

高纯锗探测器应用于稀有事例探测的研究进展*

杜晟杰¹⁾ 吕沙沙^{1)†} 刘圆圆¹⁾ 田阳²⁾ 李秀霞³⁾ 李玉兰²⁾

(1)北京师范大学核科学与技术学院, 射线束技术教育部重点实验室, 100875, 北京;

2)清华大学工程物理系, 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 100084, 北京;

3)同方威视技术股份有限公司, 100084, 北京)

摘要 高纯锗探测器(HPGe)对于低本底稀有事例探测的发展具有重要的意义. 本文介绍了 HPGe 的工作原理及其制备工艺, 分析了对探测器起关键作用的钝化层和死层部分, 并讨论了降低本底的关键技术. 对于 HPGe 应用于包括暗物质探测和无中微子双贝塔衰变的稀有事例探测实验的进展, 重点介绍了应用 HPGe 的 CDEX、SuperCDMS、GERDA、MAJORANA 等国际领先的稀有事例探测合作组相关实验技术和物理进展, 进一步分析了 HPGe 用于下一阶段国际稀有事例探测的发展方向.

关键词 高纯锗探测器; 稀有事例; 暗物质; 无中微子双贝塔衰变; 本底

中图分类号 TL814

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022118

0 引言

20 世纪 30 年代, 天文学家 Zwicky^[1] 首次提出暗物质的概念. 1970 年前后, 随着射电望远镜等新技术用于天文观测, 精度更高的星系旋转曲线与理论上的偏移值直接证明了暗物质的存在. 不同尺度的天文观测都发现了暗物质存在的更多证据, 如引力透镜、宇宙大尺度结构、大爆炸核合成、宇宙微波背景辐射等. 基于以上不同尺度的天文观测证据可以总结出暗物质的一些性质, 如: 不具有强相互作用和电磁相互作用, 长寿命; 有引力相互作用, 以非重子暗物质为主; 可能具有弱相互作用等. 符合暗物质性质的理论模型有很多, 最受关注的是弱相互作用大质量粒子 (weakly interacting massive particle, WIMP)^[2]. WIMPs 与物质发生相互作用的反应截面通常 $<10^{-42} \text{ cm}^2$. 暗物质在宇宙构成和宇宙演化中扮演重要角色, 同时暗物质是什么还涉及基本粒子等研究课题, 因此探测暗物质在物理学发展中显得十分重要.

同样在 20 世纪 30 年代, 泡利提出了 β 衰变过程中会有—种电中性、与光子有所不同的粒子, 解释了 β 衰变能谱为什么连续, 他将这种粒子命名为中微子. 在同一时期, 意大利物理学家 Majorana 提出了中微子可能是自身的反粒子, 即 Majorana 粒子. 而自然

界中存在的双 β 衰变可能有双中微子双贝塔衰变 ($2\nu\beta\beta$) 和无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$) 2 种形式. 如果实验探测到了 $0\nu\beta\beta$ 这一过程, 将意味着中微子是 Majorana 粒子, 即中微子为自身的反粒子. GERmanium Detector Array (GERDA) 实验二期对 ^{76}Ge 的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期给出了目前最严格的限制, $>1.8 \times 10^{26} \text{ a}$ ^[3]. 如果用理想探测器对能发生 $0\nu\beta\beta$ 的 10 kg 的目标同位素进行探测, 预计 10 年才能探测到一个事件. $0\nu\beta\beta$ 的衰变概率和 3 代中微子的质量顺序有关, $0\nu\beta\beta$ 的实验观测不仅可以给出中微子质量顺序, 而且还是目前证明中微子是否是其自身反粒子的唯一可行方案, 对于理解中微子质量起源问题有十分重大的意义.

由于暗物质候选粒子 WIMPs 与探测器靶核发生作用截面非常小, $0\nu\beta\beta$ 事例的半衰期非常长, 因此将这些探测统称为稀有事例探测. 对稀有事例探测需要极低本底的实验环境, 对暗物质探测还需要探测器阈值低. HPGe 只需要很少的能量就能产生 1 对电子空穴对 (2.9 eV), 能达到更好的能量分辨率. 高纯锗晶体纯度非常高, 自身本底也非常低. p 型点接触高纯锗探测器 (p-type point contact high purity germanium detector, pPC HPGe) 可以实现非常低的阈值^[4], 有一定的信号波形甄别能力, 在稀有事例探测方面具有重要的应用.

* 国家自然科学基金青年基金资助项目 (12005017)

† 通信作者: 吕沙沙 (1991—), 博士, 副教授. 研究方向: 射线束辐照损伤及表面改性. E-mail: lvss@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-10

1 HPGe

1.1 HPGe 的工作原理 HPGe 的原理与反向偏置的 PN 结类似, 耗尽区宽度 W 与反向偏压 V_0 关系式为

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_0}{eN_i}}, \quad (1)$$

式中: ϵ_s 为高纯锗材料介电常数, e 是电子的电荷量, N_i 是高纯锗晶体杂质浓度^[5]. 反向偏压增加, 耗尽层变宽.

结电容与耗尽区宽度的关系式为

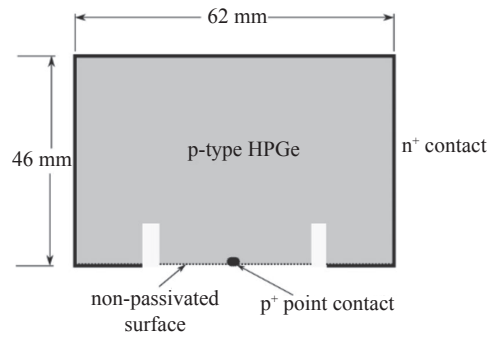
$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W}, \quad (2)$$

式中 C_j 为结电容.

当增加 V_0 , W 不再增加时, 即 C_j 不再减小, 可以认为到达全耗尽状态. HPGe 达到耗尽电压时, 可以认为耗尽区和空间电荷区等效, HPGe 的灵敏体积就是耗尽区所占的体积. 如果有辐射源, 则其产生的辐射将会在 HPGe 灵敏体积内产生电子空穴对; 同时也会产生声子, 但是用于测量 γ 能谱的 HPGe 通常只收集电子空穴对; 在外加反向偏置电压的情况下, 空穴在 p^+ 一侧被收集, 电子在 n^+ 一侧被收集. 同理, 稀有事例与锗核作用也会产生电子空穴对和声子, 通过对这些信号的收集, 达到直接探测的目的. 为降低探测器的漏电流从而利于信号收集及提高能量分辨率, 探测器 PN 结的 2 个面多数采用非注入接触电极.

根据电极结构特点, HPGe 的类型有平面型、同轴型、点电极等. 图 1 为典型的 pPC HPGe 结构示意图, 电容大约只有 1 pF^[6]. 制备探测器的技术路线是: 用载流子(atoms)浓度大约为 10^{10} cm^{-3} 的 p 型高纯锗晶体为基底, 在外侧采用锂扩散工艺形成 n^+ 电极层, 中心点接触 p^+ 电极通过离子注入硼的掺杂技术实现.

用于稀有事例探测的 HPGe 需要极小的漏电流. HPGe 自身晶体纯度十分高^[7](电活性杂质浓度 $< 10 \text{ cm}^{-3}$), 这也就意味着晶体内杂质导致的漏电流非常小. 而主要导致漏电流产生的原因为高纯锗晶体表面的悬挂键^[5]. 这些悬挂键的存在使得 HPGe 应用于稀有事例探测时, 需要进行表面钝化的处理. 锗的氧化物 (GeO_x) 并不像硅的氧化物那样稳定, 如 GeO 有挥发性, GeO_2 能溶于水, 导电性、界面态和稳定性较差^[8]. 这些锗的氧化物造成了晶格的不完整, 形成大量的悬挂键和缺陷的产生. 当悬挂键和缺陷的电荷能量位于锗禁带中央附近时会形成界面态. 载流子在通过界面态时会复合或产生, 造成载流子的迁移率降低, 导致高纯锗晶体作为探测器的漏电流增



n^+ 一侧采用扩散的方式注入锂做施主杂质, p^+ 一侧采用离子注入的方式注入硼受主杂质, 该探测器采用硅氧化物做表面钝化, 粗实线部分为钝化区域, 虚线表示未钝化区域^[10].

图 1 pPC HPGe 结构示意图

大, 最终导致噪声变大. 目前常见的钝化材料有 SiO_2 、非晶锗(a-Ge)、非晶硅(a-Si)^[8-9]等. 经过这些材料的钝化能有效降低界面态密度, 减少漏电流. 但是钝化后探测器的稳定性还需进一步研究, 如从液氮温度使用到室温保存温度循环后漏电流变化、室温下溅射的非晶锗的结构变化而导致的性能变化等^[8-10].

n^+ 一侧是由锂扩散做成的接触, 这个结构和钝化层将会组成类似于屏蔽层的效果, 即入射该区域内的辐射会被吸收, 从而导致信号的丢失或者能量的不完全收集. 这层不活跃层统称为死层(dead layer). 研究死层的厚度对 HPGe 的灵敏体积和产生的信号逐事件分析具有重要意义. 随着 HPGe 使用时间的增长, 以及室温下锂原子会在锗晶体内扩散, 导致死层变化^[11]. 但是死层并不是已知的参数, 制造商提供的数据也不一定准确^[12-13], 有时需要使用者自己进行死层厚度的测量和校正.

分析探测器收集信号产生的波形, 能够判断事例在探测器内发生的位置. 根据发生位置, 事例可以分为表面事例和体事例, 图 2 为表面事例和体事例(能量在 10 keV 左右)的典型信号波形^[14]. 表面事例是指发生在死层内的事例, 发生在该区域的事例由于电场强度弱导致漂移速度慢. 该区域内的波形信号上升时间慢, 部分载流子被复合, 电荷不能被完全收集, 会有能量损失, 还有可能在表面产生沟道效应导致电荷收集更慢^[10]. 目前对表面沟道效应导致的波形与常规波形区别的相关研究还比较少. 体事例发生在灵敏体积区内, 电场强度大, 该区域内的波形信号上升时间快, 电荷可以被完全收集, 能量没有损失.

1.2 高纯锗晶体和 HPGe 的制备 由于锗晶体内的杂质元素会对 HPGe 的晶体的电阻率和漏电流产生较大影响, 从而导致灵敏体积的减少及能量分辨率的劣化, 作为 HPGe 的锗单晶的纯度应为 12~13 N. 通常

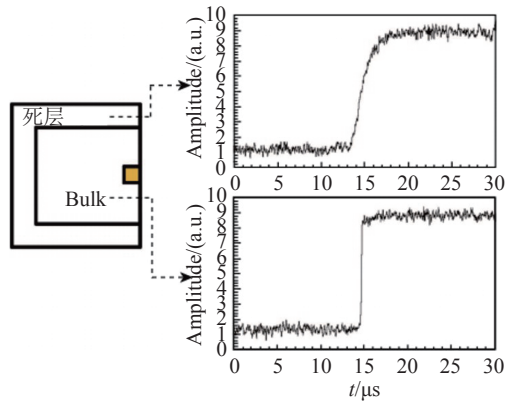


图2 在10 keV左右时表面事例(在死层中)和体事例(在灵敏体积中)产生的不同上升时间的波形信号^[14]

的化学法只能得到5~6 N的纯度,在此纯度的基础上,高纯锗晶体的制备过程包括2步:第1步是采用特殊的区熔提纯方法得到探测器级锗多晶材料,多晶制备直接决定了高纯锗晶体中的杂质含量,在多晶制备中通过不同杂质在锗中的分凝系数可以确定使用的器材和石英舟等材料;第2步是采用特殊的方法拉制单晶,得到大体积的高纯锗单晶材料^[7].用于HPGe的锗单晶电活性杂质含量需要 $<2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,也就意味着多晶锗中的杂质质量级应为 10^{10} cm^{-3} ^[7].区熔提纯方法的好坏直接决定了HPGe单晶的电阻率和漏电流大小,而拉制单晶的工艺决定了HPGe在符合电学特性的情况下能做多大。

如果想要得到大尺寸无位错的高纯锗晶体,就要面对晶体内的杂质因工艺而导致含量增多、电荷输运速度降低的问题,所以并不适合做大尺寸的HPGe.目前能做探测器级别的高纯锗晶体直径大约为10 cm. Wang等^[15]通过将锗锭放入石英坩埚中,然后将石英坩埚放置在高纯石墨基座上,通过石墨基座传递射频能量熔化锗锭,再运用缩颈法减少位错密度.运用这种方法得到的高纯锗晶体,质量为6.2 kg,直径为13 cm.经过测试电活性杂质含量为 $(2\sim 8) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,霍尔迁移率为 $30\ 000\sim 45\ 000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,可用在稀有事例探测如反向同轴HPGe的制备.相比传统的同轴型HPGe,反向同轴型HPGe可以做得质量更大,也就意味着灵敏体积更大.应用于稀有事例探测的反向同轴HPGe,还具有能相对减少周围结构材料的优势,能进一步降低本底。

拉制成的高纯锗单晶,经过机械切割成形为所需的探测器电极结构形状,为了去掉机械成形过程中在锗晶体表层形成的损伤,依次经过粗研磨、精细研磨.研磨过程结束后,需要 HNO_3 和 HF 混合溶液(质量分数比为4:1)进行化学抛光^[15].经过一系列的表

面处理工作后,再进行表面钝化.虽然表面已经用非晶锗或非晶硅等材料钝化,但是探测器表面并不是电中性的,为了消除这种表面效应,在平面探测器的圆形接触边缘引入了保护环,减少表面效应^[9].有一部分HPGe需要对发生的辐射进行位置分辨,这时就需要不同的沟槽分割接触位置进行位置分辨.通常,沟槽是用等离子体刻蚀,深度在毫米量级^[16],最终蒸发金属做电极.探测器封装在低温真空系统中,进行基本电学特性测试,其中真空环境能够避免高纯锗晶体表面被污染物附着。

图3所示HPGe由美国劳伦斯国家实验室制备,用于对太阳耀斑进行偏振探测和伽马射线成像.探测器正极表面和非接触面用非晶锗钝化,负极表面用非晶硅钝化,然后在每2个接触面上蒸发铝做电极形成条形结构,周围有一圈保护环.保护环宽度大约为3 mm,作用为吸收探测器两侧的漏电流,并且减少探测器的表面沟道效应。

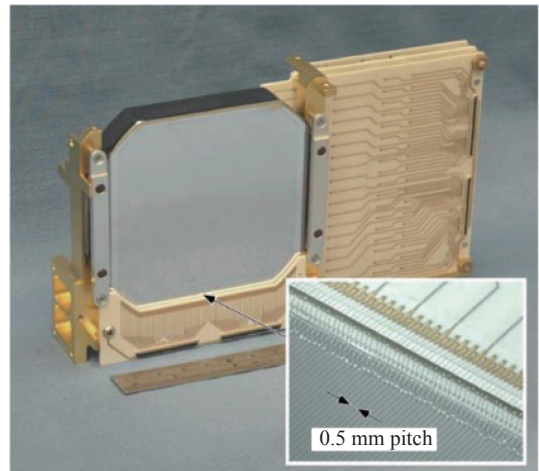
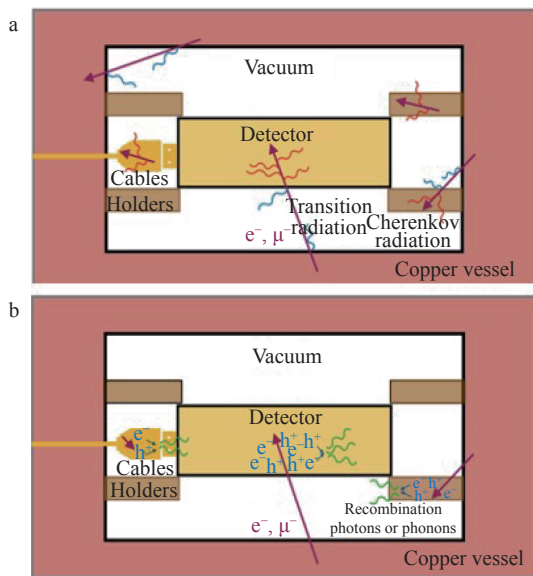


图3 美国劳伦斯国家实验室制备的探测器,对太阳耀斑进行偏振探测和辐射伽马成像,条带的中心距离条带0.5 mm^[9, 17]

1.3 降低HPGe本底的设计 对于半导体探测器而言,最终的收集时间由载流子的漂移距离和漂移速度决定.在液氮温度(77 K)下,饱和速度约为 $10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[15, 18].HPGe平均电离能受温度影响小,与入射能量无关,只要保持载流子的充分收集和前放反馈电容稳定,就可以实现很高的能量线性和稳定性^[9]。

HPGe减少本底的干扰主要从对其波形的分析和对屏蔽层、电子学材料选择2方面考虑.图4为辐射本底可能对探测器造成的影响,由于这些无法去除的本底存在,稀有事例探测需要对每个事件逐个分析产生原因,可以通过分析表面事例/体事例^[14]、单点事件/多点事件^[18]、中子/伽马事例^[20]产生的不同波形,减少本底

干扰. 图 5 所示为 GERmanium Detector Array (GERDA) 实验组发展的 18 段分隔灵敏体积的同轴高纯锗原型探测器设计. 光子产生的本底事件会在探测器的多个位置有能量沉积(多点事例), 而 $2\nu\beta\beta$ 只在一个位置发生能量沉积(单点事例), 可以通过同时多电极读出的波形特征来区分它们, 可以经过这种分割式探测器灵敏单元减少一部分本底干扰.



a. 切伦科夫辐射和跃迁辐射与探测周围材料产生本底;
b. 光子声子复合^[21].

图 4 辐射本底可能对探测器造成的影响

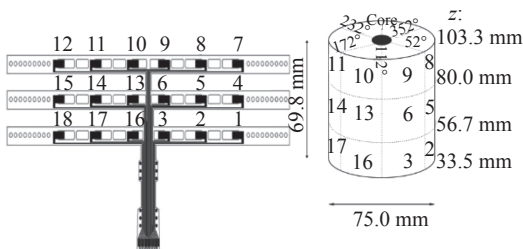


图 5 GERDA 实验组发展的同轴 18 段分隔灵敏体积真同轴高纯锗原型探测器设计, 直径为 75 mm, 水平方向采取 6 端分隔, z 轴方向采取 3 端分隔^[21]

对于屏蔽层的选择, 以 China Dark Matter Experiment (CEDX) 为例, 1 m 厚的聚乙烯能够慢化和吸收中子; 20 cm 铅屏蔽层能将大部分岩石衰变放出的 γ 射线屏蔽; 铅屏蔽层内有一层 20 cm 厚的含硼聚乙烯, 屏蔽热中子本底产生的影响. 含硼聚乙烯层内有 20 cm 厚的高纯无氧铜 (oxygen free high conductivity, OFHC) 包围探测器晶体, 并且能进一步减小来自外部铅和含硼聚乙烯屏蔽层的伽马射线; 在高纯无氧铜外侧用亚克力箱子密封, 内部用氮气冲刷, 降低空气中氦对探测器的影响; 在高纯无氧铜内侧还有碘化钠反符合探测

器; 在反符合探测器内部是 1 kg 左右的 p 型点电极高纯锗探测器^[23]. 屏蔽材料的选择应符合能屏蔽的同时, 也要保持自身产生的本底足够低.

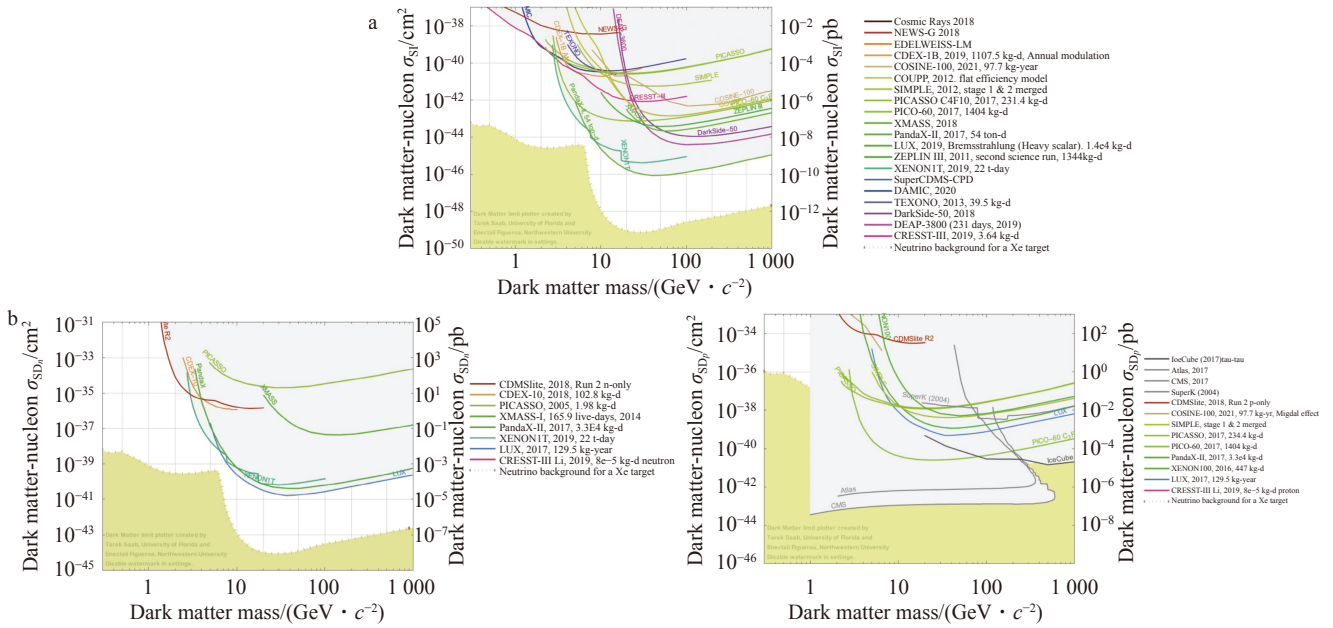
目前国内外用 HPGe 探测稀有事例的实验组选择组成更大的 HPGe 阵列. 这对探测器的供冷系统是个很大的挑战. 因为放置在屏蔽层内部的供冷系统同时会带来一部分本底. 各个实验如 CDEX、GERmanium Detector Array (GERDA)、Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double-Beta Decay (LEGEND) 等选择将 HPGe 阵列直接裸泡在低温恒温系统中(液氮或液氦环境)^[3, 24-25], 虽然这种屏蔽设计能大幅度降低本底且直接对探测器制冷, 但是对低温电子学器件和低温读出电子学系统是个很大的考验.

稀有事例发生的概率极低, 所以需要尽可能多的 HPGe (靶质量), 当每一个 HPGe 与其他探测器相互连接时, 对连接的结构材料也要有高的要求, 即极低本底. 如 GERDA 二期实验选择用单晶硅作为支撑板, 周围用铜棒作为连接支撑板的连接部分, 减少结构材料造成的本底^[26].

2 国际稀有事例探测实验最新进展

根据对稀有事例探测的特点, 国内外稀有事例探测的总体趋势朝着高灵敏度和低阈值 2 个方向发展. 低阈值方向主要利用的是 HPGe 或低温量热器, 目前世界上用 HPGe 作为暗物质直接探测的实验组主要有国内清华大学主导的 CDEX 实验^[4] 和美国主导的 Super Cryogenic Dark Matter Search (SuperCDMS) 实验^[27]. 其中 SuperCDMS 采用的是极低温 HPGe 同时测量声子和电离信号, 工作温度范围为 20~60 mK. 采用 HPGe 做暗物质直接探测的优点主要是低阈值, 对低质量暗物质十分敏感 ($10 \text{ GeV} \cdot c^{-2}$). 图 6 为暗物质探测截至 2021 年 12 月 21 日的结果数据汇总, 图 6-a 为自旋无关数据汇总, 图 6-b 为自旋相关数据, 其中自旋相关结果汇总图中的 n 和 p 分别代表暗物质与中子 (neutron) 相互作用和暗物质与质子 (proton) 相互作用截面.

同时由于 ^{76}Ge 可能会发生 $0\nu\beta\beta$, 所以富集 ^{76}Ge 的 HPGe 也可以作为 $0\nu\beta\beta$ 的探测器. 采用 HPGe 探测 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 的实验主要有欧洲领导的 GERDA 实验^[3] 和美国领导的 MAJORANA 实验^[28], GERDA 最新结果给出 $0\nu\beta\beta$ 半衰期 $>1.8 \times 10^{26} \text{ a}$ ^[3], 目前 GERDA 实验和 MAJORANA 实验已合并成 LEGEND 实验^[29]. 图 7 为 GERDA 二期实验 1.0~5.3 MeV 能量范围内事例筛选前后的能谱, 白色区域为事例筛选之前的结果, 红色区域为事例筛选之后的结果.



a. 自旋无关; b. 自旋相关^[30]

图 6 国际上 WIMP 实验结果

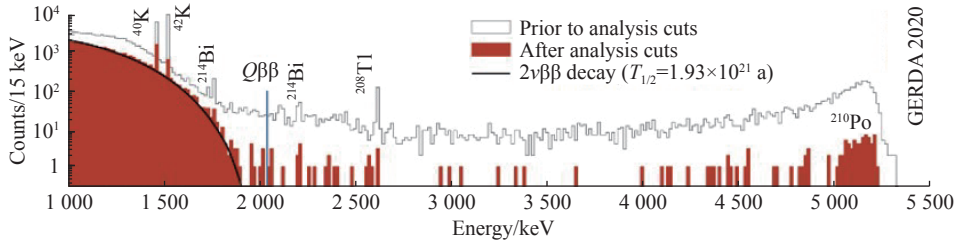
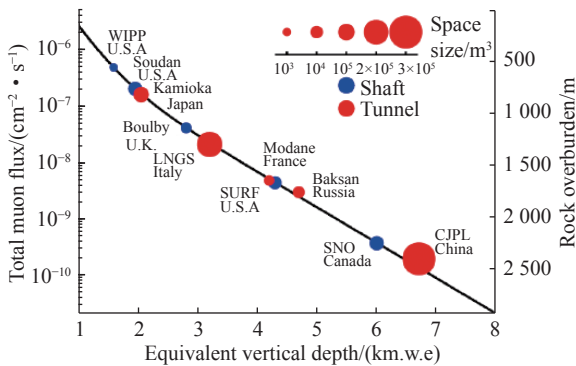


图 7 1.0~5.3 MeV 范围内分析减少本底前后的 GERDA 二期实验的能量分布结果^[31]

稀有事例探测需要极低的本底, 周围的环境本底主要来自宇宙射线、伽马射线和中子 3 类。为了减少宇宙射线造成的本底, 一般直接探测的暗物质实验和 $0\nu\beta\beta$ 实验都会在地下实验室进行。图 8 为国际上

主要地下实验室的岩石埋深、等效水深、宇宙线通量水平、可用空间、进出方式等信息。其中本文主要关注的利用 HPGe 进行稀有事例探测的地下实验有 CEDX(中国)、SuperCDMS(美国)、GERDA(欧洲)和 MAJORANA(美国)等。表 1 为所关注的实验组相关结果的汇总。



左侧纵轴为宇宙线通量, 右侧纵轴为地下实验室的岩石埋深, 下侧横轴为等效水深。黑色的实线为宇宙线模拟给出的理论值, 圆圈的大小代表了实验室的大小, 颜色代表了实验室的进出方式, 红色代表实验室修在隧道内, 可以乘车出入, 蓝色代表实验室修在矿井内, 通过电梯进出^[31]。

图 8 国际上主要地下实验室的信息

2.1 China Dark Matter Experiment (CDEX) CDEX 实验组成立于 2009 年, 利用 pPC HPGe 开展暗物质直接探测。CDEX 实验的长期目标是在中国锦屏地下实验室建设吨级规模的 HPGe 阵列, 同时开展暗物质直接探测和 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验研究。实验组在锦屏地下实验室二期 C1 厅建设了高 18 m, 直径 18 m 的大型液氮恒温器来完成这个计划^[5, 32]。CDEX-10 实验(10 代表探测器阵列的质量共约为 10 kg)装置示意如图 9 所示, 结果分析于 2018 年, 通过探测暗物质粒子与探测器靶核作用产生的电离信号完成实验。该探测器阵列由 3 串点接触 HPGe 阵列构成。

CDEX-10 的实验装置所用高纯锗晶体与 CDEX-1B 有相同的晶体质量, 每个探测器晶体质量为 939 g, 相应的曝光量为 $102.8 \text{ kg} \cdot \text{d}$ ^[4]。在 90% 置信度下, 对

表 1 关注的实验组列表

实验名称	技术	探测器质量/kg	暗物质或 $0\nu\beta\beta$ 探测结果(90%置信区间)	特点
CDEX-10 ^[4]	电离	10.0	自旋无关截面 $8\times 10^{-42}\text{ cm}^2$ 自旋相关截面 $3\times 10^{-36}\text{ cm}^2$ ($5\text{ GeV}\cdot\text{c}^{-2}$)	最好的天然屏蔽条件
SuperCDMS II ^[33]	电离+声子	11.4	自旋无关截面 1.4×10^{-44} ($46\text{ GeV}\cdot\text{c}^{-2}$)	极低温同时探测 电离和声子信号
GERDA ^[3]	电离	44.5	$1.8\times 10^{26}\text{ a}$	液氩既作为反复合装置又作为供冷系统
MAJORANA ^[29]	电离	29.7	$1.6\times 10^{25}\text{ a}$	地下电铸铜

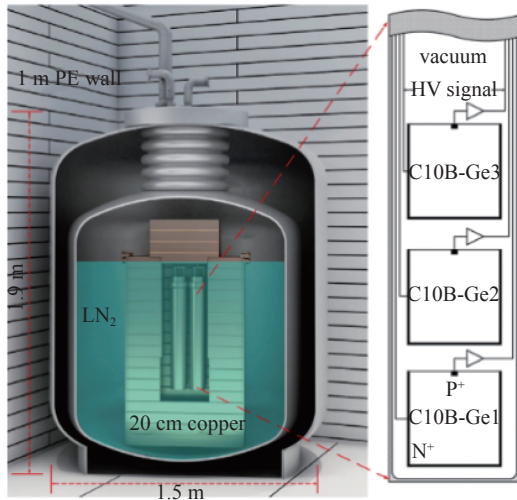


图 9 CDEX-10 实验的装置结构示意图
高纯无氧铜厚度为 20 cm, 液氮恒温器直径 1.5 m, 高 1.9 m, 每串探测器阵列的晶体直径大约 62 mm, 高 62 mm, 聚乙烯(PE)墙厚 1 m, 3 串质量约为 10 kg 的点接触 pPC HPGe 放置高纯无氧铜中, 高纯无氧铜真空腔直接裸泡在液氮恒温器中, 最后整个装置放置在聚乙烯屏蔽室内^[3].

图 9 CDEX-10 实验的装置结构示意图

于质量为 $5\text{ GeV}\cdot\text{c}^{-2}$ 的暗物质粒子, 自旋无关截面上限为 $8\times 10^{-42}\text{ cm}^2$, 自旋相关截面上限为 $3\times 10^{-36}\text{ cm}^2$ ^[4]. 下一步的计划将会进一步增大高纯锗探测器阵列规模, 并安装在锦屏实验室二期 C1 厅的大型液氮恒温器 ($1\ 700\text{ m}^3$) 内部, 届时会有 6 m 厚的液氮做屏蔽层.

2.2 Super Cryogenic Dark Matter Search (SuperCDMS) SuperCDMS 实验位于美国 Soudan 地下实验室(明尼苏达州). 在 SuperCDMS 实验中, 包括 1 个用于维持探测器低温的系统. SuperCDMS 设计的探测器可以同时探测晶体中晶格的振动(声子信号)和电离(电信号)^[33], 这类探测器用高纯锗晶体做衬底, 被称作对原子序数敏感的电离和声子交替探测器(interleaved Z-sensitive ionization- and phonon-mediated detector, iZIP). 如果暗物质粒子与探测器靶核发生作用, 则可以产生电离信号和声子信号, 通过对 2 种信号的测量可以直接探测暗物质粒子的存在.

SuperCDMS II 实验的 iZIP 探测器工作温度约为 50 mK, 共有 19 个 iZIP 探测器. 图 10 为 SuperCDMS

探测器的结构模型, SuperCDMS II 实验的结果分析于 2018 年, 曝光量为 $1\ 690\text{ kg}\cdot\text{d}$. 在 90% 置信度的情况下, 这些结果确定了质量在 $46\text{ GeV}\cdot\text{c}^{-2}$ 时, WIMP 粒子和核子的自旋无关作用截面上限为 $1.4\times 10^{-44}\text{ cm}^2$ ^[33].

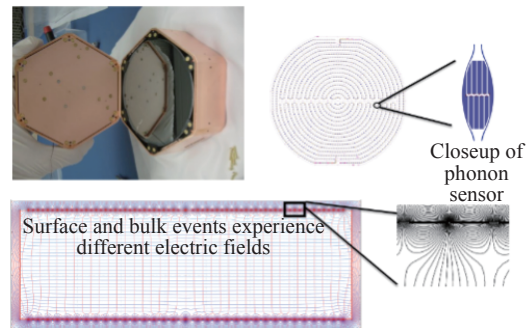


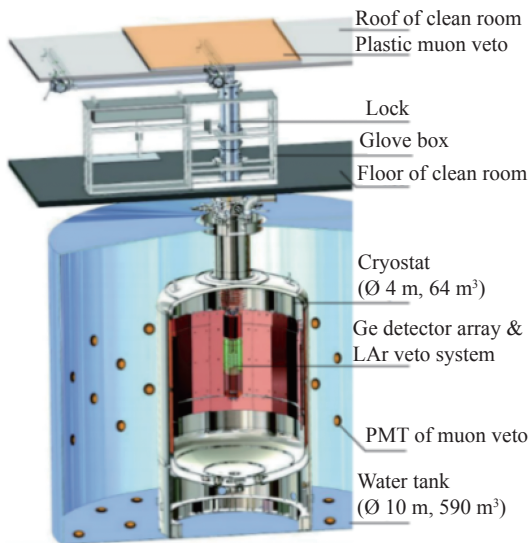
图 10 iZIP 探测器结构示意图
2 个电离信号读出通道和 4 个声子信号读出通道^[27, 33-34].

图 10 iZIP 探测器结构示意图

2.3 GERmanium Detector Array (GERDA) GERDA 位于意大利格兰萨索地下实验室(Laboratori Nazionali del Gran Sasso, LNGS)(图 11). 用富含 ^{76}Ge 的 HPGe 开展 $0\nu\beta\beta$ 实验研究.

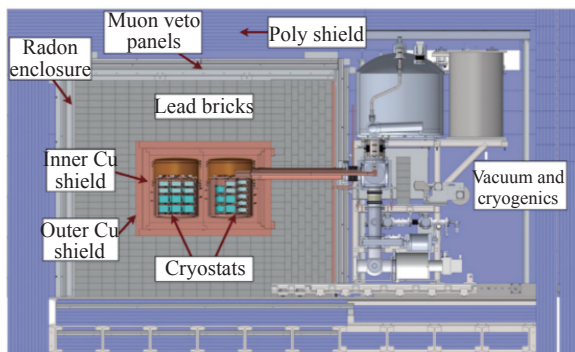
HPGe 阵列高度为 40 cm、直径为 30 cm, 其中 3 串包含 8 个 BEGe 探测器, 3 串包含 3 个 semi-coaxial 探测器, 1 串由 6 个 BEGe 探测器和 1 个 semi-coaxial 探测器混合构成. GERDA 二期实验将整个探测器阵列直接裸泡在液氩中, 工作温度为 90 K^[3]. 后又将其其中 5 个 semi-coaxial 探测器替换为反向同轴(inversed coaxial) HPGe. 并计划降低本底至 $10^{-3}\text{ keV}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[3, 34]. 液氩既能作为反符合装置屏蔽本底, 也能为探测器阵列直接供冷^[3, 35]. GERDA 二期实验的最终数据于 2020 年发表, 全部的曝光量为 $103.7\text{ kg}\cdot\text{a}$, 考虑到 $0\nu\beta\beta$ 释放的能量应为 2 039 keV, 着重分析 1 930~2 190 keV. 最终得出在 90% 置信度的情况下, $0\nu\beta\beta$ 的半衰期 $>1.8\times 10^{26}\text{ a}$ ^[3].

2.4 MAJORANA MAJORANA 实验室位于美国的南达科塔州的桑福德地下实验室(Sanford Underground Research Facility). MAJORANA 实验运用富含 ^{76}Ge 的 HPGe 开展 $0\nu\beta\beta$ 探测. MAJORANA 实验装置示意图如图 12 所示, 共计 29.7 kg 的 HPGe 阵列放置在 2 个低



红色部分为二期新增装置, 液氩反符合系统外体积为 590 m³ 的水箱包围, 厚度为 2~3 m。水屏蔽层连接 66 个光电倍增管可以作为切伦科夫反符合系统排除缪子的干扰^[26]

图 11 GERDA 二期实验装置示意



从内到外分别是 2 个 HPGe 阵列, 1 196 kg 的地下电铸铜, 5 cm 厚的高纯无氧铜, 45 cm 厚的铅屏蔽层, 氦气排除层, 缪子反符合装置, 5 cm 厚的含硼聚乙烯和 25 cm 厚的聚乙烯^[37]

图 12 MAJORANA 实验装置示意

温恒温器中。采用 p 型点接触 HPGe 为探测器阵列主体。每个探测器质量约为 850 g^[24], 其中 ⁷⁶Ge 同位素富集度达到 88%。

MAJORANA 与其他实验组最大区别在于对铜屏蔽层的使用, MAJORANA 内屏蔽铜层是在地下电铸的, 而地下的环境能够屏蔽宇宙射线对屏蔽铜层产生的影响, 因此宇生放射性本底进一步降低。MAJORANA 关注的能量区间为 1 950~2 350 keV, 最终结果为在 90% 置信度的情况下 $0\nu\beta\beta$ 的半衰期 $>2.7 \times 10^{25}$ a^[29]。GERDA 和 MAJORANA 实验组已经合并成为 LEGEND 实验组, 计划用 200 kg 的 14 串阵列探测器继续探测 $0\nu\beta\beta$, 会继续保留液氩反符合系统, 并使用 MAJORANA 的电铸铜, 已于 2022 年开展 LEGEND-200 实验。

总体来说, HPGe 用于稀有事例探测的相关的技术涉及材料学、电子学、物理学等多个学科, 相关技术和工艺如液氮裸泡下钝化 HPGe 和低本底材料的制备等技术尚不成熟, 相关的低温电子学信号的读出也不完善。国际上对于稀有事例探测领域领先的课题组, 针对本底和阈值都有自己鲜明的不同的处理方法。随着实验灵敏度的进一步提升, 除了增加 HPGe 的数量和质量并构成探测器阵列外, 对构成探测器阵列的结构材料和低温下电学材料等也有较高要求。国际上相关技术和工艺方面制约着 HPGe 在稀有事例探测中的发展; 我国在相关技术和工艺方面进行攻关, 对于提高我国在国际上稀有事例探测的水平具有重要意义。

3 结论

HPGe 的发展对于稀有事例探测实验技术具有重要的引领作用。国内外对稀有事例进行探测的实验朝着高灵敏度和低阈值 2 个方向进行。HPGe 具有纯度极高、能量分辨率高、探测阈值极低的特性, 被广泛用于稀有事例的探测中。稀有事例探测的事例率极低, 需要更大更多的 HPGe 构成 HPGe 阵列。在暗物质探测器中, 选择更多阈值更低的 HPGe 类型(如宽能型 HPGe)构成阵列; 而在 $0\nu\beta\beta$ 中由于关注的能量为 2 039 keV, 选择单个探测器质量更大的反向同轴型 HPGe 效果更好。HPGe 需要工作在低温环境, 改变低温恒温系统, 减少低温恒温系统带来的本底也值得关注。本文介绍了 HPGe 中关键技术, 包括电活性杂质浓度更低的锗晶体制备, HPGe 钝化和死层, 低温电子学基材制备, 低本底实验室的构建等。对于减少 HPGe 本底的干扰, 主要从对其波形的分析和对屏蔽层及电子学材料选择 2 方面进行了说明。最后, 对利用 HPGe 进行暗物质探测的 CEDX 和 SuperCDMS 合作组, $0\nu\beta\beta$ 探测的 GERDA 和 MAJORANA 合作组的探测器设计和特点、相关物理结果进行了详细介绍。通过深入开展 HPGe 相关技术的研究, 如 HPGe 的表面钝化和低温电子学信号读取技术等, 可反过来指导涉及低本底 HPGe 实验方案, 极大地推动稀有事例探测的发展。

致谢 对于粒子技术与辐射成像教育部重点实验室开放基金资助项目表示感谢。

4 参考文献

- [1] ZWICKY F. Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln[J]. Helvetica Physica Acta, 1933, 6: 110
- [2] ROSZKOWSKI L, SESSOLO E M, TROJANOWSKI S.

- WIMP dark matter candidates and searches-current status and future prospects[J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society (Great Britain)*, 2018, 81(6): 066201
- [3] AGOSTINI M, ARAUJO G R, BAKALYAROV A M, et al. Final results of GERDA on the search for neutrinoless double- β decay[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(25): 252502
- [4] JIANG H, JIA L P, YUE Q, et al. Limits on light weakly interacting massive particles from the first 102.8 kg \times day data of the CDEX-10 experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(24): 241301
- [5] SZE S M. *Semiconductor devices: physics and technology*[M]. John Wiley & sons, 2008
- [6] EBERTH J, SIMPSON J. From Ge(Li) detectors to gamma-ray tracking arrays-50 years of gamma spectroscopy with germanium detectors[J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2008, 60(2): 283
- [7] 白尔隽. 高纯锗多晶材料的制备[J]. *核技术*, 1998, 21(9): 558
- [8] LOOKER Q, AMMAN M, VETTER K. Leakage Current in high-purity germanium detectors with amorphous semiconductor contacts[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 777: 138
- [9] AMMAN M. Optimization of amorphous germanium electrical contacts and surface coatings on high purity germanium radiation detectors[EB/OL]. (2018-09-12)[2022-05-15]. <https://www.doc88.com/p-4317809453890.html?r=1>
- [10] COOPER R J, RADFORD D C, HULL E, et al. Effect of a surface channel on the performance of a P-type Point Contact HPGe detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 680: 48
- [11] HUY N Q, BINH D Q, AN V X. Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, 573(3): 384
- [12] ELANIQUE A, MARZOCCHI O, LEONE D, et al. Dead layer thickness characterization of an HPGe detector by measurements and Monte Carlo simulations[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, 70(3): 538
- [13] AZLI T, CHAOUI Z E A. Performance reevaluation of a N-type coaxial HPGe detector with front edges crystal using MCNPX[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2015, 97: 106
- [14] JIANG H, YUE Q, LI Y L, et al. Measurement of the dead layer thickness in a p-type point contact germanium detector[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40(9): 096001
- [15] WANG G J, AMMAN M, MEI H, et al. Crystal growth and detector performance of large size High-purity Ge crystals[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, 39: 54
- [16] PROTIC D, KRINGS T. Microstructures on Ge detectors with amorphous Ge contacts[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, 50(4): 998
- [17] VETTER K. Recent developments in the fabrication and operation of germanium detectors[J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2007, 57: 363
- [18] COOPER R J, RADFORD D C, LAGERGREN K, et al. A Pulse Shape Analysis technique for the MAJORANA experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 629(1): 303
- [19] 陈伯显, 张智. *核辐射物理及探测学*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011: 275-277
- [20] ZAITSEVA N, RUPERT B L, PAWELCZAK I, et al. Plastic scintillators with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 668: 88
- [21] DU P Z, EGANA-UGRINOVIC D, ESSIG R, et al. Sources of low-energy events in low-threshold dark-matter and neutrino detectors[J]. *Physical Review X*, 2022, 12: 011009
- [22] ABT I, CALDWELL A, GUTKNECHT D, et al. Characterization of the first true coaxial 18-fold segmented n-type prototype HPGe detector for the gerda project[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, 577(3): 574
- [23] LIU Z Z, YUE Q, YANG L T, et al. Constraints on spin-independent nucleus scattering with sub-GeV weakly interacting massive particle dark matter from the CDEX-1B experiment at the China Jinping underground laboratory[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(16): 161301
- [24] ALVIS S I, ARNQUIST I J, AVIGNONE III F T, et al. Search for neutrinoless double- β decay in ^{76}Ge with 26 kg \cdot a of exposure from the Majorana Demonstrator[J]. *Physical Review C*, 2019, 100(2): 025501
- [25] SALAMIDA F. Search for neutrinoless double-beta decays in Ge-76 in the LEGEND experiment[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1643(1): 012026
- [26] AGOSTINI M, BAKALYAROV A M, BALATA M, et al. Upgrade for Phase II of the GERDA experiment[J]. *The European Physical Journal C*, 2018, 78: 388
- [27] AGNESE R, ANDERSON A J, ARALIS T, et al. Low-

- mass dark matter search with CDMSlite[J]. *Physical Review D*, 2018, 97(2)
- [28] AGUAYO E, AMMAN M, AVIGNONE III F T, et al. Characteristics of signals originating near the lithium-diffused N^+ contact of high purity germanium p-type point contact detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 701: 176
- [29] AALSETH C E, ABGRALL N, AGUAYO E, et al. Search for neutrinoless double- β decay in ^{76}Ge with the Majorana Demonstrator[J]. *Physical review letters*, 2018, 120(13): 132502
- [30] Slac national accelerator laboratory. Dark matter limit plotter[EB/OL]. (2021-12-21)[2022-04-18]. <http://supercdms.slac.stanford.edu/dark-matter-limit-plotter>
- [31] 杨丽桃. 基于CDEX-1B点电极高纯锗探测器的暗物质直接探测[D]. 北京: 清华大学, 2017: 25
- [32] 岳骞. 高纯锗探测器在粒子物理与天体物理中的应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(12): 1434
- [33] AGNESE R, ARAMAKI T, ARNQUIST I J, et al. Results from the super cryogenic dark matter search experiment at Soudan[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(6): 061802
- [34] AL KENANY S, ROLLA J A, GODFREY G, et al. SuperCDMS cold hardware design[J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2012, 167(5/6): 1167
- [35] AGOSTINI M, ARAUJO G, BAKALYAROV A M, et al. Characterization of inverted coaxial ^{76}Ge detectors in GERDA for future double- β decay experiments[J]. *The European Physical Journal C*, 2021, 81(6): 1
- [36] BOULAY M G, HIME A. Technique for direct detection of weakly interacting massive particles using scintillation time discrimination in liquid argon[J]. *Astroparticle Physics*, 2006, 25(3): 179
- [37] ABGRALL N, ARNQUIST I J, AVIGNONE III F T, et al. The processing of enriched germanium for the Majorana Demonstrator and R&D for a next generation double-beta decay experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 877: 314

High purity germanium detector in rare event detection

DU Shengjie¹⁾ LÜ Shasha¹⁾ LIU Yuanyuan¹⁾ TIAN Yang²⁾ LI Xiuxia³⁾ LI Yulan²⁾

(1)Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2)Department of Engineering Physics, Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging of Ministry of Education, Tsinghua University, 100084, Beijing, China;

3)Joint Research Center, Nuctech Company Limited, 100084, Beijing, China)

Abstract High purity germanium detector is of great significance to development of low background rare event detectors. This paper reviews work principle and preparation process of HPGe. Both passivation and dead layers are analyzed. Key techniques in background reduction are discussed. HPGe detectors have been used in rare event detection including dark matter detection and neutrinoless double beta decay detection. Typical works include those of CDEX, SuperCDMS, GERDA, and MAJORANA. Future directions of HPGe for international rare events detections are analyzed.

Keywords high purity germanium detector; rare event; dark matter; neutrinoless double beta decay; background

【责任编辑: 刘先勤】