



多丝结构气体探测器研究

张春雷 曹李刚 黄建微 张耀锋

Studies on Multi-wire Gaseous Detectors

ZHANG Chunlei, CAO Ligang, HUANG Jianwei, ZHANG Yaofeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC06>

引用格式:

张春雷, 曹李刚, 黄建微, 张耀锋. 多丝结构气体探测器研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):480–485. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC06

ZHANG Chunlei, CAO Ligang, HUANG Jianwei, ZHANG Yaofeng. Studies on Multi-wire Gaseous Detectors[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):480–485. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC06

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Simulation on the Novel M-THGEM Detector

原子核物理评论. 2019, 36(1): 85–90 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.085>

基于 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 转换体的多层多丝正比室中子探测器模拟

Simulation of a Novel Neutron Detector Based on Multi-layer MWPC with $^{10}\text{B}_4\text{C}$ Convertor

原子核物理评论. 2019, 36(1): 71–77 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.071>

多通道高纯锗探测器高压保护系统设计

Design of Multi-channel High Voltage Protection System for High Purity Germanium Detector

原子核物理评论. 2023, 40(4): 589–598 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2023017>

CEE-TPC中GEM读出探测器传输性能实验研究

Experimental Research on Transmission Performance of GEM Readout Detector in CEE-TPC

原子核物理评论. 2020, 37(3): 765–770 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46>

基于SiPM双端读出的 γ 射线探测器研究

Study of the γ -Ray Detector of Dual-ended Readout Based on SiPM

原子核物理评论. 2020, 37(3): 757–764 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC03>

散裂中子源高压二维位置灵敏 ^3He 探测器的实验研究

Experimental Study on Two-dimensional Position Sensitive Detector Filled with Helium-3 for the China Spallation Neutron Source

原子核物理评论. 2019, 36(3): 351–356 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.351>

文章编号: 1007-4627(2024)01-0480-06

多丝结构气体探测器研究

张春雷^{1,2}, 曹李刚^{1,2}, 黄建微³, 张耀锋^{1,2,†}

(1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875;
2. 北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875;
3. 中国计量科学研究院电离辐射研究所, 北京 100013)

摘要: 多丝结构气体探测器因其具有耐辐射、响应快、灵敏区大、成本低廉、易于建造等优势而被广泛应用于核物理和核技术领域。本工作首先介绍了多丝结构气体探测器的电场计算理论方法, 并利用有限元程序 ANSYS 及探测器模拟程序 GARFIELD 进行了多丝结构气体探测器漂移区、雪崩放大区的电场优化设计。接着利用 GEANT4 程序模拟了宇宙射线入射气体探测器的过程, 获得了探测器在宇宙 μ 子入射时对单一事例响应的模拟计算结果, 包括脉冲电流、脉冲电压及脉冲波形的积分电荷, 并获得了整体的积分电荷统计结果。在此基础上完成了气体探测器的研制, 并用于宇宙射线的测试实验, 实验结果与模拟结果基本一致。本工作提出的模拟计算方法及实验技术可用于多丝结构气体探测器的优化设计及实验评估。

关键词: 多丝结构气体探测器; 电场计算; 探测器模拟; 宇宙射线测量

中图分类号: TL811; TL815 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC06

0 引言

气体探测器具有耐辐射、响应快、灵敏区大、成本低廉、易于建造等优势, 在核物理和核技术领域具有广泛的应用。例如, 各种形式的气体电离室、具有二维位置分辨的多丝正比室探测器、采用 GEM 等放大结构的气体探测器、具有三维位置分辨的时间投影气体探测器等, 这些探测器在辐射剂量测量、辐射成像、核物理实验、宇宙射线研究等科研领域发挥着重要的作用^[1-3]。多丝结构气体探测器是在电离室基础上发展起来的、利用多根细丝电极实现电离信号放大及收集功能的气体探测器, 能够依据细丝电极的位置及其他技术手段实现入射粒子电离位置的二维分辨测量, 从而获得入射粒子的径迹信息。如引入外部触发时间信息, 则可以实现入射粒子的三维径迹测量, 进而实现粒子类型鉴别等功能, 即为时间投影气体探测器, 在核物理及高能物理实验领域有着重要的应用, 如 STAR-TPC、ALEPH-TPC、S π RIT-TPC 等^[4-6]。

探测器电场计算及结构优化设计是多丝结构气体探测器研制的重要内容, 同时对探测器探测性能进行模拟也是评价探测器特性与优化探测器设计的重要组成部分。

本文基于气体探测器的电场计算理论, 拟利用气体探测器模拟程序 GARFIELD^[7]和有限元程序 ANSYS^[8]开展多丝结构气体探测器的电场计算及结构优化设计工作, 并使用蒙特卡罗程序 GEANT4 进行探测器的探测性能模拟工作。在此基础上完成探测器的研制, 并利用该探测器开展地面宇宙 μ 子测量实验, 从而获得探测器输出电流波形、电压波形及积分电荷等实验结果。

1 多丝结构气体探测器模拟优化

1.1 多丝电极电场计算理论

多丝结构气体探测器一般由漂移区和雪崩放大区组成。在漂移区内, 入射粒子发生电离作用, 产生初始电子-离子对, 电离电子在外部电场的作用下向雪崩放大区域移动并被收集。漂移区需要施加与电离电子漂移方向平行的强的均匀电场, 以确保探测器具有快的响应时间并抑制横向扩散效应; 雪崩放大区利用直径约为几十 μ m 细丝电极表面产生的强电场, 实现电离电子的雪崩放大及信号收集^[9]。雪崩放大区主体为等间距排列的多根细丝电极组成阳极丝平面。为了保证每根细丝电极周围电场的一致性, 在雪崩放大区常常添加具有类似排列结

收稿日期: 2023-06-25; 修改日期: 2023-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605009); 计量与校准技术国防科技重点实验室开放课题(JLKG2022001C003)

作者简介: 张春雷(1979-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 高级工程师, 博士, 从事核技术及核物理研究; E-mail: lei@bnu.edu.cn

† 通信作者: 张耀锋, Email: zhangyf10@bnu.edu.cn

构的接地细丝电极平面阵列以及具备触发控制功能的栅极细丝电极平面阵列。典型的多丝结构气体探测器结构如图 1 所示。

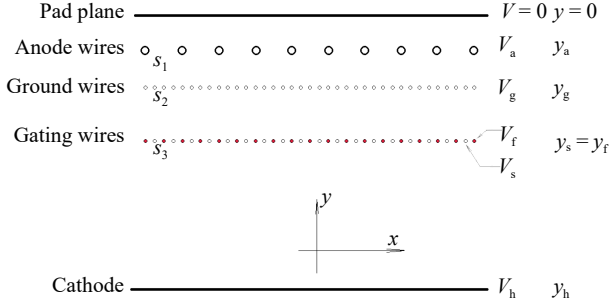


图 1 典型的多丝结构气体探测器电极布局图

细丝电极阵列在其周围区域产生的电场、电势在理想情况下(纵向 z 方向无限长)可以由每根细丝电极及相关的平面电极单元的贡献叠加得到,并可基于此推导出电场的分布。如对于单层具有无限多数目的细丝电极阵列及单一接地电极板单元组成的简单模型,则其电势及电场分布可以表述为^[10]

$$V(x, y) = -\frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sin^2 \left[\frac{\pi}{s}(x-x_0) \right] + \sinh^2 \left[\frac{\pi}{s}(y-y_0) \right]}{\sin^2 \left[\frac{\pi}{s}(x-x_0) \right] + \sinh^2 \left[\frac{\pi}{s}(y+y_0) \right]},$$

$$E_x(x, y) = \frac{\lambda}{2s\epsilon_0} \sin \left[\frac{2\pi}{s}(x-x_0) \right] \cdot \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} \right),$$

$$E_y(x, y) = \frac{\lambda}{2s\epsilon_0} \left(\frac{\sinh \left[\frac{2\pi}{s}(y-y_0) \right]}{A_1} - \frac{\sinh \left[\frac{2\pi}{s}(y+y_0) \right]}{A_2} \right), \quad (1)$$

其中:

$$A_1 = \cosh \left[\frac{2\pi}{s}(y-y_0) \right] - \cos \left[\frac{2\pi}{s}(x-x_0) \right],$$

$$A_2 = \cosh \left[\frac{2\pi}{s}(y+y_0) \right] - \cos \left[\frac{2\pi}{s}(x-x_0) \right].$$

式(1)中: ϵ_0 为真空中的介电常数; s 为细丝电极在 x 方向的间距; λ 为电极表面的电荷密度; x_0 为中心细丝电极在 x 方向上的位置; y_0 为细丝电极在 y 方向上的位置。接地电极板位于 $y=0$ 、各细丝电极位于 $x=x_0+ks$ 、 $y=y_0$ 处,这里 $k=0, \pm 1, \pm 2 \dots$, 为细丝电极的编号。由式(1)可知,细丝电极周围电场除了与电极位置有关外,还主要依赖于电极表面的电荷密度 λ 。

将上述理论应用到图 1 所示的多丝结构探测器中,并将各组细丝电极以及阴极板单元的施加电势作为边界条件,可以得到:

$$V_a = \frac{\lambda_a y_a}{\epsilon_0 s_1} \left(1 - \frac{s_1}{2\pi y_a} \ln \frac{2\pi r_a}{s_1} \right) + \frac{\lambda_g y_a}{\epsilon_0 s_2} + \frac{\lambda_s y_a}{\epsilon_0 s_3} + \frac{\lambda_f y_a}{\epsilon_0 s_3} + \frac{\sigma_h y_a}{\epsilon_0},$$

$$V_g = \frac{\lambda_a y_g}{\epsilon_0 s_1} + \frac{\lambda_g y_g}{\epsilon_0 s_2} \left(1 - \frac{s_2}{2\pi y_g} \ln \frac{2\pi r_g}{s_2} \right) + \frac{\lambda_s y_g}{\epsilon_0 s_3} + \frac{\lambda_f y_g}{\epsilon_0 s_3} + \frac{\sigma_h y_g}{\epsilon_0},$$

$$V_s = \frac{\lambda_a y_s}{\epsilon_0 s_1} + \frac{\lambda_g y_s}{\epsilon_0 s_2} + \frac{\lambda_s y_s}{\epsilon_0 s_3} \left(1 - \frac{s_3}{2\pi y_s} \ln \frac{2\pi r_s}{s_3} \right) + \frac{\lambda_f y_s}{\epsilon_0 s_3} \left(1 - \frac{s_3}{2\pi y_s} \ln 2 \right) + \frac{\sigma_h y_s}{\epsilon_0},$$

$$V_f = \frac{\lambda_a y_f}{\epsilon_0 s_1} + \frac{\lambda_g y_f}{\epsilon_0 s_2} + \frac{\lambda_s y_f}{\epsilon_0 s_3} \left(1 - \frac{s_3}{2\pi y_s} \ln 2 \right) + \frac{\lambda_f y_f}{\epsilon_0 s_3} \left(1 - \frac{s_3}{2\pi y_s} \ln \frac{2\pi r_f}{s_3} \right) + \frac{\sigma_h y_f}{\epsilon_0},$$

$$V_h = \frac{\lambda_a y_h}{\epsilon_0 s_1} + \frac{\lambda_g y_h}{\epsilon_0 s_2} + \frac{\lambda_s y_h}{\epsilon_0 s_3} + \frac{\lambda_f y_h}{\epsilon_0 s_3} + \frac{\sigma_h y_h}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

其中: λ_a 、 λ_g 、 λ_s 、 λ_f 、 σ_h 分别为各细丝电极单元及阴极板的电荷密度; r_a 、 r_g 、 r_s 、 r_f 为各组细丝电极的半径; s_1 、 V_a 、 y_a 分别为阳极细丝电极在 x 方向上的间距、电极施加电势和电极在 y 方向上的位置; s_2 、 V_g 、 y_g 分别为接地细丝电极 x 方向上的间距、电极施加电势和电极在 y 方向上的位置。阴极板处于 $y=y_h$ 处,且施加电势为 V_h ; 栅极细丝电极位于 $y=y_s$ 处,其按照编号分为奇偶两部分,分别施加电势 V_s 、 V_f ; Pad 接收板平面处于 $y=0$ 处,且施加电势 $V=0$ 。通过求解式(2)可得到各单元的电荷密度,并由式(1)求出最终的探测器电场分布。

1.2 探测器模拟优化

实际的探测器采用有限数目的细丝电极建造,因而其电场分布结果与式(2)计算结果存在一定偏差。工作中常常采用探测器模拟程序进行电场模拟计算。GARFIELD 程序是由欧洲核子研究中心(CERN)开发的一款用于气体探测器的模拟程序,该程序能够进行气体探测器的多种特性模拟,如探测器电场计算、气体介质特性模拟、电离电子漂移及雪崩过程模拟、探测器不同电极输出电流模拟计算等。GARFIELD 程序在电场计算方面主要用于探测器的二维电场计算,计算结果仅适用于探测器的纵向中心平面,无法实现模拟结果对探测器纵向范围内的全区域覆盖。我们利用有限元程序 ANSYS 进行多丝结构探测器的三维电场计算,并将电场计算结果读入 GARFIELD 程序,以实现 GARFIELD 程序对于探测器在三维尺度范围内的模拟优化。对 GARFIELD 程序进行了修改编译,实现了对于电场数据的快速简便读入;与此同时,引入了新的插值方法^[11-12],修正了原始程序针对细丝电极周围电场插值处理时出现的错误,获得了准确、连续的电场分布,以确保后续探

测器电子漂移及雪崩过程模拟的顺利进行。针对图 1 所示的探测器结构, 模拟计算得到的中心平面处漂移区与雪崩放大区电场分布如图 2 所示。

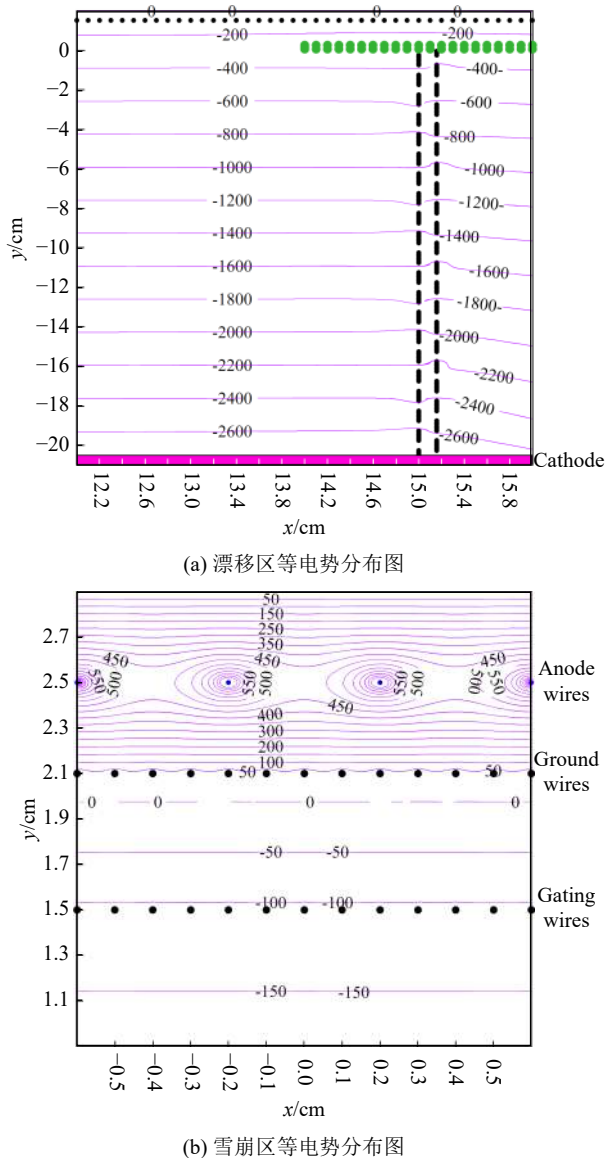


图 2 多丝结构气体探测器电场模拟结果

为了减小外部干扰并提高探测器运行效率, 多丝结构气体探测器通过加入栅极细丝以实现外部信号的触发控制。栅极细丝电极依照位置编号分为奇偶两组, 需要在奇数组与偶数组之间施加一定的偏压, 从而在邻近区域产生 x 方向的横向电场, 以阻断电离电子进入雪崩放大区域, 使得探测器处于关闭状态。通过外部触发信号控制栅极电极偏压的施加, 即可实现对于探测器开关状态的触发控制。不同的电势条件下电离电子具有不同的透过率, 因而探测器需要选择合适的栅极细丝电极电势和偏压值。理论计算表明, 电离电子的透过率为 $T = 1 - \frac{\sigma_g^+}{|\sigma_p|}$, 其中 σ_g^+ 、 σ_p 分别为栅极电极正电荷和阴

极板的电荷密度 [8]。利用 GARFIELD 程序对不同栅极电压条件下的探测器透过率进行模拟计算, 模拟结果和理论解析计算结果对比如图 3(a) 所示, 两者基本一致。图 3(b) 则给出了不同偏压条件下的电离电子透过率计算结果。结果表明, 栅极电极电势为 -110 V、偏压应在 35 V 以上, 能实现探测器的有效外部触发控制。经过多次模拟优化, 最终设计的探测器参数如表 1 所列。

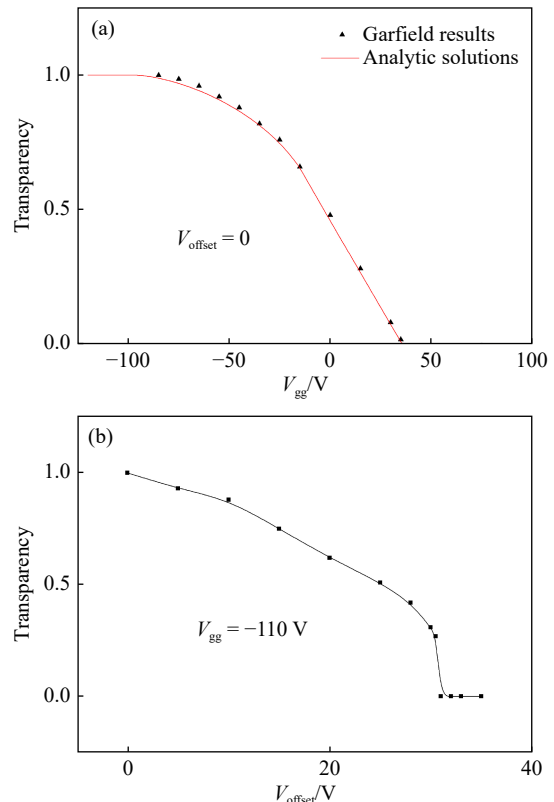


图 3 探测器栅极电极电势模拟结果

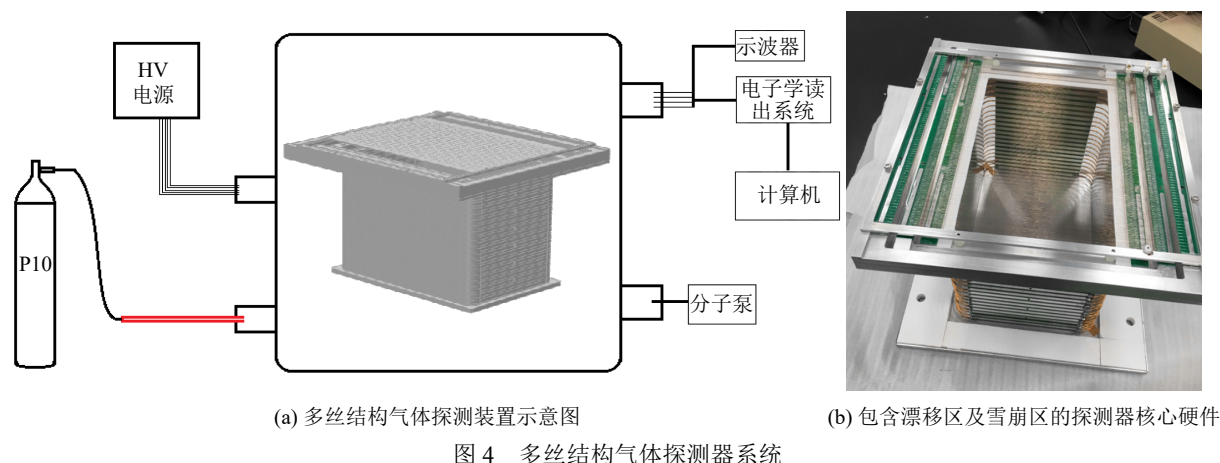
(a) 偏压为 0, 不同栅极电势下电子透过率模拟结果与理论计算结果比较; (b) 不同偏压条件下电子透过率模拟结果。

表 1 模拟优化的多丝结构气体探测器参数表

探测器电极	电势	位置	间距	半径
Pad plane	0 V	$y = 2.9$ cm		
阳极细丝电极	1 400 V	$y_a = 2.5$ cm	4 mm	25 μm
接地细丝电极	0 V	$y_g = 2.1$ cm	1 mm	75 μm
栅极细丝电极	-110 V (偏压 ± 35 V)	$y_s = 1.5$ cm	1 mm	75 μm
漂移区电场	120 V/cm			

2 多丝结构气体探测器研制及实验

基于表 1 的探测器参数, 开展了多丝结构气体探测器研制。探测器系统如图 4 所示。探测器场笼结构采用印刷电路板 (PCB) 制作。在 PCB 板上印制宽度为 6 mm、间距为 4 mm 的覆铜金属条带, 并施加等梯度的电势, 用于获得具有均匀漂移电场的探测器漂移区。雪崩区阳极细丝电极选用镀金钨丝, 接地和栅极细丝电极选用铍



铜丝;细丝电极施加一定张力,焊接在设计PCB电极连接板上。在探测器顶部安装了Pad接收板部件,并通过绝缘端子连接至外部电子学系统或进行示波器采样。探测器气体介质选用90%Ar+10%CH₄的氩甲烷气体(P10)。探测器主体置于真空腔内,系统预先进行抽气,直至真空度达到约 10^{-3} Pa,然后充入P10气体至一个大气压。在施加各组高压电势后,探测器即可开展探测实验。

宇宙射线经过地球大气簇射后,绝大部分近地表入射粒子为 μ 子,其能量范围较宽,平均能量约为3~4 GeV,能够穿透探测器外围真空腔,被探测器测量。利用设计的多丝结构气体探测器,开展了宇宙射线 μ 子探测实验。

实验过程中,采用示波器对Pad接收板输出信号进行直接电压波形采样,以避免电子学读出系统处理过程带来的波形畸变。同时,结合蒙特卡罗程序GEANT4,进行了相应测量过程的模拟计算。依据国外研究机构测量的宇宙 μ 子能谱数据^[13],进行入射粒子能量采样,通过模拟计算获得探测器中发生电离时的位置及电离电子数目。之后,将相关数据输入GARFIELD程序中,进行探测器的输出响应模拟。其中单个电子在探测器中引起的雪崩效应以及对阳极Pad平面获得的电流信号如图5所示。可知,雪崩电子漂移速度较快,对应的电流信号幅度较大,但持续时间较短。而电离离子运动速度较小,对应电流信号幅度较小,信号能够长时间持续存

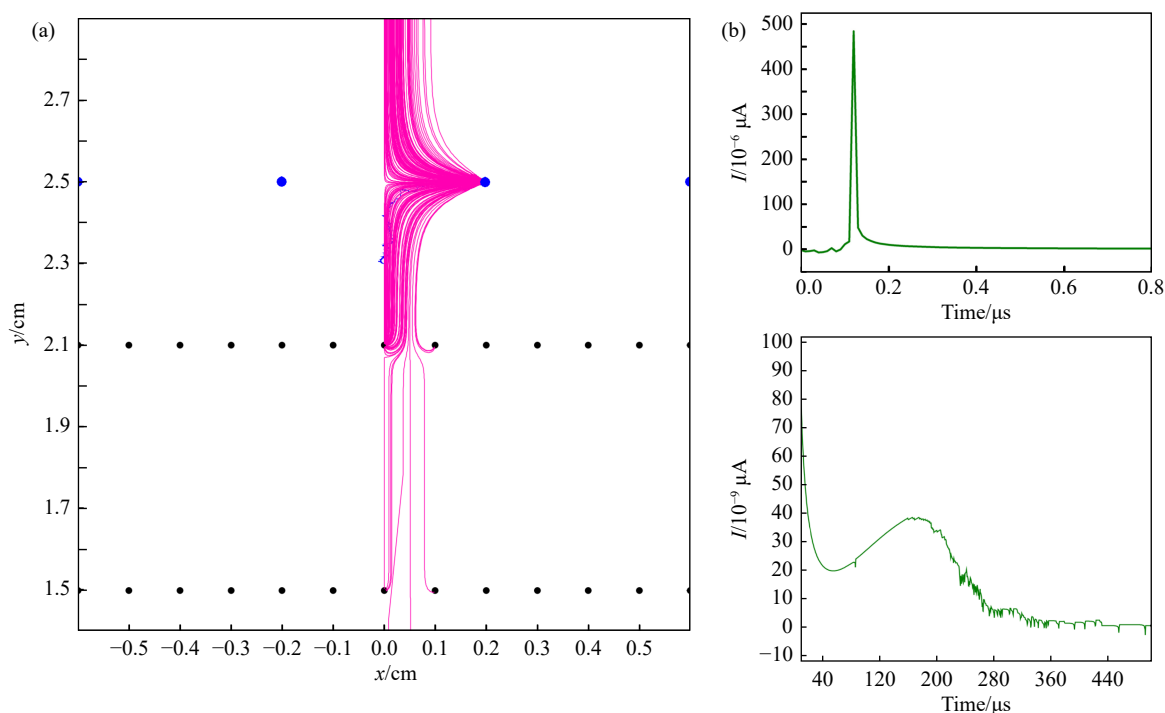


图5 单粒子入射探测器模拟结果图

(a) 为电离电子引起的雪崩过程; (b) 为探测器输出电流信号模拟结果, 上图为雪崩电子产生的电流, 下图为雪崩离子运动产生的电流。

在。由于采用 Pad 结构进行信号输出, 实验过程中电离离子一部分向 Pad 接收板方向运动, 另一部分则反向向着接地细丝电极移动。实际输出信号为极性相反的这两部分信号的叠加结果。基于模拟得到的电流信号和外部电路的阻容参数, 获得单次粒子入射探测器的脉冲电压波形模拟结果, 与测量结果基本一致。

由于入射 μ 子具有宽能谱特性, 加之探测器中气体放大倍数波动性较大, 两者叠加使得探测器用于 μ 子测量时输出信号幅度范围较大, 因而无法实现单一 μ 子入射时模拟结果与实验结果的对比。鉴于此, 对探测器实验输出波形进行采集、积分处理, 获得了探测器对于单一入射 μ 子的积分电荷的测量结果, 并对所有事例测量结果进行统计分析。同时, 利用 GARFIELD 程序针对 μ 子入射探测器进行了完全相同的模拟计算, 得到该测量过程的模拟计算结果。两者对比如图 6 所示。可知, 探测器测量结果与模拟结果符合很好, 说明本项研究提出的探测器设计优化方法切实有效, 研制的探测器工作正常, 测量结果真实可信。

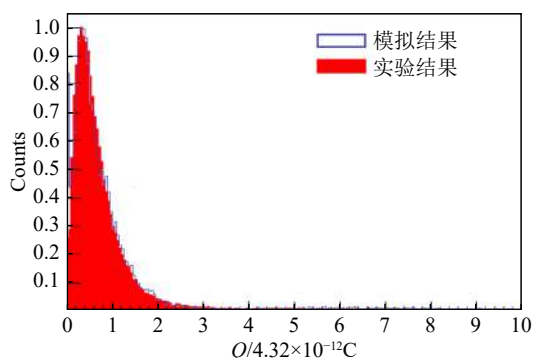


图 6 探测器测量 μ 子的积分电荷统计结果与模拟结果对比

3 总结

基于多丝结构气体探测器的电场计算理论及探测器模拟程序 GARFIELD, 开展了探测器的设计工作。通过对多丝电极阵列的电场模拟计算, 获得了适宜的探测器结构及电势参数。在此基础上, 进行了探测器的研制。利用 PCB 电路板建造了探测器漂移区, 并探索了探测

器雪崩放大区多丝电极阵列的焊接、固定、张力施加等工艺技术。利用研制的探测器开展了宇宙 μ 子的测量实验, 并进行了相应的模拟研究。研究表明, 研制的探测器能够长期稳定运行, 且实验测量得到的脉冲波形积分电荷统计结果与模拟计算结果符合很好。论文提出的探测器模拟计算方法、探测器研制技术及实验技术等完全可用于核物理及核技术领域类似结构气体探测器的优化设计及实验评估, 为这类探测器的研制及实验提供借鉴。

参考文献:

- [1] CHARPAK G, DERRÉ J, GIOMATARIS Y, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 478(1-2): 26.
- [2] SAULI F. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 805: 2.
- [3] VARGA D, GÁL Z, HAMAR G, et al. *European Journal of Physics*, 2015, 36: 065006.
- [4] IGO G, HUANG H, HARPER G, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 499: 659.
- [5] ATWOOD W B, BARCZEWSKI T, BAUERDICK L A T, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1991, 306(3): 446.
- [6] SHANE R, MCINTOSH A B, ISOBE T, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 784: 513.
- [7] VEENHOF R. Garfield Simulation Program[EB/OL]. [2018-07-01]. <http://garfield.cern.ch/garfield>.
- [8] WEN Zheng, ZHANG Wendian. *Authoritative Guide on Finite Element Analysis with ANSYS 14.0*[M]. Beijing: China Machine Press, 2013. (in Chinese)
(温正, 张文电. *ANSYS 14.0 有限元分析权威指南*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.)
- [9] SAULI F. Principles of Operation of Multi-wire Proportional and Drift Chambers[EB/OL]. [2023-06-05]. http://web.ihep.su/spitsky/mipt/literature/src/hep/Sauli_7708272.pdf.
- [10] BLUM W, ROLANDI L, RIEGLER W. *Particle Detection with Drift Chambers*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [11] RENKA R J. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1988, 14(2): 139.
- [12] ZHANG Yaofeng, YIN Yuan, ZHANG Chunlei, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(12): 2454. (in Chinese)
(张耀锋, 尹远, 张春雷, 等. *原子能科学与技术*, 2019, 53(12): 2454.)
- [13] SATO T. *PLoS One*, 2015, 10(12): e0144679.

Studies on Multi-wire Gaseous Detectors

ZHANG Chunlei^{1,2}, CAO Ligang^{1,2}, HUANG Jianwei³, ZHANG Yaofeng^{1,2,†}

(1. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Institute of Ionizing Radiation Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: Multi-Wire gaseous detectors have been widely used in the fields of nuclear physics and nuclear technology since they have the advantages of radiation hardness, fast response, large sensitive area, low cost and convenient fabrication. First, the electric field calculation theories for multi-wire gaseous detectors were introduced, and then the electric field calculations and the structure design for the drift region and avalanche region of a multi-wire gaseous detector had been carried out with ANSYS and GARFIELD. Next, the designed detector had been simulated in the case of cosmic ray irradiation with GEANT4, and the output results of current pulses, voltage pulses, the integrated charge for each event and the overall statistic results of the integrated charge were obtained. Furthermore, the multi-wire gaseous detector had been built and was used to measure the cosmic rays. The experiment results agree well with the previous simulation results. The simulation methods and the related experiment technologies in this study can be used to do design optimizations and experiment evaluations for gaseous detectors.

Key words: multi-wire gaseous detector; electric field calculations; detector simulations; cosmic ray measurements

Received date: 25 Jun. 2023; **Revised date:** 13 Dec. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11605009); Opening Foundation of National Defense Science and Technology Key Laboratory of Metrology and Calibration Techniques(JLKG2022001C003)

† Corresponding author: ZHANG Yaofeng, E-mail: zhangyf10@bnu.edu.cn