

基于4H-SiC肖特基势垒二极管的 γ 射线探测器

杜园园 张春雷 曹学蕾

γ -ray detector based on n-type 4H-SiC Schottky barrier diode

Du Yuan-Yuan Zhang Chun-Lei Cao Xue-Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 207301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.207301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.207301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于放射性气体源体积的虚拟源刻度技术

[Study on the virtual source calibration technology based on the volume of radioactive gas source](#)

物理学报.2016, 65(6): 062901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.062901>

不同退火方式对Ni/SiC接触界面性质的影响

[Effect of different annealing treatment methods on the Ni/SiC contact interface properties](#)

物理学报.2015, 64(6): 067303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.067303>

金属与半导体Ge欧姆接触制备、性质及其机理分析

[Properties and mechanism analysis of metal/Ge ohmic contact](#)

物理学报.2013, 62(16): 167304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.167304>

积分中值定理在放射性氙样品 γ 谱效率刻度技术中的应用

[Application of mean value theorem of integrals in the efficiency calibration technology of radioactive xenon sample](#)

物理学报.2013, 62(16): 162902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.162902>

基于压缩感知理论的非线性 γ 谱分析方法

[A non-linear analysis for gamma-ray spectrum based on compressed sensing](#)

物理学报.2013, 62(11): 112901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.112901>

基于4H-SiC肖特基势垒二极管的 γ 射线探测器*杜园园[†] 张春雷 曹学蕾

(中国科学院高能物理研究所, 粒子天体物理重点实验室, 北京 100049)

(2016年5月12日收到; 2016年7月29日收到修改稿)

针对极端环境下耐高温和耐辐照半导体核探测器的研制需求, 采用外延层厚度为100 μm 的4H碳化硅(4H-SiC)制备成肖特基二极管探测器, 研究了该探测器对 ^{241}Am 源 γ 射线的能谱响应. 采用磁控溅射金属Ni制备了肖特基二极管的欧姆接触和肖特基接触, 利用室温电流-电压和电容-电压测试研究了二极管的电学特性. 欧姆特性测试表明, 1050 $^{\circ}\text{C}$ 退火时, 欧姆接触特性最好. 从正向电流-电压曲线得出二极管肖特基势垒高度为1.617 eV, 理想因子为1.127, 表明探测器具备良好的热电子发射特性. 从电容-电压曲线获得二极管外延层净掺杂浓度为 $2.903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 并研究了自由载流子浓度在外延层中的纵向分布. 在反向偏压为500 V时, 二极管的漏电流只有2.11 nA, 具有较高的击穿电压. 测得在-300 V条件下, SiC二极管探测器对能量为59.5 keV的 γ 射线的能量分辨率为9.49% (5.65 keV).

关键词: 4H-SiC, 宽禁带半导体, 肖特基二极管, γ 射线探测器

PACS: 73.40.Sx, 73.40.Cg, 29.40.Wk, 29.30.Kv

DOI: 10.7498/aps.65.207301

1 引言

X射线探测技术在空间科学、工农业生产及安全检测中都有着广泛的应用, 而在外太空及高能物理实验等高温高压以及强辐射环境中进行辐射探测时, 探测器的耐高温和耐高压性能备受关注. 碳化硅(SiC)因其特有的大禁带宽度、高临界击穿场强、高热稳定性、高电子迁移率、高热导率、抗辐照性能优越等特性^[1,2], 比常用的硅探测器具有更好的耐高温^[3]和耐辐照性能^[4], 被认为是制作高温、高频、大功率和抗辐照器件极具潜力的宽带隙半导体材料^[5,6]. 随着SiC材料生长工艺和器件工艺的成熟, 近年来SiC在核探测领域引起了极大的关注, 如在致电离粒子(X, γ , α 等)^[7,8]、中子探测等^[9]方面有着广泛的应用. 国内在SiC应用于核探测方面的研究仍处于起步阶段, 主要集中在 α 粒子探测研究^[10,11]、热中子探测研究等^[12,13]方面. 由于制备的外延片的外延层的厚度较小($<20 \mu\text{m}$), 只能制

备出 α 粒子探测器, 对于 γ 射线探测器研究较少.

对于SiC γ 射线探测器来说, 外延层的厚度越大, 击穿电压越高, 探测器的漏电流越小, 探测器的性能越好. 但是, 随着外延层厚度的增加, 外延层中的缺陷增多, 给器件的制作带来困难. 目前, 文献中报道的外延层厚度最大为140 μm ^[14]. 为研究SiC肖特基二极管作为 γ 射线探测器的可能, 本文采用外延层厚度为100 μm 的4H-SiC外延片, 采用金属Ni分别作为欧姆接触和肖特基接触的电极材料, 制备成肖特基二极管, 进一步封装成SiC肖特基势垒二极管探测器, 并研究了探测器的电学性能和能谱特性.

2 探测器制备和实验方法

2.1 SiC探测器的制备

实验中采用的4H-SiC外延片为Cree公司生产的研究级SiC外延片, 衬底厚度为360 μm , 外延

* 国家自然科学基金(批准号: 11203026)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: duyuanyuan@ihep.ac.cn

层与衬底之间缓冲层的厚度为1 μm, 衬底和缓冲层氮掺杂浓度均为 10^{18} cm^{-3} . 外延层厚度为100 μm, 经高频电容-电压 ($C-V$) 测试得到外延层净掺杂密度 $N_D = 2.903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. 在4H-SiC衬底表面磁控溅射100 nm的Ni膜以形成欧姆接触, 在不同温度下退火用以改善欧姆接触性能, 降低比接触电阻率. 在得到好的欧姆接触之后, 在欧姆接触表面蒸镀6 μm的Au作为金属加厚层, 外延层硅面溅射100 nm的Ni膜以形成肖特基接触. 采用以

上工艺制备的4H-SiC肖特基二极管的横截面图如图1(a)所示.

在得到良好的欧姆接触和肖特基接触后, 对SiC探测器进行封装和压焊. 所用的探测器基板为陶瓷PCB板, 背面欧姆接触通过Ag导电胶与印刷有电路的PCB基板相连, 正面肖特基接触通过25 μm的金丝与PCB板的管脚相连, 封装好的探测器如图1(b)所示.

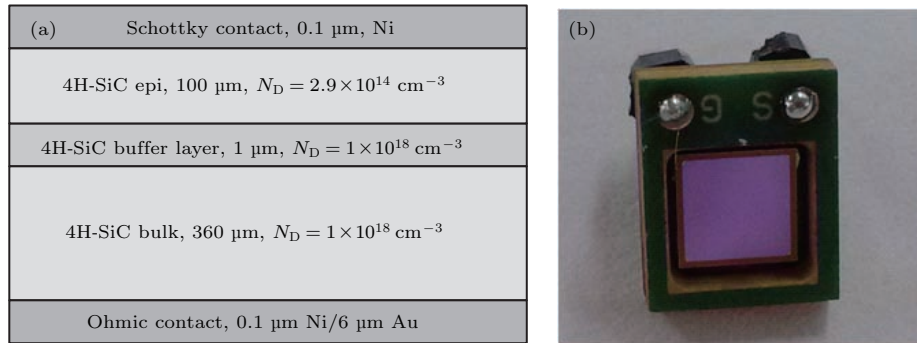


图1 SiC肖特基二极管结构示意图和封装好的SiC探测器 (a) 截面示意图; (b) 封装的探测器照片
Fig. 1. 4SiC Schottky barrier diode structure scheme and encapsulated SiC detector: (a) Sectional scheme; (b) photograph of encapsulated detector.

2.2 实验方法

2.2.1 电流-电压、电容-电压测量

探测器的正向和反向电流-电压 ($I-V$) 特性均采用Keithley 6487皮安表进行测量, 正向 $I-V$ 特性测试范围为0—1.2 V, 反向测试电压范围为-500—0 V. 电容-电压 ($C-V$) 曲线采用Keithley 6487和Agilent E4980A LCR仪表组成的 $C-V$ 测试系统进行测量, 采用的频率 $f = 100 \text{ kHz}$, 电平 $\text{Level} = 1 \text{ V}$, 施加电压范围为-50—0 V, 在室温及黑暗条件下进行测量.

2.2.2 探测器性能测量

SiC探测器的 γ 射线能谱实验是在自行搭建的测试系统中进行的, 系统示意图如图2所示. 测试系统包括前置放大电路、电压源、成形放大器和高压源. 探测器插入前置放大电路当中, 前置放大电路和 ^{241}Am γ 源一起置于金属屏蔽盒内, 形成读出电路的原理样机. 样机对外连接的4个输入/输出端口分别是电源总线接口(5芯航空插头)、输入高压接口(5 kV高压接头)、输出信号接口(BNC接头)和测试信号输入端口(BNC接头). 前置放大电

路采用超低噪声、低功耗的电荷灵敏前放(A250F)实现, A250F与探测器采用交流耦合的方式. 成形放大器采用ORTEC 572, 高压源为ORTEC 710, 多道分析器采用Amptek MCA-8000A, 由两台固纬PPE-3323稳压直流电源作为电压源给读出电子学系统输出供电, 读出电子学所加电压为6 V, 采用的示波器为Tektronix TDS 2024B.

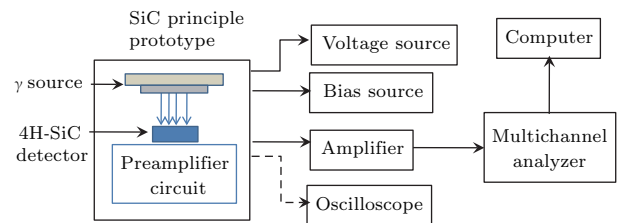


图2 SiC探测器 γ 射线能谱测试系统示意图
Fig. 2. The scheme of γ -ray spectroscopy response measurement system for SiC detector.

3 实验结果与讨论

SiC探测器的结构为肖特基势垒二极管结构, 为制备出性能优良的探测器, 要求欧姆接触有低的比接触电阻率和高稳定性, 肖特基接触有较大的

势垒高度和较低的反向漏电流. 因此本文首先对欧姆接触和肖特基接触性能进行表征, 然后对制备成的探测器的电学性能和能谱性能进行表征.

3.1 肖特基二极管接触性能的表征

3.1.1 欧姆性能的表征

Ni 与 SiC 的欧姆接触特性由淀积金属膜后的热退火测试结果决定. 图 3 为 Ni/SiC 接触相同电极间不同温度退火后 (900—1050 °C) 的 $V-I$ 曲线. 在退火温度高于 900 °C 时, 电极已形成欧姆接触, 随着退火温度的升高, 欧姆接触特性继续变好. 在 1050 °C 时, $V-I$ 曲线的斜率最小, 欧姆接触特性最好, 比接触电阻率值最低. 用线性传输线模型 (L-TLM) 计算出 1050 °C 时 Ni/SiC 的比接触电阻率 (ρ_c) 为 $2.55 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

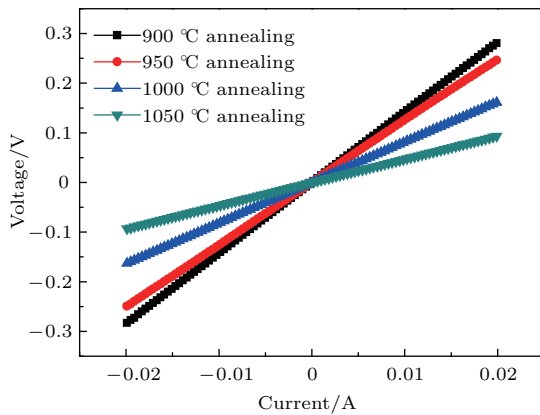


图 3 (网刊彩色) 不同退火温度下的 $V-I$ 曲线
Fig. 3. (color online) $V-I$ curve at different annealing temperature.

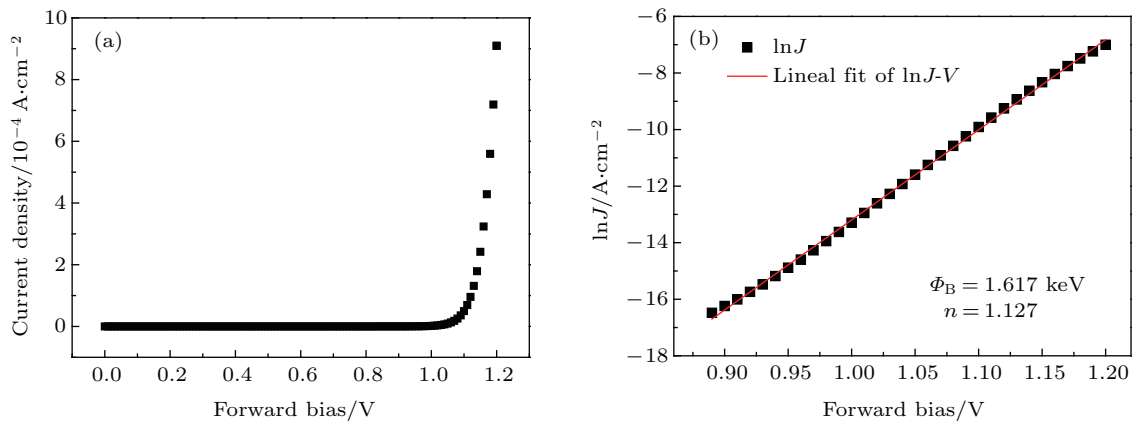


图 4 SiC 二极管的正向 $J-V$ 特性及拟合结果 (a) 正向 $J-V$ 特性; (b) 线性拟合
Fig. 4. Forward $J-V$ characteristic of SiC Schottky diode: (a) Forward $J-V$ characteristic; (b) linear fitting of forward $\ln J-V$ curve.

3.1.2 肖特基接触的表征

图 4 (a) 为 SiC 肖特基二极管的正向 $J-V$ 曲线, 当所加正向电压较大时, $J-V$ 曲线呈折线状, 对折线部分进行线性拟合, 可求出二极管的正向导通电压为 0.88 V, 与 Cree 公司出售的肖特基二极管在室温下的正向导通电压相当 [15]. 对于一般的肖特基二极管, 在较小的正偏压下, 可采用热电子发射机制描述 $J-V$ 关系式为 [15,16]

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1\right] = J_S \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1\right], \quad (1)$$

式中, J 为二极管的正向电流, A^* 为 4H-SiC 的有效 Richardson 系数 ($146 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$), ϕ_B 为肖特基势垒高度, n 为理想因子, V 为所加正电压, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, q 为电子电荷, J_S 为反向饱和漏电流. 根据 (1) 式, 对图 4 (a) 中的数据点进行拟合, 如图 4 (b) 所示, 计算出肖特基势垒高度为 1.617 eV, 理想因子的值为 1.127, 接近于 1, 表明其电流输运机制为热电子发射机制. 与文献报道 Ni/SiC 肖特基接触的肖特基势垒和理想因子的范围在 1.3—1.7 keV 和 1.05—1.21 [17] 比较接近.

图 5 (a) 为肖特基二极管的 $C-V$ 特性, 对 $1/C^2-V$ 曲线进行线性拟合, 计算出金属-外延层界面附近的掺杂浓度 $N_D = 2.903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. 图 5 (b) 为根据 $C-V$ 曲线计算出的 SiC 外延层中自由载流子沿外延层的纵向分布, 自由载流子在耗尽层中分布比较均匀, 大部分值集中在 $3.05 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 与拟合结果 $2.903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 接近.

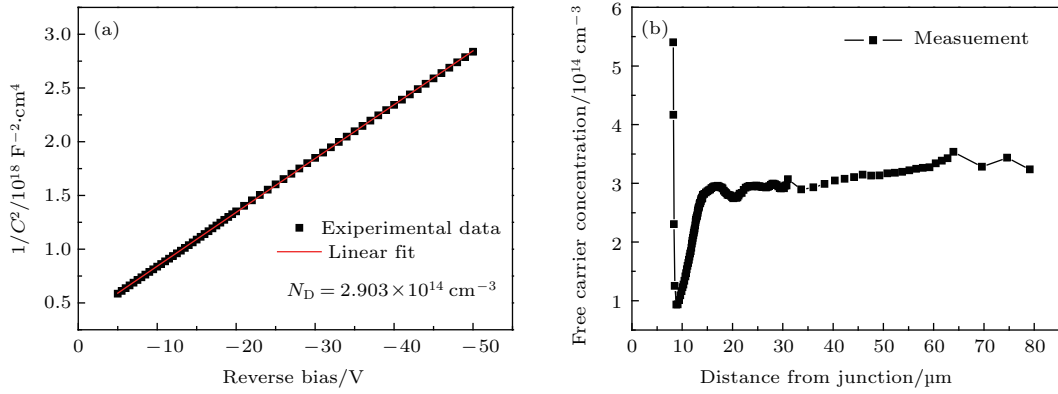


图5 SiC二极管的电容-电压特性 (a) $1/C^2$ 与偏压的关系图; (b) 自由载流子浓度纵向分布
Fig. 5. C - V characteristic of SiC Schottky diode: (a) $1/C^2$ versus reverse voltage; (b) longitudinal distribution profile of the free carrier concentration.

3.2 SiC探测器的性能表征

3.2.1 反向 I - V 特性和耗尽层宽度与偏压的关系

为研究不同外延层厚度的探测器的电学性能, 将外延层厚度为 $20\ \mu\text{m}$, $N_D = 1.4 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 的外延片 (外延层系南京电子器件研究所生长制备, 衬底参数同外延层厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的外延片), 采用相同探测器制备工艺制备成肖特基二极管探测器. 采用外延层厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 外延片制备的二极管肖特基势垒高度为 $1.452\ \text{eV}$, 理想因子为 1.17 . 探测器在反向偏压下的漏电流是探测器性能的重要参数, 是探测器噪声的主要来源, 直接影响探测器的能量分辨率的好坏和灵敏度的高低. 图6为两个不同SiC探测器的反向 I - V 特性, 从反向 I - V 曲线可以看出, 对于外延层厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 的探测器, 在反向电压为 $500\ \text{V}$ 时, 二极管未被击穿, 漏电流为 $54.3\ \text{nA}$, 而 $100\ \mu\text{m}$ 的探测器的漏电流只有 $2.11\ \text{nA}$. 肖特基二极管的反向饱和漏电流的大小与肖特基结的势垒高度有关, 在制备工艺相同的情况下, 肖特基的势垒高度主要与外延层的掺杂浓度有关. 20 和 $100\ \mu\text{m}$ 的探测器的肖特基势垒高度分别为 1.452 和 $1.617\ \text{eV}$, 因此 $20\ \mu\text{m}$ 的探测器的反向漏电流高于 $100\ \mu\text{m}$ 的探测器. 观察两个探测器的反向 I - V 曲线, 发现 $100\ \mu\text{m}$ 的探测器的反向 I - V 曲线更符合二极管的特性, 肖特基二极管基本遵循热电子发射机理, 即二极管的反向漏电流为恒定值, 在偏压小于 $400\ \text{V}$ 时, I - V 曲线几乎与横轴平行, 表现出很好的整流特性, 只在二极管外加反向电压的数值大到一定程度才会迅速增加, 二极管

的反向击穿电压约为 $400\ \text{V}$. 而 $20\ \mu\text{m}$ 的反向漏电流随着负偏压的增加而逐渐增大, 说明该肖特基二极管并不完全遵循热电子发射机理, 还受到镜像力和隧穿效应的影响^[15].

同时计算了两个探测器的耗尽层宽度与电压的关系, 在偏压为 $500\ \text{V}$ 时, $100\ \mu\text{m}$ 的SiC探测器的耗尽层宽度为 $94.4\ \mu\text{m}$, 接近于全耗尽, 漏电流为 $2.11\ \text{nA}$; 而 $20\ \mu\text{m}$ 在 $500\ \text{V}$ 的耗尽层宽度为 $19.6\ \mu\text{m}$, 也接近于全耗尽, 但漏电流为 $54.3\ \text{nA}$. 相比较而言, 外延层厚度大的探测器具有更高的击穿电压和更好的肖特基二极管特性, 在全耗尽的情况下有更小的漏电流, 符合 γ 射线探测器的工作电流要求, 适宜制备成 γ 射线探测器.

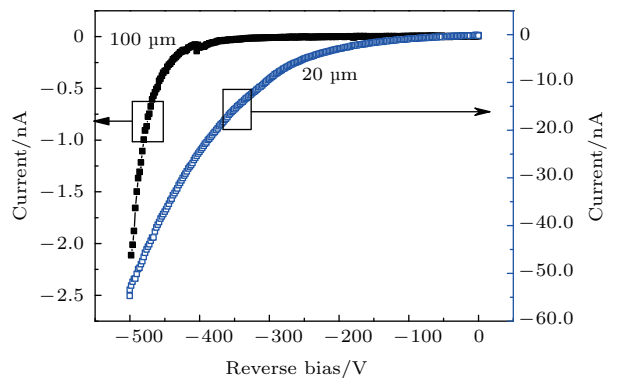


图6 不同外延层厚度的探测器的反向电压-电流特性
Fig. 6. Reverse I - V characteristic of SiC Schottky diodes with different epitaxial layer thickness.

3.2.2 探测器性能测试

采用探测器测试系统对外延层 $100\ \mu\text{m}$ 厚的SiC肖特基二极管探测器进行能谱测试, 采用的 γ 源为强度为 $100\ \mu\text{Ci}$ 的 ^{241}Am 源, 光子能量为

59.5 keV, 高压为 -300 V . 探测器漏电流为 7.25 pA . 探测器的输出信号经前放输入示波器, 可得到 59.5 keV γ 射线产生的脉冲波形, 其典型的脉冲波形如图 7 所示. 从前放得出的信号为负信号, 脉冲幅度为 15 mV , 幅度值相对较低.

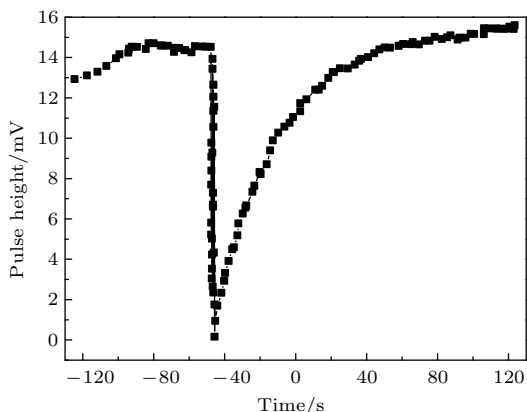


图 7 SiC 探测器经过前放的信号

Fig. 7. The signal of SiC detector through preamplifier.

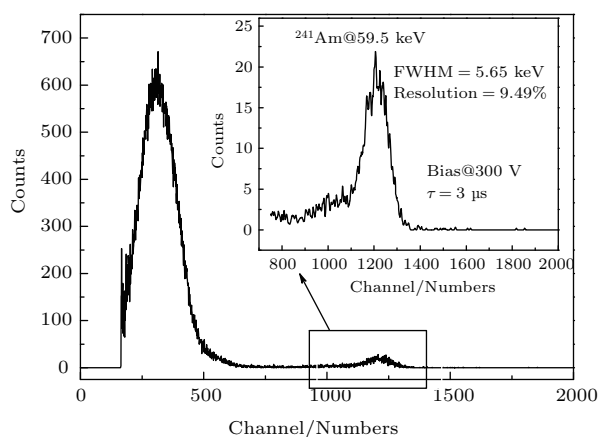


图 8 SiC 探测器对 $^{241}\text{Am}@59.5\text{ keV}$ γ 射线的能谱响应, 插图为全能峰的放大图

Fig. 8. A typical $^{241}\text{Am}@59.5\text{ keV}$ γ -ray spectroscopy response from SiC detector, the inset figure shows the amplification of 59.5 keV peak.

经过前放、主放和多道分析仪得到的能谱如图 8 所示, 采用的主放放大倍数为 160 倍, 成形时间为 $3\text{ }\mu\text{s}$, 测试时间为 5 min , 采取的阈值为 $8.00\%\text{ FS}$, 得到的信号计数率为 566.11 , 信号计数率较低, 而采用的源已是强度为 $100\text{ }\mu\text{Ci}$ 的强 ^{241}Am 源. SiC 探测器的计数率较低, 主要因为 SiC 探测器在 -300 V 的偏压下, 耗尽层宽度为 $71.61\text{ }\mu\text{m}$, 灵敏区宽度较低, 使探测器对光子的吸收率较小. 根据材料对 γ 射线透过率 $\eta = e^{-\alpha d}$ [18] (式中 α 为材料对 γ 射线的吸收系数, 4H-SiC 对 ^{55}Fe 和 ^{241}Am

的吸收系数分别取 300 和 0.8 [19], d 为灵敏区宽度), 可计算出 SiC 探测器对 ^{241}Am 射线的吸收效率随灵敏区宽度的变化, 如图 9 所示. 当 SiC 探测器全耗尽时, 吸收率也只有 0.8% , 因此在灵敏区内产生载流子的光子较少, 造成探测器的计数率低, 需要较长的累积时间才能得到幅度较高的全能峰. Lees 等 [20] 曾对耗尽层宽度为 $14.7\text{ }\mu\text{m}$ 的 SiC 探测器, 使用 70 MBq ($18.92\text{ }\mu\text{Ci}$) 的 ^{241}Am 源进行辐照, 累积时间为 142 h 才得到幅度为 150 的全能峰, 说明耗尽层的宽度对探测器计数率影响较大.

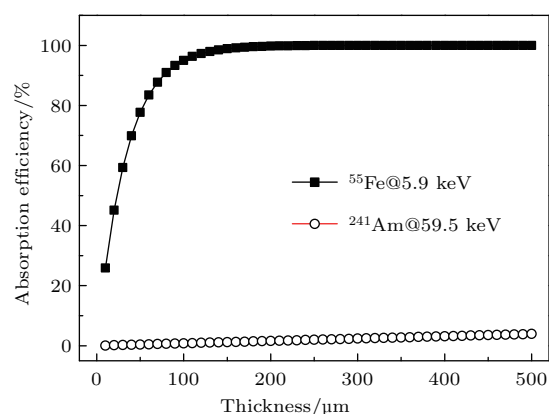


图 9 不同能量的 γ 射线在不同有效区域厚度的 SiC 探测器的吸收效率

Fig. 9. The absorption efficiency of various γ -ray deposited in various SiC detectors.

从图 8 可以看出, 全能峰的幅度比较低, 与前放输出的脉冲幅度略小、计数率低和收集时间短均有关系. 对全能峰区域进行放大, 得到图 8 插图中的图谱, 计算出全能峰的半峰宽为 5.65 keV , 能量分辨率为 9.49% . 与目前文献报道 [8] 的 1.2 keV (2.1%) 相比还有部分差距, 这也是后期需要努力的方向. 文献 [8] 中采用的放射源为 $1\text{ }\mu\text{Ci}$ 的 $^{241}\text{Am}@59.5\text{ keV}$, 累积时间为 10 min , 外延层厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 探测器欧姆接触为 Ni 接触, 尺寸为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 接触厚度为 100 nm , 肖特基接触为直径为 3.2 mm 的圆形 Ni 接触, 厚度为 10 nm . 而本文采用的探测器的灵敏区宽度和辐射源的强度均优于文献指标, 因此探测器的收集能力应该更优. 不同之处在于肖特基接触的厚度和面积, 肖特基接触的面积对能量分辨率影响不大. 虽然 SiC 探测器的 Ni 金属层以及金属 Ni 和外延层形成的结层可构成探测器的死层, 死层是探测器的非灵敏区, 死层的存在可以造成 α 粒子能量损失, 死层越厚 α 粒子探测器的能量分辨率越差 [21], 但对于 γ 射线

探测器而言, γ 射线对死层的穿透能力较强. 分别计算了 0—30 keV γ 射线对 10 和 100 nm Ni 层金属的穿透能力, 如图 10 所示, 发现对于 30 keV 的 γ 射线, 两种厚度的 Ni 层金属均接近于 100% 穿透, 可见探测器的肖特基接触厚度也不是影响能量分辨率的原因.

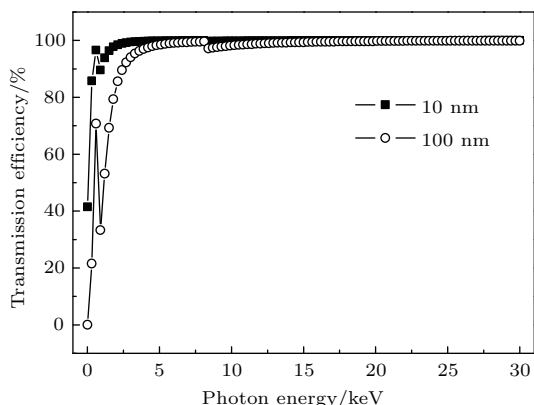


图 10 γ 射线对不同厚度 Ni 金属层的穿透能力

Fig. 10. The transmission efficiency of various γ -ray for Ni layer with different thickness.

影响探测器的能量分辨率主要有两方面, 探测器的质量和电子学噪音. 由前文分析可知, 制备的肖特基二极管特性较好, 各项指标均符合要求, 说明探测器的制备工艺应该问题不大. 因此, 探测器的能量分辨率不高原因之一可能是读出系统电路的电子学噪音, 需要对与 SiC 探测器匹配的前放电路进行改进. 原因之二可能是外延层厚度增加, 导致外延层中的缺陷增多, 如 SiC 外延片中可能存在与 C 空位及其复合物相关的电激活缺陷, 这些电激活缺陷作为产生-复合中心, 可导致载流子寿命降低和迁移率变差^[22]. 这两方面的原因可能对探测器性能的测试结果造成影响.

4 结 论

采用耐高温、耐辐照的外延层厚度为 100 μm 的 4H-SiC 外延片制备了肖特基二极管探测器, 研究了该探测器对 ^{241}Am 源 γ 射线的能谱响应. 在外延片的衬底 C 面和外延层 Si 面上分别沉积金属 Ni 制备肖特基二极管的欧姆接触和肖特基接触, 并封装成 SiC 探测器. 欧姆接触实验表明, 在退火温度为 900—1050 $^{\circ}\text{C}$ 时, 电极已形成欧姆接触, 1050 $^{\circ}\text{C}$ 退火时欧姆特性最好, 比接触电阻率最小, 为 $2.55 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 制备出的二极管肖特基势

垒高度为 1.617 eV, 理想因子为 1.127, 表明探测器具备良好的热电子发射特性. C-V 实验得到二极管外延层净掺杂浓度为 $2.903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 自由载流子浓度在外延层中的纵向分布比较均匀. 在反向偏压为 500 V 时, 二极管的漏电流仅有 2.11 nA, 探测器具有较高的击穿电压, 外延层在 -500 V 偏压下几乎全耗尽. 测得在 -300 V 条件下, SiC 二极管探测器对能量为 59.5 keV 的 γ 射线的能量分辨率为 9.49% (5.65 keV), 并就制备的探测器的计数率低和能量分辨率不高的原因进行了简要的分析.

参考文献

- [1] Rogowski J, Kubiak A 2012 *Mater. Sci. Eng. B* **177** 1318
- [2] Siad M, Vargas P C, Nkosi M, Saidi D, Souami N, Daas N, Chami C A 2009 *Appl. Surf. Sci.* **256** 256
- [3] Bertuccio G, Caccia S, Puglisi D, Macera D 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **652** 193
- [4] Nava F, Vittone E, Vanni P, Verzellesi G, Fuochi G P, Lanzieri C, Glaser M 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **505** 645
- [5] Han C, Zhang Y M, Song Q W, Tang X Y, Zhang Y M, Guo H, Wang Y H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 117304
- [6] Yuan L, Zhang Y M, Song Q W, Tang X Y, Zhang Y M 2015 *Chin. Phys. B* **24** 068502
- [7] Chaudhuri K S, Krishna M R, Zavalla J K, Mandal C K 2013 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **701** 214
- [8] Mandal C K, Muzykov G P, Chaudhuri K S, Terry R J 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 2888
- [9] Flammang W R, Seidel G J, Ruddy H F 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **579** 177
- [10] Wu J, Lei J R, Jiang Y, Chen Y, Rong R, Fan X Q 2013 *High Power Laser Part. Beams* **25** 1793 (in Chinese) [吴健, 雷家荣, 蒋勇, 陈雨, 荣茹, 范晓强 2013 强激光与粒子束 **25** 1793]
- [11] Wu J, Jiang Y, Gan L, Li M, Zou D H, Rong R, Lu Y, Li J J, Fan X Q, Lei J R 2015 *High Power Laser Part. Beams* **27** 014004 (in Chinese) [吴健, 蒋勇, 甘雷, 李勐, 邹德慧, 荣茹, 鲁艺, 李俊杰, 范晓强, 雷家荣 2015 强激光与粒子束 **27** 014004]
- [12] Jiang Y, Wu J, Wei J J, Fan X Q, Chen Y, Rong R, Zou D H, Li M, Bai S, Chen G, Li L 2013 *Atomic Energy Sci. Technol.* **47** 664 (in Chinese) [蒋勇, 吴健, 韦建军, 范晓强, 陈雨, 荣茹, 邹德慧, 李勐, 柏松, 陈刚, 李理 2013 原子能科学技术 **47** 664]
- [13] Wu J, Lei J R, Jiang Y, Chen Y, Rong R, Zou D H, Fan X Q, Chen G, Li L, Bai S 2013 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **708** 72
- [14] Iwamoto N, Johnson C B, Hoshino N, Ito M, Tsuchida H, Kojima K, Ohshima T 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 143714

- [15] Tong W L, Sun Y J, Liu Y H, Zhao G J, Chen Z Z 2015 *J. Shanghai Normal Univ. (Nat. Sci.)* **44** 430 (in Chinese) [童武林, 孙玉俊, 刘益宏, 赵高杰, 陈之战 2015 上海师范大学学报(自然科学版) **44** 430]
- [16] Liu J, Hao Y, Feng Q, Wang C, Zhang J C, Guo L L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3483 (in Chinese) [刘杰, 郝跃, 冯倩, 王冲, 张进城, 郭亮良 2007 物理学报 **56** 3483]
- [17] Shur M, Rumyantsev S, Levinshtein M (translated by Yang Y T, Jia H J, Duan B X) 2012 *SiC Materials and Devices, Volume I&II* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp88–92 (in Chinese) [Shur M, Rumyantsev S, Levinshtein M 主编(杨银堂, 贾护军, 段宝兴 译) 2012 碳化硅半导体材料与器件(北京: 电子工业出版社) 第 88—92 页]
- [18] Zha G Q, Wang T, Xu Y D, Jie W Q 2013 *Physics* **42** 862 (in Chinese) [查钢强, 王涛, 徐亚东, 介万奇 2013 物理 **42** 862]
- [19] Bertuccio G, Casiraghi R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 175
- [20] Lees E J, Bassford J D, Fraser W G, Horsfall B A, Vasilevski V K, Wright G N, Owens A 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **578** 226
- [21] Jiang Y, Fan X Q, Rong R, Wu J, Bai S, Li L 2012 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **32** 1372 (in Chinese) [蒋勇, 范晓强, 荣茹, 吴建, 柏松, 李理 2012 核电子学与探测技术 **32** 1372]
- [22] Mandal C K, Chaudhuri K S, Nguyen V K, Mannan A M 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 2338

γ -ray detector based on n-type 4H-SiC Schottky barrier diode*

Du Yuan-Yuan[†] Zhang Chun-Lei Cao Xue-Lei

(Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 12 May 2016; revised manuscript received 29 July 2016)

Abstract

Silicon carbide (SiC) is a wide band-gap, high-temperature-resistant, and radiation-resistant semiconducting material, which can be used as a radiation detector material in harsh environments such as high radiation background and high temperatures. Schottky barrier diode radiation detectors are fabricated using 100 μm -thick n-type 4H-SiC epitaxial layers for low energy γ -ray detection. The spectrum responses of 4H-SiC Schottky barrier detectors are investigated by irradiation of γ -ray from ^{241}Am source. Schottky diodes are prepared by magnetron-sputtering 100 nm-thick nickel on epitaxial surface (Si face) to obtain Schottky contact and Ni/Au on substrate surface (C face) to obtain Ohmic back contact, respectively. Room temperature current-voltage (I - V) and capacitance-voltage (C - V) curves are measured to study the properties of Schottky diodes. Ohmic characteristic measurement shows that the Ohmic contact is formed after annealing in a temperature range of 900–1050 $^{\circ}\text{C}$, and the lowest specific contact resistivity of $2.55 \times 10^{-5} \Omega\text{-cm}^2$ is obtained after annealing at 1050 $^{\circ}\text{C}$. The forward I - V curve reveals that the Schottky barrier height and the ideality factor are 1.617 eV and 1.127, respectively, indicating that the main current transportation process is the thermal electron emission. From the C - V curve, besides the net dopant concentration being inferred to be $2.903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, the profile of the free carrier concentration in epitaxial layer is also studied. A comparison of the reverse I - V curves of SiC Schottky diodes with different epitaxial layer thickness shows that the diode with 100 μm -thick epitaxial layer has a constant reverse leakage current when the bias voltage is less than 400 V, showing good rectification characteristics. By applying a reverse bias of 500 V, the diode has a leakage current of 2.11 nA, exhibiting a relatively high breakdown voltage. The depletion layer width of SiC detector is calculated to be 94.4 μm at 500 V, indicating that the epitaxial layer is almost fully depleted. The signal of SiC detector through preamplifier displays a relatively low amplitude pulse (15 mV). A typical γ -ray spectrum response from SiC detector shows 9.49% (5.65 keV) energy resolution for 59.5 keV with a reverse bias of 300 V. The potential causes of poor count rate and energy resolution of fabricated detectors are analyzed in this article. The lower count rate is mainly caused by the narrow depletion layer, resulting in fewer photons deposited in sensitive region which can generate carriers. The poor energy resolution of SiC detector can be attributed to the electronic noise of read-out circuit, the pre-match amplifier circuit for detector needs to be improved, in addition, the extra defects existing in detector caused by increasing thickness of epitaxial layer can also deteriorate the detector performance.

Keywords: 4H-SiC, wide-band semiconductor, Schottky diode, γ -ray detector**PACS:** 73.40.Sx, 73.40.Cg, 29.40.Wk, 29.30.Kv**DOI:** 10.7498/aps.65.207301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11203026).

[†] Corresponding author. E-mail: duyuan yuan@ihep.ac.cn