度所限,对于高能重粒子、 χ 和 γ 射线还很难满足厚度要求。对于SiC单晶,晶体质量也在不断提高,晶体尺寸国内主流为4英寸,国外为6英寸,随着晶体质量的提高也会扩展探测器的应用范围。另外,随着器件工艺的发展,可用于超快探测的3D结构以及用于高效中子探测的微结构SiC探测器也成为必然需求。这些研究势必促进SiC探测器在高注量下超快辐射测试^[47]、近核监测^[48]、空间核反应堆电源的中子监测^[33]、核聚变^[26]、自由电子激光^[49]等领域的快速应用。

3 GaN 辐射探测器研究

3.1 GaN 材料的基本性质

GaN 是一种直接带隙半导体,热力学稳定相为六角纤锌矿结构(α -GaN)。GaN 晶格常数 a 和 c 分别为 3.189 和 5.185 Å (图 1^[50])。另外,纤锌矿 GaN 是非中心对称的,如果 Ga 和 N 在单位胞内位置交换,会导致不同的极性。



(a) 纤锌矿结构 (b) 闪锌矿结构

大球表示镓原子,小球表示氮原子

图 1 GaN 的纤锌矿和闪锌矿结构

GaN 薄膜生长的最大困难是缺乏足够大尺寸的单晶作为同质外延衬底。因此,GaN 薄膜通常生长在异质衬底上^[51]。然而,由于晶格和热膨胀系数的不匹配,在异质基底上的 GaN 中仍然存在高位错密度($10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$)。Amano 等^[52]发现在 GaN 生长前添加薄的 AlN 成核层可以在一定程度上缓解晶格失配,为获得更高质量的 GaN 开辟了一条新途径,该方法至今仍被广泛应用于 GaN 薄膜的商业化生产。

目前,GaN 薄膜生长技术包括金属有机化学气相沉积(MOCVD)和分子束外延(MBE)。MBE 具有工艺控制精确、生长温度低、工作压力低等优点。但由于 MBE 的 GaN 生长速度相对较慢,且运行成本较高^[53],所以大多局限于实验室研究。在 MOCVD 中,采用侧向外延生长技术(epitaxially laterally overgrown, ELOG)可以制备高质量的 GaN 薄膜,刃位错密度可以降低到 $10^5 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ^[54]。此外,MOCVD 的高产量也决定了它目前在商业大规模 GaN 外延生长中的广泛应用^[55]。同时,氢化物气相外延技术(HVPE)由于其高生长速率(每小时数百

微米)而成为生产 GaN 晶体的主要技术^[54, 56]。然而,HVPE 很难实现薄膜的可控生长与掺杂,很少用来制备 GaN 薄膜器件。

GaN 掺杂对探测器性能有一定影响。由于存在背景掺杂,如 Si 和 O,这些杂质可由反应室中石英释放出来,并在 GaN 中充当浅施主^[54],未掺杂的 GaN 通常表现出 n 型特性。此外,GaN 中的一些施主点缺陷,如 N 空位,也是导致未掺杂 GaN 呈现 n 型电导率的原因^[54, 57]。Si 和 Ge 通常被有意地掺杂到 GaN 中以获得 n 型材料^[57-59]。在室温下,可以观察到 Si 和 Ge 掺杂的 GaN 的迁移率随载流子浓度的行为几乎相同^[54]。

Mg 在 GaN 中起着深度受体的作用,被广泛地掺杂到 GaN 中制备 p 型材料。然而,很难获得高浓度的空穴,这是由于以下原因:(1) 掺杂 Mg 总是通过 H 原子形成 Mg-H 复合物, H_2 和 H 原子来自载气和反应物的分解氨^[54]。(2) Mg 可以通过本底 n 型缺陷进行补偿^[57]。(3) Mg 的高电离能。不同基团的高电离能值存在差异,其范围在 120~250 meV^[54]。采用低能电子束辐照^[54]、热退火^[60]等方法可提高空穴浓度,降低电阻,但激活效率仍低至 1%~2%。鉴于这些困难,有的研究为了获得更高的 p 型电导率采用其他掺杂剂(Be、C)^[61]。

GaN 中通常存在 3 种类型的穿透位错(TD),即刃型、螺型和混合型。有报道称穿透位错通常起库仑散射中心的作用,从而降低载流子迁移率,增加电阻^[62]。这种 TD 会影响高电子迁移率晶体管(HEMT)的性能,但不会影响 GaN 辐射探测器的性能。然而,螺位错和含有螺位错成分的混合位错作为电流泄漏路径,一般认为是增加探测的反向泄漏电流的主要原因。此外,螺位错可以被多余的 Ga 原子或掺杂剂填充,导致带隙中产生额外的能态^[63]。因此,较厚的 GaN 外延层和较低的 TD 密度对制备性能较好的 GaN 辐射探测器至关重要。

3.2 GaN 辐射探测器主要研究进展

与 SiC 一样,GaN 也具有较强的耐辐照特性。GaN 材料缺陷较 SiC 要高,同时非故意掺杂 GaN 的背景载流子浓度在 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$,要降低载流子浓度通常采用补偿掺杂^[64]或等电子杂质掺杂。GaN α

粒子探测器通常基于薄膜双肖特基结构、薄膜肖特基结构、薄膜p-i-n结构和体GaN肖特基结构这4种器件结构(图2^[13])。

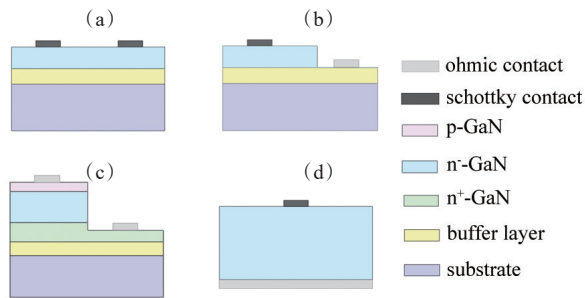


图2 不同结构的GaN α 粒子探测器

3.2.1 薄膜型双肖特基结构GaN探测器

Vaitkus等^[65]实现的第一个GaN的 α 粒子探测器正是基于这种器件结构。采用MOCVD法在 Al_2O_3 上连续生长2 μm 的n-GaN外延层,Au作为肖特基接触面,形成双肖特基结构。该探测器在反向偏置0~28 V(击穿电压为29 V)范围内检测到 ^{241}Am 源发射的5.48 MeV的 α 粒子能谱(图3^[65]),电荷收集效率(CCE)接近100%。这一工作证明了GaN器件可用于粒子检测。双肖特基结构制作简单,不需要对欧姆接触进行优化,但2个肖特基接触之间的距离较长,导致寄生电容和电阻,影响探测器性能。

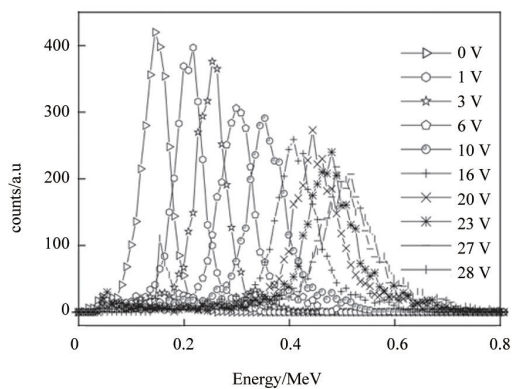


图3 不同偏压下的双肖特基型GaN探测器的能谱^[65]

3.2.2 薄膜GaN肖特基结构探测器

由于体单晶GaN生长技术的局限性,GaN探测器可以采用薄膜肖特基二极管结构。Vaitkus等^[66]

基于2 μm 半绝缘GaN(SI-GaN)层实现了第一个薄膜肖特基结构GaN的 α 粒子探测器,测量了 ^{241}Am 的 α 粒子谱,同时研究了SI-GaN的电学性质,认为SI-GaN具有探测电离辐射的潜力。Polyakov等^[67]分别研究了用MBE、MOCVD和ELOG生长的12 μm 厚未掺杂GaN上制备的肖特基结构 α 粒子探测器。肖特基电极为直径1 mm的镍电极。背景载流子浓度小于 10^{15} cm^{-3} ,使得该层更容易完全耗尽。MOCVD和ELOG探测器的CCE接近100%,而MBE探测器的CCE较低,这是由于较高的深电子陷阱,特别是导带底下0.6 eV能级的陷阱。

3.2.3 薄膜型pin结构探测器

相对肖特基器件,GaN pin器件具有更低的漏电流。Wang等^[68]在2012年将这种结构应用于 α 粒子检测。探测器在反向30 V工作电压下漏电流为nA量级,测量了 ^{241}Am 的 α 粒子脉冲高度谱。在此电压下的CCE约80%,但是能量分辨率(FWHM)约在40%。作者将如此高的能量分辨率值归因于厚死层和没有准直器。此外,Zhu等^[69]基于薄膜pin结构研究了GaN的 α 粒子探测器随温度变化的辐射性能。当温度从290 K到490 K变化时, ^{241}Am α 粒子脉冲高度谱的峰值位置向较低的能量方向有轻微偏移,半峰宽的变化几乎可以忽略,如图4^[69]所示,证明了GaN基 α 粒子探测器在高温环境下具有较好的稳定性^[69]。

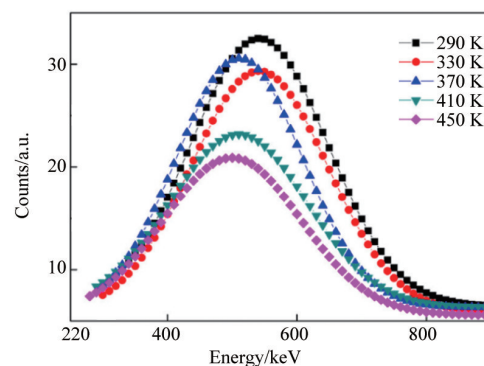


图4 不同温度下薄膜型pin GaN探测器测得的 α 粒子能谱

肖特基薄膜结构和pin薄膜结构具有更好的载流子输运性能,尤其是与双肖特基结构相比^[65]。

因此,基于这2种结构的Ga_N粒子探测器的噪声水平相对较低。然而,肖特基薄膜结构和pin薄膜结构的实现都涉及到台面刻蚀和欧姆接触技术,前者可能增加沿侧壁的泄漏通道,后者通常需要高温退火工艺。

近期本研究组在蓝宝石衬底Ga_N pin探测器方面做了大量工作,对Ga_N pin器件的性能进行了模拟与优化^[70]。借助于等电子掺杂工艺,实现了10及20 μm厚灵敏区的Ga_N pin探测器。其中10 μm探测器在反向40 V下漏电流为10 pA,200 V反向偏压下漏电流也仅为10 nA。采用²⁴¹Am和Pu混合α源进行测试,能量分辨率可达3%左右,器件的实物如图5所示。

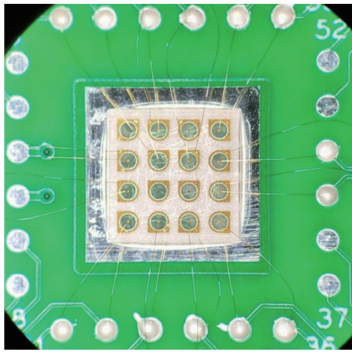


图5 蓝宝石衬底10 μm灵敏区Ga_N pin探测器

3.2.4 体单晶肖特基结构探测器

2005年,Grant等^[71]提出将体Ga_N应用于核辐射探测。然而,受到大块晶体制备质量的限制,前期体Ga_N探测器泄漏电流较大。虽然目前体Ga_N材料仍然昂贵,但较厚的厚度、较低的本底载流子浓度和较低的位错密度,无疑是制备高性能Ga_N辐射探测器最有潜力的材料。

Xu等^[72]制作的体Ga_N肖特基结构探测器在所有报道的Ga_N的α粒子探测器中具有较低的泄漏电流(-200 V时为(7.53±0.3) nA)和最高的工作电压(550 V)。由于工作电压高,背景载流子浓度低,在-550 V时耗尽宽度可达27 μm,能量分辨率可提高到2.2%^[72]。

Sandupatla等^[73]也将这种结构应用于粒子检测。采用金属有机气相外延法(MOVPE)生长的灵

敏区厚度为15 μm,由Mg原子补偿,载流子浓度低至 $7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。在低电压(-20 V)下可以获得高CCE(65%),在-300 V时也可以观察到高CCE(96.7%)。此外, Lee等^[74]发现HVPE Ga_N中存在的H5空穴陷阱是负责空穴捕获的主要中心,并对基于该结构的探测器的CCE有重要影响。

3.2.5 X射线探测器

GaN探测器可以用于X射线探测,因为它具有高的抗辐射性,同时对可见光不敏感。Duboz等^[75]首先研究了Ga_N对6~40 keV光子能量的吸收系数,从吸收谱看,GaN很难用于探测光子能量超过20 keV的X射线。Duboz等^[76-77]还制备了2种类型的Ga_N X射线探测器——金属-半导体-金属(MSM)结构和Ga_N衬底上的垂直肖特基二极管。MSM结构器件光电流的瞬态表现为长而非指数的S形,且在更高的X射线功率下表现更为明显。认为异常行为与陷阱和缺陷有关,建立了相应的模型解释这种行为^[76]。另一种垂直肖特基二极管位于10 μm厚Ga_N(Si掺杂 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)的导电Ga_N衬底上,研究2种偏置电压下的时间响应,结果证明了低偏置时的光伏行为和高偏置时的光导行为^[77]。

除肖特基结构外,Yao等^[78]成功研制了Ga_N pin结构的X射线探测器,观察到X射线与Duboz等^[76]相似的瞬态响应。2019年,Zhou等^[79]提出了一种基于Ga_N上垂直Ga_N p-n二极管的自供电X射线探测器,其低泄漏电流和高内置电场使其对不同入射剂量率下的X射线具有灵敏、快速、稳定的响应,且具有优良的光伏性能。

3.2.6 Ga_N中子探测器

GaN在粒子探测中的应用表明它在中子探测领域的巨大潜力。然而,对Ga_N中子探测器的研究还处于起步阶段。用Ga_N探测器探测中子主要是在探测器上包覆中子转换层材料,通过探测中子与转换层作用后发出的α粒子间接探测中子。常用的中子转换层材料为含⁶Li和¹⁰B的材料。当转换层吸收1个中子后,产生2个带电粒子,从而实现中子探测。尽管如此,这种方法的探测效率仍受到长中子平均自由程和探测器中产生带电粒子短距离的限制^[83]。也有采用中子敏感材料钆(Gd,热中子

俘获截面为 49 万 b) 来掺杂 GaN, 期望获得高探测效率^[80]。

3.2.7 辐照损伤测试

制备的 GaN pin 粒子探测器件采用 10 MeV 的电子辐照, 结果表明在剂量 200 kGy 下器件可以正常工作。而在 200 kGy 以上时, 器件的响应迅速退化^[81]。对于器件, 进行了中子辐照实验, 在经过等效中子通量 10^{11} 、 10^{12} 、 10^{13} p/cm² 照射下, 器件的 $I-V$ 曲线没有明显变化, 甚至在 10^{13} p/cm² 剂量下, 器件的漏电还略有降低, 这表明 GaN 器件具有较强的抗中子辐照特性。

3.3 GaN 辐射探测器发展中的问题

GaN 异质外延技术目前灵敏区厚度为 20 μm , 这种异质衬底 (Si、蓝宝石) GaN 辐射探测器具有成本低、与 GaN 器件工艺兼容的特点, 适合大规模产业化生产。由于具有较强的耐辐照性能, SiC 应用的场合理论上 GaN 也都可以使用。但是, 与 SiC 相比, GaN 辐射探测器还存在以下问题。

1) 利用 MOCVD 生长外延的 GaN 薄膜比较薄, 使得高能粒子或者射线不能将能量完全沉积到灵敏区内, 无法实现有效的能量探测。

2) GaN 背景载流子浓度过高, 无法形成较宽的耗尽区, 从而使得粒子和射线无法在耗尽区损失更多能量而电离出更多的电子-空穴对。因此对于 GaN 辐射探测器, 低背景载流子浓度 GaN 的制备是非常重要的。

3) 缺陷密度大也是 GaN 材料不可避免的问题。若要将器件面积提升, 就会让反向电流变大, 经过放大器的信号将被噪声严重干扰, 探测器的能量分辨率很弱, 无法准确地分辨、分离。这就导致器件无法做大, 如何实现大面积探测器件是目前存在的问题。

4 金刚石辐射探测器

4.1 金刚石材料基本性质

如图 6 所示, 金刚石晶胞是由 2 个面心立方布拉伐晶格嵌套形成的复杂晶格^[82]。sp³ 外层电子构型中每个碳原子与周围 4 个碳原子形成 σ 共价键,

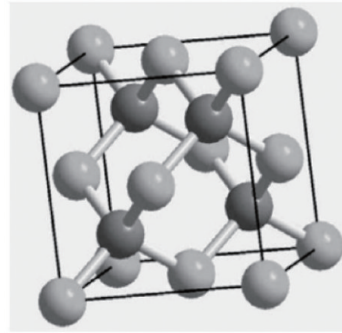


图 6 金刚石晶胞结构

键长较短, 键能较大。C 原子的排列具有高度的对称性。所有的价电子都参与成键, 没有自由电子。因此, 晶格结合较强, 化学性质稳定, 具有较强的抗辐射能力。即使被大剂量高能粒子长时间照射, 金刚石晶格失配量仍然很小, 因此金刚石在高温、强辐射等极端环境中具有巨大的应用前景。金刚石探测器可用于粒子识别、辐射探测、位置探测、粒子能量实时监测等。

金刚石材料分为天然金刚石和人造金刚石。金刚石是间接带隙半导体, 其带隙值约为 5.5 eV。根据杂质含量的不同, 金刚石又被分为 Ia、Ib、IIa 和 IIb 等 4 种类型。其中, Ia 型金刚石杂质 N 的含量达到 2.5×10^{-3} 以上, 以天然金刚石居多; Ib 型金刚石杂质 N 的含量约为 0.3×10^{-3} , 主要为人工合成金刚石; IIa 型金刚石杂质 N 含量小于 1×10^{-6} , 可作为探测器候选材料; 而 IIb 型的金刚石是 B 掺杂的 p 型半导体, 呈蓝色, 是良好的高温半导体材料。金刚石有着优异的物理与化学性质, 在光学、电子、微波、辐射探测中被广泛应用^[82]。

金刚石具有高载流子迁移率, 使其做成的辐射探测器相比于 Si、HPGe (高纯锗)、闪烁探测器等具有更快的脉冲响应及更短的脉冲波长下降沿; 高的电阻率大大改善了漏电流, 致使暗电流变小。器件可以在 500℃、甚至更高的温度工作; 金刚石材料内部杂质和缺陷很低, 使得载流子具有很高的寿命。

天然金刚石的数目稀缺, 价格昂贵, 因此人们用一系列合成方法研制出人造金刚石来代替天然金刚石, 例如高温高压法 (HTHP)^[83]、热丝化学气相

沉积法(HFCVD)^[84]、微波等离子化学气相沉积法(MPCVD)等^[85]。其中MPCVD以其生长速度快、晶体尺寸大、质量高成为探测器级金刚石的首选制备方法。

4.2 金刚石辐射探测器主要研究进展

金刚石具有极强的耐辐照特性,因此在半导体探测器的发展历史中,是首个被应用于辐射探测的半导体材料,但是由于单晶质量及尺寸的限制,一直应用领域较窄。1923年,Guuden和Pohl利用光电导探测器研究了金刚石的吸收特性,实现了光电导紫外探测器^[86]。在1947年,Wooldridge等^[87]在金刚石探测器中首次检测到 α 粒子产生的脉冲信号,1948年Friedman等^[88]证实IIa金刚石最适用于辐照探测器。20世纪60年代,由Bundy领导小组合成了第一颗人造金刚石^[89],但应用范围并不大。20世纪90年代后CVD合成金刚石在辐照探测器研究方面开始流行,在欧洲核子研究组织(CERN)成立的RD42小组在大型强子对撞机(LHC)上应用CVD金刚石进行辐照研究获得巨大进步,这方面的研究才正式拉开帷幕。1995年,出现关于使用金刚石探测器探测核聚变的报道^[90]。1999年,第一次将金刚石探测器应用于 α 粒子、 ^{12}C 、 ^{20}Ne 、 ^{58}Ni 、 ^{208}Pb 和 ^{238}U 等重离子测量实验^[91]。2015年,单晶金刚石应用于核聚变的裂片探测^[92]。

涉及金刚石探测器的能量分辨方面,波兰的Wodniak等^[93]在 $2.5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}\times 50\text{ }\mu\text{m}$ 金刚石单晶上制备了厚度为20 nm欧姆接触电极的 α 粒子探测器,其半峰宽度为21 keV,最小能量分辨率为0.36%,与Si探测器相当。Krasilnikov等^[94]开发了3种基于自然金刚石探测器(NDD)的光谱测定系统,并在托卡马克聚变试验反应堆(TFTR)上进行了氘-氚(D-T)中子谱和通量测量。D-T中子通过 $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ 反应与NDD反应相互作用,在脉冲高度分布中产生一个较窄的峰,具有2%~3%的能量分辨率。Giacomelli等^[95]所做的实验结果表明,20 MeV入射中子的能量分辨率与探测效率都为1%,为高能核聚变装置的快离子物理研究开辟了新的前景。

4.3 金刚石辐射探测器发展中的问题

金刚石核辐射探测器具有良好的能量分辨率;线性度好,在大能量范围内,脉冲信号振幅与入射粒子能量成正比;密度较高,具有较高的探测效率;脉冲响应时间快;可在真空环境工作,对外磁场敏感度低;可以在较高温度下工作,耐腐蚀,性能稳定;抗辐照能力高,这使得该探测器特别适合中子的测量;金刚石材料的探测器具有较长的寿命,特别适合强辐射环境粒子测试,并具有功耗低、体积小、精度高等优点。金刚石材料的探测器目前面临以下2个问题。

1) 金刚石探测器尺寸小且材料内部缺陷高。金刚石单晶目前还很难制备出大于 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 面积的探测器,另外,金刚石内部存在的缺陷会作为电荷俘获中心,导致电荷收集距离较短,造成电荷收集效率下降。

2) 全能量范围探测问题。金刚石探测器只能实现中高能粒子的探测,对于能量低区难以进行探测。可以采取多层金刚石膜结构设计外加神经网络算法,将能量探测范围扩大。

5 结论

半导体探测器要求材料具有低缺陷、低非故意掺杂的载流子浓度、大尺寸均匀性及良好的器件兼容性,第三代半导体探测器从材料、器件设计及工艺、性能表征等方面还有很大的发展潜力,正向着耐高温(大于 175°C)、耐辐照、超快、超高分辨位置探测、高效中子探测领域发展,并在众多场景中实现了应用。此外,一些新型的第三代半导体材料近年来也展现出良好的发展潜力,如更宽带隙的 AlN ^[96]、 BN ^[97]等材料。随着研究的不断深入,第三代半导体辐射探测器的出现必然会促进核科学、空间探测、粒子及高能物理等方面的研究,对于国家提升核心竞争力具有重要的推动作用。

参考文献(References)

[1] 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.
- [2] Gerhard L. 半导体辐射探测器[M]. 刘忠立, 译. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [3] 许平. CVD 金刚石膜辐射探测器的研制与性能研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
- [4] Hofstadter R. Remarks on diamond crystal counters[J]. *Physical Review*, 1948, 73(6): 631–631.
- [5] Ohl R S. Properties of ionic bombarded silicon[J]. *Bell System Technical Journal*, 1952, 31(1): 104–121.
- [6] Friedland S S, Mayer J W, Denney J M. Room temperature operated p-n junctions as charged particle detectors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1960, 31(1): 74–75.
- [7] Larsh A E, Gordon G E, Sikkeland T. Use of silicon p-n junction detectors in studies of nuclear reactions induced by heavy ions[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1960, 31(10): 1114–1118.
- [8] Cedarlund R, Horn A, Scolnick M. Solid-state detector for monitoring 14-Mev neutron production[J]. *Nuclear Instruments & Methods*, 1961, 13(3): 305–308.
- [9] Nybakken T W, Vali V. A hybrid preamplifier for cooled lithium ion-drifted semiconductor detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1965, 32(1): 121–124.
- [10] Baertsch R D, Hall R N. Gamma-ray detectors made from high purity germanium[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1970, NS17(3): 235–240.
- [11] 欧阳晓平, 刘林月. 电流型碳化硅探测器[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(10): 1999–2011.
- [12] 靳根, 陈法国, 杨亚鹏, 等. 耐高温耐辐射的碳化硅半导体探测器[J]. *核电子学与探测技术*, 2010, 30(7): 909–912.
- [13] Wang J H, Mulligan P, Brillson L, et al. Review of using gallium nitride for ionizing radiation detection[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(3): 031102.
- [14] 王伟. 宽带隙半导体 4H-SiC 核辐射探测器的设计与仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [15] Round H J. A note on carborundum[J]. *Electrical World*, 1907, 49: 309.
- [16] Lely J A. Darstellung von einkristallen von silicium carbid und beherrschung von art und menge der eingebautem verunreinigungen[J]. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 1955, 32: 229.
- [17] Sciortino S, Hartjes F, Lagomarsino S, et al. Effect of heavy proton and neutron irradiations on epitaxial 4H-SiC Schottky diodes[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2005, 552(1/2): 138–145.
- [18] Badcock R R S, Schupp F, Sun K. Miniature neutron detectors[R]. Pittsburgh: Westinghouse Electrical Corp. Materials Engineering Report, 1957.
- [19] Tikhomirova V A, Fedoseeva O P, Bol'Shakov V V. Silicon-carbide detectors as fission-fragment counters in reactors[J]. *Measurement Techniques*, 1973, 16(6): 900–901.
- [20] 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.
- [21] Ruddy F H, Seidel J G, Chen H Q, et al. High-resolution alpha-particle spectrometry using 4H silicon carbide semiconductor detectors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 2006, 53(3): 1713–1718.
- [22] Zat'ko B, Dubecky F, Sagatova A, et al. High resolution alpha particle detectors based on 4H-SiC epitaxial layer [J]. *Journal of Instrumentation*, 2015, 10(4): C04009
- [23] Torrisi L, Sciuto A, Cannavo A, et al. SiC detector for sub-MeV alpha spectrometry[J]. *Journal of Electronic Materials* 2017, 46(7): 4242–4249.
- [24] Tudisco S, La Via F, Agodi C, et al. Sicilia-silicon carbide detectors for intense luminosity investigations and applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2289.
- [25] Calcagno L, Musumeci P, Cutroneo M, et al. MeV ion beams generated by intense pulsed laser monitored by silicon carbide detectors[J]. *Journal of Physics Conference*, 2014, 508: 012009.
- [26] Jimenez-Ramos M C, Lopez J G, Osuna A G, et al. IBIC analysis of SiC detectors developed for fusion applications[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 177: 109100.
- [27] Puglisi D, Bertuccio G. Silicon carbide microstrip radiation detectors[J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 835.
- [28] 胡青青. 碳化硅中子探测器的研究[D]. 合肥: 国防科学技术大学, 2012.
- [29] Liu L Y, Ouyang X, Ruan J L, et al. Performance comparison between SiC and Si neutron detectors in deuterium-tritium fusion neutron irradiation[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(4): 737–741.
- [30] Ruddy F H, Dulloo A R, Petrovic B, et al. Fast neutron spectrometry using silicon carbide detectors[C]//11th International Symposium on Reactor Dosimetry. Brussels, Belgium, 18–23 August, 2003: 347–355.
- [31] Vervisch V, Issa F, Ottaviani L, et al. Nuclear radiation detector based on ion implanted p-n junction in 4H-SiC

- [C]/3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 6728002.
- [32] Lo Gludice A, Fasolo F, Durisi E, et al. Performances of 4H-SiC Schottky diodes as neutron detectors[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2007, 583(1): 177-180.
- [33] 李正. 用于高温强辐射场的SiC中子探测器技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.
- [34] Huang H, Tang X, Guo H, et al. Design and spectrum calculation of 4H-SiC thermal neutron detectors using FLUKA and TCAD[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 833: 192-198.
- [35] Nida S, Tsibizov A, Ziemann T, et al. Silicon carbide X-ray beam position monitors for synchrotron applications [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2019, 26: 28-35.
- [36] Mandal K C, Muzykov P G, Chaudhuri S K, et al. Assessment of 4H-SiC epitaxial layers and high resistivity bulk crystals for radiation detectors[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2012, 8507: 85070C-1-5.
- [37] Liu L Y, Liu J L, Chen L, et al. Properties of 4H silicon carbide detectors in the radiation detection of 86 MeV oxygen particles[J]. Diamond and Related Materials, 2017, 73: 177-181.
- [38] 张林, 张义门, 张玉明, 等. 4H-SiC肖特基二极管 γ 射线探测器的模型与分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 854-858.
- [39] 蒋勇, 吴健, 韦建军, 等. 基于4H-SiC肖特基二极管的中子探测器[J]. 原子能科学技术 2013, 2013(4): 664-668.
- [40] 陈雨, 范晓强, 蒋勇, 等. 4H-SiC肖特基二极管 α 探测器研究[J]. 核电子学与探测技术 2013, 33(1): 57-61.
- [41] 吴健, 蒋勇, 甘雷, 等. 基于4H-SiC的高能量分辨率 α 粒子探测器[J]. 强激光与粒子束 2015, 27(1): 014004-1.
- [42] 蒋勇. 基于PIPS的数字化 ${}^6\text{Li}$ 夹心谱仪中子能谱测量技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.
- [43] Jiang Y, Wu J, Li Z, et al. A neutron beam monitor based on silicon carbide semiconductor coated with ${}^6\text{LiF}$ converter[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a—Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2019, 921: 14-17.
- [44] Dong P, Cui Y X, Chen Z, et al. Effects of neutron irradiation on the static and switching characteristics of high-voltage 4H-SiC p-type gate turn-off thyristors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices 2019, 66(9): 3917-3922.
- [45] Yang J Q, Li H Y, Dong S L, et al. Pinning effect on Fermi level in 4H-SiC Schottky diode caused by 40-MeV Si ions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(9): 2042-2047.
- [46] 韩冲, 崔兴柱, 梁晓华, 等. 辐照后4H-SiC带电粒子探测器的特性研究[J]. 核技术, 2019, 42(5): 51-56.
- [47] Kramberger G, Cindro V, Flores D, et al. Timing performance of small cell 3D silicon detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 934: 26-32.
- [48] Kandlakunta P, Tan C, Smith N, et al. Silicon carbide detectors for high flux neutron monitoring at near-core locations[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2020, 953: 163110.
- [49] Newbury D E, Ritchie N W M. Quantitative electron-excited X-ray microanalysis of borides, carbides, nitrides, oxides, and fluorides with Scanning Electron Microscopy/Silicon Drift Detector Energy-Dispersive Spectrometry (SEM/SDD-EDS) and NIST DTSA-II[J]. Microscopy and Microanalysis, 2015, 21(5): 1327-1340.
- [50] Mavroidis C. Electron transport in GaN epitaxial layers [D]. London: University College London, 2003.
- [51] Liu L, Edgar J H. Substrates for gallium nitride epitaxy [J]. Materials Science and Engineering, 2002, 37: 61-127.
- [52] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, et al. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(5): 353-355.
- [53] Lui H F, Fong W K, Surya C. Characteristics of MBE-grown GaN detectors on double buffer layers under high-power ultraviolet optical irradiation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 54(4): 671-676.
- [54] Zhang Y M, Wang J F, Cai D M, et al. Growth and doping of bulk GaN by hydride vapor phase epitaxy[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(2): 14.
- [55] Osinsky V, Sukhoviyy N, Masol I, et al. MOCVD integration technology of enestor through grafene-like III-Ni-

- tride, nanocarbitides and InGaN/GaN QDs[C]//2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (Elnano). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 335–339.
- [56] Xu K, Wang J F, Ren G Q. Progress in bulk GaN growth [J]. Chinese Physics B, 2015, 24(6): 16.
- [57] Jain S C, Willander M, Narayan J, et al. III-nitrides: Growth, characterization, and properties[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(3): 965–1006.
- [58] Nakamura S, Mukai T, Senoh M. Si- and Ge-doped gan films grown with GaN buffer layers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31: 2883–2888.
- [59] Wang H, Chen A B. Calculation of shallow donor levels in GaN[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(11): 7859–7863.
- [60] Nakamura S, Mukai T, Senoh M, et al. Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GAN films[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(2B): L139–L142.
- [61] Boguslawski P, Bernhole J. Doping properties of C, Si, and Ge impurities in GaN and AlN[J]. Physical Review B, 1997, 56(15): 9496–9505.
- [62] Wong Y Y, Chang E Y, Yang T H, et al. The roles of threading dislocations on electrical properties of AlGaIn/GaN heterostructure grown by MBE[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2010, 157(7): H746–H749.
- [63] Hsu J W P, Manfra M J, Chu S N G, et al. Effect of growth stoichiometry on the electrical activity of screw dislocations in GaN films grown by molecular-beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(25): 3980–3982.
- [64] Chen C, Meng F C, Song J. Effects of Mg and Al doping on dislocation slips in GaN[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(6): 064302.
- [65] Vaitkus J, Cunningham W, Gaubas E, et al. Semi-insulating GaN and its evaluation for α particle detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 509(1/2/3): 60–64.
- [66] Vaitkus J, Gaubas E, Shirahama T, et al. Space charge effects, carrier capture transient behaviour and α particle detection in semi-insulating GaN[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 514(1/2/3): 141–145.
- [67] Polyakov A Y, Smirnov N B, Govorkov A V, et al. Alpha particle detection with GaN Schottky diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(10): 103708.
- [68] Wang G, Fu K, Yao C S, et al. GaN-based PIN alpha particle detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 663(1): 10–13.
- [69] Zhu Z, Zhang H, Liang H, et al. High-temperature performance of gallium-nitride-based pin alpha-particle detectors grown on sapphire substrates[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 893: 39–42.
- [70] Geng X L, Xia X C, Huang H L, et al. Simulation of GaN micro-structured neutron detectors for improving electrical properties[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(2): 467–473.
- [71] Grant J, Cunningham W, Blue A, et al. Wide bandgap semiconductor detectors for harsh radiation environments [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, 546(1/2): 213–217.
- [72] Xu Q, Mulligan P, Wang J, et al. Bulk GaN alpha-particle detector with large depletion region and improved energy resolution[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 849: 11–15.
- [73] Sandupatla A, Arulkumaran S, Ranjan K, et al. Low voltage high-energy alpha-particle detectors by GaN-on-GaN Schottky diodes with record-high charge collection efficiency[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5107.
- [74] Lee I H, Polyakov A Y, Smirnov N B, et al. Electrical properties and radiation detector performance of free-standing bulk n-GaN[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2012, 30(2): 021205.
- [75] Duboz J Y, Laught M, Schenk D, et al. GaN for x-ray detection[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(26): 263501.
- [76] Duboz J Y, Beaumont B, Reverchon J L, et al. Anomalous photoresponse of GaN x-ray Schottky detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(11): 114512.
- [77] Duboz J Y, Frayssinet E, Chenot S, et al. X-ray detectors based on GaN Schottky diodes[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(16): 163504.
- [78] Yao C S, Fu K, Wang G, et al. GaN-based p-i-n X-ray

- detection[J]. *physica status solidi*, 2012, 209(1): 204–206.
- [79] Zhou L, Lu X, Wu J, et al. Self-powered fast-response X-ray detectors based on vertical GaN p-n diodes[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(7): 1044–1047.
- [80] Jinghui W, Kandlakunta P, Kent T F, et al. A gadolinium doped superlattice GaN Schottky diode for neutron detection[J]. *Transactions of the American Nuclear Society*, 2011, 104: 209–10.
- [81] Zhu Z F, Zou J J, Tang B, et al. Effects of 10 MeV electron irradiation on the characteristics of gallium-nitride-based pin alpha-particle detectors[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2018, 902: 9–13.
- [82] 成绍恒. CVD金刚石单晶生长及金刚石晶体管的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- [83] Tartoni N, Angelone M, Pillon M, et al. X-ray detection by using CVD single crystal diamond detector[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56(3): 849–852.
- [84] Zhang M L, Xia Y B, Wang L J, et al. Effects of the grain size of CVD diamond films on the detector performance[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(19): 5269–5272.
- [85] 阳硕, 满卫东, 赵彦君, 等. MPCVD法合成单晶金刚石的研究及应用进展[J]. *真空与低温*, 2015, 21(3): 131–138.
- [86] Gudden B, Pohl R. Das quantenäquivalent bei der lichtelektrischen Leitung[J]. *Zeitschrift für Physik*, 1923, 17(1): 331–346.
- [87] Wooldridge D E, Ahearn A J, Burton J A. Conductivity pulses induced in diamond by alpha-particles[J]. *Physical Review*, 1947, 71(12): 913–913.
- [88] Friedman H, Birks L S, Gauvin H P. Ultraviolet transmission of counting diamonds[J]. *Physical Review*, 1948, 73(2): 186–187.
- [89] Bundy F P, Hall H T, Strong H M, et al. Man-made diamonds[J]. *Nature*, 1955, 176(4471): 51–55.
- [90] Pillon M, Angelone M, Krasilnikov A V. 14 MeV neutron-spectra measurements with 4-percent energy resolution using a type-IIa diamond detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1995, 101(4): 473–483.
- [91] Berdermann E, Blasche K, Moritz P, et al. First applications of CVD-diamond detectors in heavy-ion experiments[J]. *Nuclear Physics B: Proceedings Supplements*, 1999, 78(1): 533–539.
- [92] Frégeau M O, Oberstedt S, Brys T, et al. First use of single-crystal diamonds as fission-fragment detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 791: 58–64.
- [93] Wodniak I, Drozdowicz K, Dankowski J, et al. CVD diamond detectors for fast alpha particles escaping from the tokamak D-T plasma[J]. *Nukleonika*, 2011, 56(2): 143–147.
- [94] Krasilnikov A V, Azizov E A, Roquemore A L, et al. FTTR natural diamond detectors based D-T neutron spectrom physical defects and degradation mechanisms of GaN-based electronic devices entry system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 553–556.
- [95] Giacomelli L, Nocente M, Rebai M, et al. Neutron emission spectroscopy of DT plasmas at enhanced energy resolution with diamond detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11D822.
- [96] 何君, 李明月. 超宽禁带 AlN 材料及其器件应用的现状和发展趋势[J]. *半导体技术*, 2019, 44(4): 241–250.
- [97] Maity A, Grenadier S J, Li J, et al. High efficiency hexagonal boron nitride neutron detectors with 1cm² detection areas[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(14): 142102.

Research progress of the third generation semiconductor radiation detector

LIANG Hongwei, LIAO Chuanwu, XIA Xiaochuan, LONG Ze, GENG Xinlei, NIU Mengchen, HAN Zhongyuan

School of Microelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract As representatives of the third generation semiconductor of the wide band gap, the gallium nitride, the silicon carbide and diamond with high breakdown electric field, high saturated electron rate, high heat conductivity and high displacement threshold, high temperature resistance, high radiation resistance, can be applied as the radiation detector in the space detection, the high energy particle physics, and other fields, with important potential applications. The properties of several third-generation semiconductors, the main preparation methods of the radiation detectors and the testing progress for different radiations are addressed emphatically, and the development trend of third-generation semiconductors in the radiation detection is also prospected. It is proposed that the emergence of the third generation semiconductor radiation detectors will promote the research of nuclear science, space exploration, particle and high energy physics, and play an important role in promoting the national core competitiveness.

Keywords third generation semiconductor; radiation detectors; temperature resistance; radiation resistance; wide band gap semiconductor ●



(责任编辑 王志敏)