

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416876

辐射生物效应纳剂量探测器参数设计研究^{*}龚雨程^{1,2} 黄 骥² 吴国新¹ 王 坤² 邱 睿³(1. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100096; 2. 中国计量科学研究院电离辐射计量科学研究所 北京 100029;
3. 清华大学工程物理系 北京 100084)

摘 要: 纳剂量学通过统计初始粒子电离的离子数量与种类等物理量来模拟辐射生物效应。微孔道电离离子计数的纳剂量探测器通过配置内电场驱动电离离子漂移进入微孔道,并在强压下诱导电子雪崩实现测量。本文针对纳剂量准确测量需求,开展基于有限元分析与蒙特卡洛方法的微孔道电离离子计数纳剂量探测器参数设计研究。利用 COMSOL 有限元分析与 Garfield++ 蒙特卡洛软件,对探测器内部静态电场、电离离子动态输运以及微孔道内电子雪崩形成进行计算与模拟,系统研究了不同阳极、阴极电场配置下内部电场漏斗效应的形成特性,分析了其对电离离子动态输运和收集效率的影响规律,研究了电子雪崩对电场配置、微孔道直径等设计参数的依赖性,并对结果进行讨论与归纳。分析结果表明,阳极电压选取 5~15 V,阴极电压选取 -1 500~-2 000 V,微孔道半径选取 0.5~0.75 mm 可实现较好测量性能。本文的研究结果将为深入了解纳剂量探测器的内部工作机制及参数设计优化提供重要的理论依据。

关键词: 纳剂量探测器;COMSOL 有限元分析;Garfield++ 蒙特卡洛方法

中图分类号: TL818;TH89;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4025

Research on parameter design of radiation biological effect nanodosimeter

Gong Yucheng^{1,2} Huang Ji² Wu Guoxin¹ Wang Kun² Qiu Rui³(1. College of Mechanical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100096, China;
2. Division of Ionizing Radiation Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;
3. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Nanodosimetry simulates the biological effects of radiation by measuring physical quantities, such as ions that are ionized by initial particles. The microchannel ionized ion counting nanodosimeter can measure ionized ions by utilizing an internal electric field to drive them into the microchannel, where they induce an electron avalanche under high voltage. This paper studies the parameter design of a nanodosimeter utilizing microchannel ionized ion counting, based on finite element analysis and the Monte Carlo method. COMSOL finite element analysis and Garfield++ Monte Carlo software are utilized to calculate and simulate the static electric field, the dynamic transport of ionized ions, and the formation of electron avalanches in microchannels. The characteristics of the internal electric field funnel effect were systematically studied under various anode and cathode electric field configurations. Additionally, the impact of these configurations on the dynamic transport and collection efficiency of ionized ions was analyzed. The dependence of electron avalanche on design parameters, such as electric field configuration and microchannel diameter, is examined, and the results are discussed and summarized. The analysis results indicate that selecting an anode voltage of 5~15 V, a cathode voltage of -1 500~-2 000 V, and a microchannel diameter of 0.5~0.75 mm can achieve good measurement performance. The research findings presented in this article will provide a crucial theoretical foundation for a deeper understanding of the internal mechanisms and parameter design optimization of nanodosimeters.

Keywords: nanodosimeter; COMSOL finite element analysis; Garfield++ Monte Carlo method

0 引 言

放射治疗^[1]是肿瘤控制的主要手段之一,约 70% 的癌

症患者需要使用放射治疗。质子重离子束放疗是癌症治疗领域的重大革新,显著提升了治疗效果,而辐射生物学效应是质子离子束治疗中极为重要的参数,其准确评估是实现

收稿日期:2024-09-12

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2021YFF0603600)项目资助

精准放疗的重要前提。

在所有辐射生物效应^[2-5]中,纳米尺度细胞核 DNA 的辐射损伤是最初始、最重要的损伤。DNA 辐射损伤将会导致基因突变、染色体畸变、细胞死亡等,进而表现为确定性效应和随机性效应。纳剂量学即是在纳米尺度下描述离子径迹的理论,是搭建辐射生物效应与辐射物理量之间的桥梁,因此研究生物纳米尺度的纳剂量学计量技术是理解质子重离子束辐射生物效应机制的重要手段,目前已成为剂量学领域国际学术的前沿和热点。

国际上纳剂量探测器研究较早,已建立较为系统的纳剂量学测量技术及系统装置。1995 年,意大利国家核物理研究院研发了一种电子探测纳剂量计^[6-7],并于 2006 年通过进一步改造沉积在低压气体中的单个辐射电离电子进行计数从而获取电离簇密度分布,可模拟 20 nm 的凝聚物低压气体下的电子扩散限制了等效灵敏体积尺寸,但距 DNA 分子尺度仍有一定差距。自 2002 年开始,德国联邦物理技术研究院提出一种离子探测纳剂量计^[8-10],并对电离诱发的单个正离子逐个进行计数,实现了 DNA 尺度凝聚物辐射纳剂量测量及大集群事件记录。2024 年该团队利用上述装置首次研究了治疗能量的碳离子在穿透模拟组织层后的纳剂量特性。2021 年,瑞士苏黎世大学研究人员^[11]报道了一种单一无壁灵敏体积的紧凑型纳剂量测量装置,并报告了对 5 MeV α 粒子电离簇密度分布的测量,为纳剂量探测器便携设计与测量提供重要启示。

中国计量科学研究院在瑞士苏黎世大学的设计基础上,首次开展国内纳剂量学计量关键技术及探测器研制。针对纳剂量准确测量^[12]需求,本文基于有限元分析与蒙特卡洛方法,系统分析了微孔道电离离子计数纳剂量探测器设计参数对探测性能的影响,将为深入理解纳剂量测量技术,对纳剂量探测器研制与设计优化提供理论基础与指导。

1 方 法

纳剂量探测器的设计原理^[13]如图 1 所示,装置内内置气密室腔体并充入组织等效气体(如丙烷),通过真空设备^[14-15]控制气密室内部低压以模拟纳米凝聚物,实现在纳米尺度了解电离辐射作用。研究常用 1 Torr 的丙烷组织等效气体(密度约为 2.3×10^{-6} g/cm³),该条件下,气体中 1 mm 对应于单位密度下的 2.1 mm。深灰色部分为高阻介质板^[16](由 ZrO₂ 陶瓷构成),中心制备有微孔道,作为电离收集通道。高阻介质板一端连接读出电极,并与气密室内部的低密度组织等效气体^[17-18](如:丙烷)相接触,另一端连接阴极并加载负高压,距高阻介质板一定位置处放置阳极,使其在灵敏体积区域内形成一定场强的漏斗效应漂移电场。

初级粒子(选用 α 粒子)射出后穿过气密室中的低密度组织等效气体,电离生成电离离子和电离电子。正电离离子在电场作用下向高阻介质板漂移并被提取进入微孔道

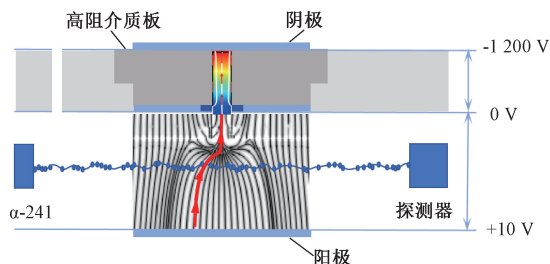


图 1 电离离子计数方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the ionization ion counting method

(如图 1)。阴极与读出电极间的大电位差在孔内产生高场强(加速电场),致使进入微孔道的正离子获得足够的能量并与气体碰撞电离产生新的离子-电子对。在加强电场下电子向孔外加速漂移,电子雪崩^[19]由此形成,并从电介质的读出电极读出,实现电离离子计数。

2 软 件

使用 COMSOL 有限元分析与 Garfield++ 蒙特卡洛模拟^[20]软件,分别设置不同阴极电压、阳极电压、微孔道直径参数,对不同数值条件下探测器内部静态电场、电离离子动态输运以及微孔道内电子雪崩情况进行分析,选取最佳取值范围。

2.1 基于 COMSOL 的有限元分析

COMSOL 的有限元分析,采用计算电磁 AC/DC 模块进行静电场曲线模拟。首先对探测器内部电场部分进行几何形状简化模型的创建,图 2 所示为探测器的二维简化模型,腔室内部尺寸为 54.9 mm×32 mm,所设置阴极/阳极板尺寸为 43.9 mm×43.9 mm,根据拟选取材质对不同部件进行材质设置,设置阴极、阳极为黄铜,电介质板材质为陶瓷(ZrO₂ 为主要成分),灵敏体积部分为丙烷气体。模拟结果由内部电场线分布呈现。

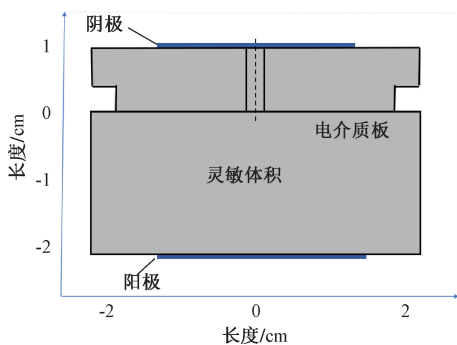


图 2 探测器的 COMSOL 二维简化模型

Fig. 2 Two-dimensional drawing of detector cavity in COMSOL

2.2 基于 Garfield++ 的蒙特卡洛模拟

雪崩电离^[21-22]的产生是由于:阴极和读出电极/漂移电极之间较大的电势差使微孔道内部产生强电场,离子在高

场强电场中被加速,并在加速场中获得足够的能量,与气体分子产生碰撞电离^[23-24],电离产生的电子向电场线相反的方向加速获得更多的能量,并进一步电离气体,产生二次电子、三次电子……形成雪崩,该雪崩在空间上受到介质板的壁的限制,相当大一部分电子雪崩将离开空穴,并被读出电极收集。

使用 Garfield++ 蒙特卡洛软件可以模拟粒子的漂移行为和电子雪崩电离特性,但不可以直接将这两种模拟类型结合在一起。本文分别对两种过程进行模拟分析,当一个离子漂移到电介质板孔,动态地引起多个电子雪崩同时开始,根据模拟的相关收集效率与电子雪崩状态进行评估,选取最优参数范围。

3 参数设计

本文考虑多种因素对纳剂量探测器性能的影响,对于不同阴极电压、阳极电压和微孔道的相关参数进行 COMSOL 有限元分析与 Garfield++ 蒙特卡洛模拟,探究探测器内部静态电场、电离离子动态输运以及微孔道内电子雪崩形成规律,确定最佳取值范围以提升探测器探测效率。

3.1 不同阴极电压相关参数模拟

图 3(a)~(d)所示为不同阴极电压条件下,探测器内部静态电场、电离离子动态输运的模拟结果图。图 3(左)4 幅图均展现了在阳极电压恒定于 10 V,微孔道半径恒定为 0.75 mm 时,通过 COMSOL 模拟不同阴极电压下所得的电场分布特征。这些模拟结果显示电场线呈现出漏斗形态,此现象被称为漏斗效应。其成因在于电场内部电势差异促使电荷进行定向迁移,进而构建电场。当电荷位于特定区域,其所受电场力随距离改变而发生变化,导致该区域内电场梯度形成,进而塑造出漏斗状的电场结构。可以看出在阳极电压一定的情况下阴极电压越大,漏斗效应越明显。图 3(右)由 Garfield++ 蒙特卡洛软件输出的离子输运效果图,阳极电压与微孔道半径一定,增大阴极电压将引起相应离子输运效率的增加,在 -1 500 V 的条件下离子输运效率可达 63%。

Garfield++ 模拟离子输运效率与阴极电压的相对关系曲线如图 4 所示。在阳极电压恒为 10 V 的情况下,电离离子的收集效率随阴极电压的增长整体呈上升趋势,阴极电压由 -100 V 增加至 -4 000 V,收集效率从 10% 上升至 86%。然而,模拟结果显示,当阴极电压高于 -2 000 V 后,随着电压的进一步增大收集效率上升趋势逐渐趋于平缓。此外,当阴极电压过高时,电离离子在漂移进入收集孔的过程中会获得足够高的能量从而进一步电离气体产生电离离子,导致探测器探测精度下降。因此,阴极电压数值不宜设置过高,最佳阴极数值在 -1 500~-2 000 V 左右。

图 5(a)~(d)所示为不同阴极电压的条件下,阳极电压恒定为 10 V,微孔道半径恒定为 0.75 mm,不同阴极电

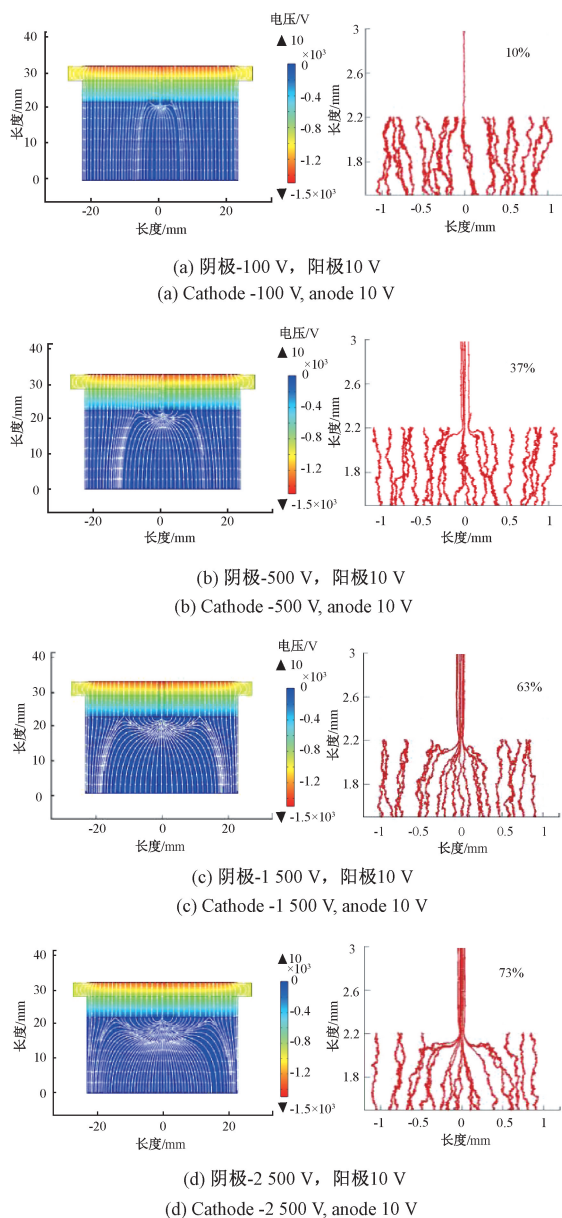


图 3 COMSOL 模拟相同阳极电压与微孔道半径条件下,不同阴极电压的下不同静态电场分布与其对离子输运的影响

Fig. 3 COMSOL simulates the distribution of the static electric field and its impact on ion transport at various cathode voltages, while maintaining consistent anode voltage and microchannel radius conditions

压条件下的电子雪崩电离 Garfield++ 模拟结果。随着阴极电压的增加,微孔道内部场强增强,电子雪崩效应逐渐增强。模拟结果显示,当阴极电压设置高于 -1 500 V 时,微孔道内的电子雪崩效应强度足以满足信号读出。

3.2 不同阳极电压的相关参数模拟

阳极电压的取值对离子漂移电场部分场强产生直接影响,进而影响电离离子的收集效率。图 6(a)~(d)展示了阴极电压恒为 -1 500 V,基于 COMSOL 有限元分析不同

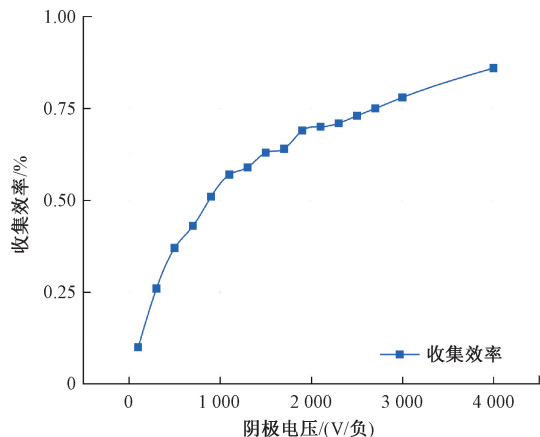


图 4 阳极电压与微孔道半径一定情况下，不同阴极电压下的离子收集效率

Fig. 4 Ion collection efficiency at varying cathode voltages with constant anode voltage and microchannel radius

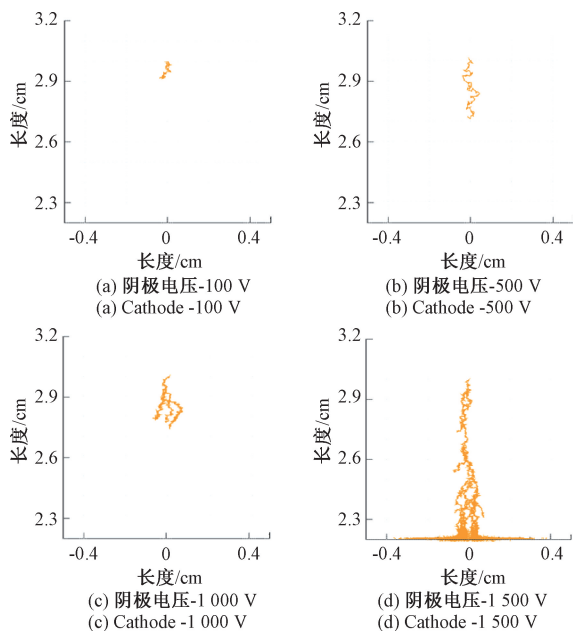


图 5 阳极电压与微孔道半径一定情况下，不同阴极电压的雪崩电离模拟

Fig. 5 Simulation of avalanche ionization at varying cathode voltages with constant anode voltage and microchannel radius

阳极电压的电场分布特性。结果显示，阴极电压保持不变，漏斗效应随阳极电压的增大逐渐减小。离子运输模拟结果由图 6(右)所示，阳极电压较小离子运输效率较高，详细变化趋势曲线如图 7 所示。

图 7 展示了阴极电压恒为 $-1\ 500\ \text{V}$ ，不同阳极电压的离子收集效率曲线图。当微孔道直径和阴极电压恒定时，探测器的收集效率随阳极电压的递增呈现下降趋势。模拟结果显示阳极电压设置为 $5\ \text{V}$ 时，电离离子的收集效率最大。综合以上分析，在其他条件一定的情况下，选取较小阳

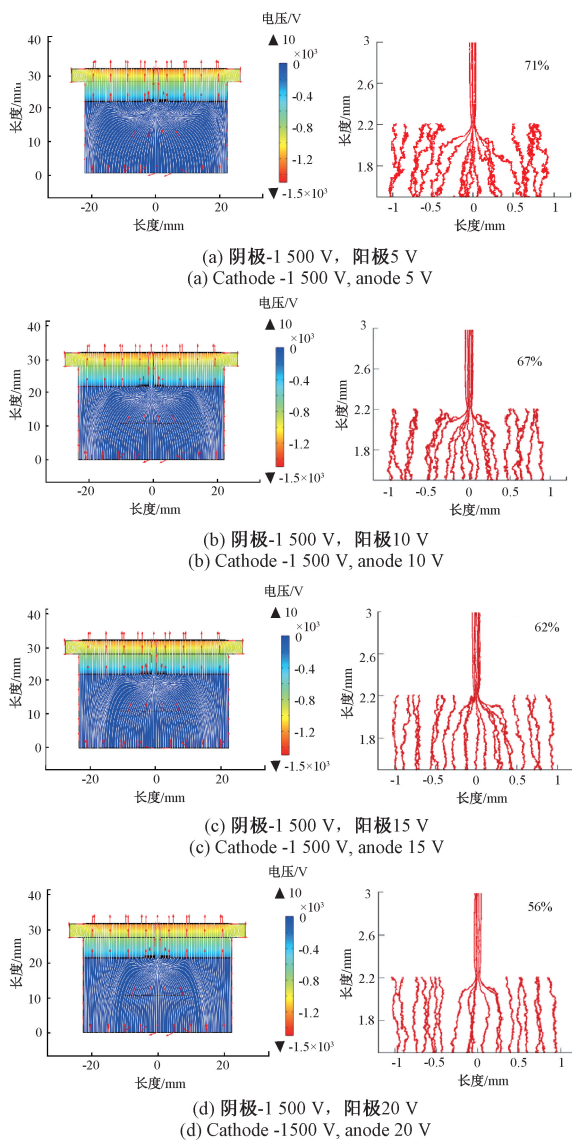


图 6 COMSOL 模拟相同阴极电压与微孔道半径条件下不同阳极电压对电场与离子运输的影响

Fig. 6 COMSOL simulation of the effects of varying anode voltages on electric field and ion transport with constant cathode voltage and microchannel radius

极电压有利于探测器效率的提升。

如图 8(a)~(d)所示为阴极电压 $-1\ 500\ \text{V}$ ，微孔道半径 $0.75\ \text{mm}$ 的条件下，不同阳极电压的电子雪崩效应模拟。大量的模拟结果显示，阳极电压对电子雪崩效应具有一定的影响，然而从 $5\sim 30\ \text{V}$ 的阳极电压变化，电子雪崩效应影响具有一定随机性，微孔道内的电子雪崩效应强度足以满足信号读出，参数设计进行结合考虑选取阳极电压 $5\sim 15\ \text{V}$ 。

3.3 不同孔径的相关模拟

图 9(a)~(c)展示了阴极电压恒为 $-1\ 500\ \text{V}$ ，阳极电压 $10\ \text{V}$ (图 9(左))和 $30\ \text{V}$ (图 9(右))条件下，不同微孔道

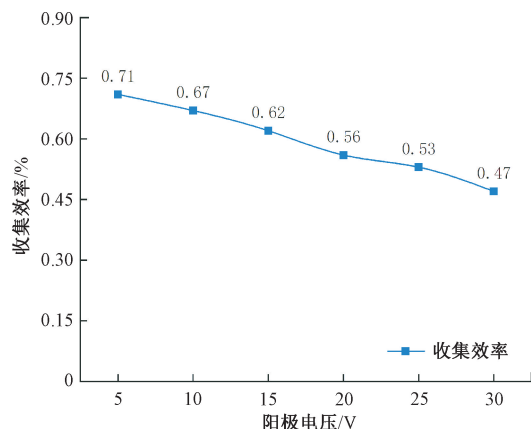


图 7 阴极电压与微孔道半径一定情况下,不同阳极电压下离子输运效率折线图

Fig. 7 Line graph of ion transport efficiency at different anode voltages under constant cathode voltage and microchannel radius

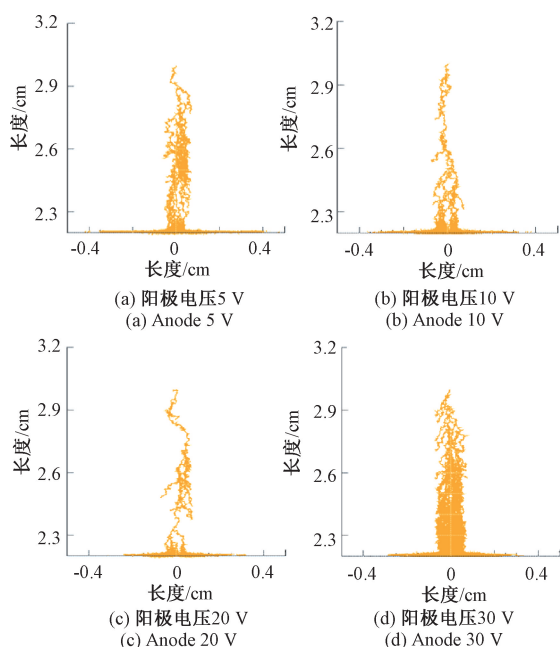


图 8 阴极电压与微孔道半径一定情况下,不同阳极电压的电子雪崩效应模拟

Fig. 8 Simulation of the electron avalanche effect at varying anode voltages with a constant cathode voltage and microchannel radius

半径的电场分布 COMSOL 模拟结果。当阴极电压和阳极电压恒定,探测器高阻介质的微孔道半径越大,漏斗效应越明显。阳极电压 10 V 和 30 V 条件下展现出相同的变化趋势。

如图 10 所示,通过 Garfield++ 模拟了阴极电压 $-1\ 500\text{ V}$,阳极电压分别 10 V(实心)和 30 V(空心)条件下,不同孔径的纳剂量探测器的电离离子收集效率。模拟结果显示,随着微孔道半径的增大,探测器的收集效率呈上升趋势,但其上升幅度随着半径的进一步增大逐渐趋于平缓。经电场漏斗效应模拟情况与离子输运情况分析,选取

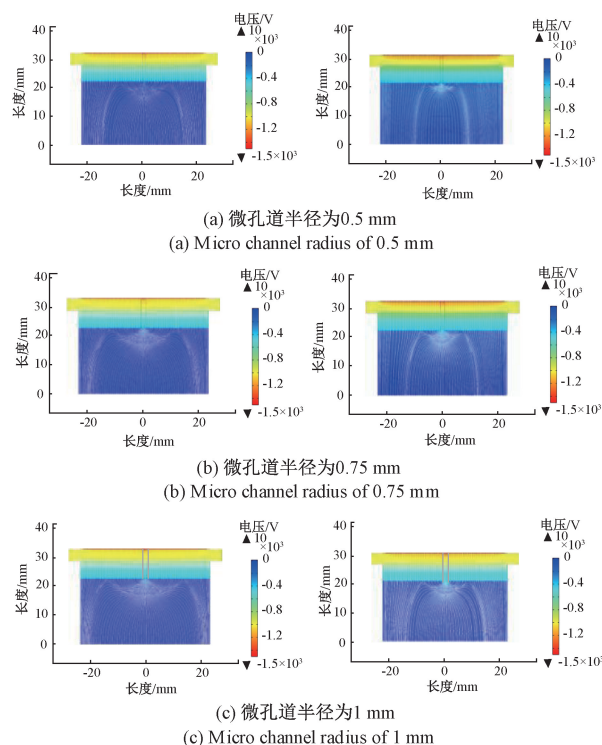


图 9 负压 $-1\ 500\text{ V}$, (左)正压 30 V, (右)正压 10 V,不同微孔道半径的电场的漏斗效应分布

Fig. 9 Distribution of the funnel effect of electric fields with varying micropore radii: negative pressure at $-1\ 500\text{ V}$, positive pressure (left) at 30 V, and positive pressure (right) at 10 V

微孔道半径 0.5~0.75 mm 之间的数值进行设计对整体探测器探测效率更为有利。同时图 10 中展示了阳极电压 10 V、30 V 时,不同微孔道半径条件下的电离离子收集效率。对 3.2 节所述的关于选取相对较小的阳极电压有利于提升探测器收集效率的结论进行了验证。

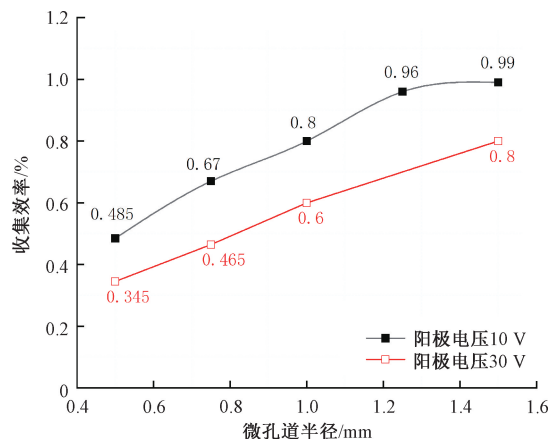


图 10 在阴极电压 $-1\ 500\text{ V}$,阳极电压分别为 10 V 与 30 V 的条件下,不同微孔道孔径离子收集效率

Fig. 10 The graph illustrates the ion collection efficiency for various micropore sizes under cathode voltages of $-1\ 500\text{ V}$ and anode voltages of 10 V and 30 V, respectively

此外,依据 Vasi 等^[1]的研究可知,随着探测器微孔道半径的增加,随之产生的正负电荷越多,微孔道内产生的正电荷会附着在阴极壁上并在阴极与微孔道内部累积(充电效应)。探测器微孔道内所发生的充电效应会加速探测器微孔道老化,缩短其使用寿命并对探测性能造成影响。综合模拟结果可知,微孔道半径范围在 0.5~0.75 mm 范围内时,能够充分保证探测器收集效率同时延长微孔道使用寿命。

4 结 论

基于 COMSOL 有限元分析和 Garfield++ 蒙特卡洛方法的纳剂量探测器参数设计研究,通过对探测器内部静态电场、电离离子动态输运以及微孔道内电子雪崩形成进行计算、模拟,探究不同阳极、阴极电压配置下内部电场漏斗效应的形成特性,分析了其对电离离子动态输运和收集效率的影响规律,研究了电子雪崩对电场配置、微孔道直径等设计参数的依赖性,并对结果进行讨论与归纳。通过模拟,对提升探测器探测效率的关键因素进行了详细研究。研究发现,高阴极电压虽能够提供更高的场强,增强电子雪崩效应。但当阴极电压过高时,电离离子在漂移进入收集孔的过程中会获得足够高的能量从而进一步电离气体产生电离离子,导致探测器探测精度下降。因此,阴极电压数值不宜设置过高。阳极电压对探测器的离子收集效率具有一定影响,较低的阳极电压展现出更高的收集效率,同时研究表明阳极电压对电子雪崩效应影响并不显著。因此,在探测器测量过程中建议选取较低的阳极电压。探测器的微孔道半径对电离离子的收集效率具有显著影响,随微孔道半径增加离子收集效率逐渐增加。然而较大的微孔道半径会加速器件老化,缩短探测器使用寿命,因此微孔道半径不宜过大。

综合考虑多种因素的影响,对各参数的取值进行仔细考量,最终确定了最佳参数范围:阳极电压选取 5~15 V,阴极电压选取 -1 500~-2 000 V,微孔道半径选取 0.5~0.75 mm。本文的模拟结果为纳剂量探测器的设计与研究提供了重要参考,同时对推进国内纳剂量相关研究具有重要意义。通过对纳剂量辐射生物效应的研究,将辐射物理量与质子重离子辐射生物效应建立联系,有利于深入探究辐射的影响。

参考文献

- [1] 杨根,赵梓茗,张艺宝,等.肿瘤放射治疗的发展[J].原子能科学技术,2024,58(S2):492-500.
YANG G, ZHAO Z M, ZHANG Y B, et al. Development of tumor radiotherapy [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58 (S2): 492-500.
- [2] 欧红玲,艾文超,王岩,等.电离辐射生物标志物研究与应用进展[J].中国药理学与毒理学杂志,2024,38(1):

70-78.

OU H L, AI W CH, WANG Y, et al. Progress in research and application of ionizing radiation biomarkers[J]. Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2024, 38(1): 70-78.

- [3] 曹毅,谢文.电离辐射的生物效应及健康影响[J].科技导报,2018,36(15):48-53.
CAO Y, XIE W. Biological effects and health effects of ionizing radiation [J]. Science and Technology Herald, 2018, 36(15): 48-53.
- [4] ROJO P E, BARQUINERO F J, ALIJA P J, et al. Differential biological effect of low doses of ionizing radiation depending on the radiosensitivity in a cell line model. [J]. International Journal of Radiation Biology, 2024,100(11):1527-1540.
- [5] RABUS H. Nanodosimetry-on the “tracks” of biological radiation effectiveness [J]. Zeitschrift Fur Medizinische Physik, 2020,30(2):91-94.
- [6] BANCER A, PIETRZAK M, MIETELSKA M. Particle track structure measurements from 0.5 to 18 nm in nitrogen using the Jet Counter nanodosemeter [J]. Radiation Physics and Chemistry,2020,172:108805.
- [7] CASIRAGHI M, BASHKIROV V A, HURLEY R F, et al. Characterisation of a track structure imaging detector [J]. Radiation protection dosimetry, 2015, 166(1-4): 223-227.
- [8] HILGERS G, BUG M U, RABUS H. Measurement of track structure parameters of low and medium energy helium and carbon ions in nanometric volumes [J]. Physics in Medicine & Biology, 2017, 62 (19): 7569-7597.
- [9] BANTSAR A, COLAUTTI P, CONTE V, et al. State of the art of instrumentation in experimental nanodosimetry [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2018, 180(1-4): 177-181.
- [10] HILGERS G, RABUS H. Correlated ionisations in two spatially separated nanometric volumes in the track structure of ²⁴¹Am alpha particles: measurements with the PTB ion counter [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 176: 109025.
- [11] VASI F, KEMPF I, BESSERER J, et al. FIRE: A compact nanodosimeter detector based on ion amplification in gas [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 999: 165116.
- [12] 戴天缘. 基于微剂量学及纳剂量学的离子束相对生物学效应研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院

- 近代物理研究所), 2020.
- DAI T Y. Research on the relative biological effects of ion beams based on microdosimetry and nanodosimetry[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [13] VASI F, SCHNEIDER U. First measurements of ionization cluster-size distributions with a compact nanodosimeter[J]. Medical Physics, 2021, 48(5): 2566-2571.
- [14] 宇文晓彤, 黄以铎, 潘晋新, 等. 基于物理模型与统计分析的作动器活动密封 O 形圈磨损预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(7): 159-166.
- YUWEN X T, HUANG Y F, PAN J X, et al. Research on wear prediction of actuator movable seal O-ring based on physical model and statistical analysis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(7): 159-166.
- [15] 吴靖, 陈远哲, 郭禹泽, 等. 聚合物基压力敏感涂料近真空稳态特性研究及优化[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 123-130.
- WU J, CHEN Y ZH, GUO Y Z, et al. Research and optimization of near-vacuum steady-state characteristics of polymer-based pressure-sensitive coatings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 123-130.
- [16] VENKATRAMAN P, SUREKA C S. Fabrication and characterization of a 3D Positive ion detector and its applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 872: 131-138.
- [17] BUG M U, GARGIONI E, NETTELBECK H, et al. Ionization cross section data of nitrogen, methane, and propane for light ions and electrons and their suitability for use in track structure simulations[J]. Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2013, 88(4): 43308.
- [18] VENKATRAMAN P, SUREKA C S. Analysis on the performance of a 3D positive ion detector as propene and argon sensor[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 450: 369-373.
- [19] 何兴坤, 钱鹏程. 基于雪崩三极管的脉冲发生器设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21): 65-69.
- HE X K, QIAN P CH. Design of pulse generator based on avalanche transistor [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(21): 65-69.
- [20] KEMPF I, STAUBLE T, SCHNEIDER U. Electrostatic field simulations and dynamic Monte Carlo simulations of a nanodosimetric detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1028: 166374.
- [21] BORTOT D, POLA A, AGOSTEO S, et al. A novel avalanche-confinement TEPC for microdosimetry at nanometric level[J]. Radiation Measurements, 2017, 103: 1-12.
- [22] 张宝进, 吴炳, 吕金鸽, 等. 超声显微测量系统的信号激励接收方法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(8): 8-13.
- ZHANG B J, WU B, LYU J G, et al. Research on signal excitation receiving method of ultrasonic microscopic measurement system [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 8-13.
- [23] KEMF I, SCHNEIDER U. Monte Carlo model for ion mobility and diffusion for characteristic electric fields in nanodosimetry [J]. Zeitschrift Fur Medizinische Physik, 2024, 34(1): 140-152.
- [24] HILGERS G, BUG M U, GARGIONI E, et al. Secondary ionisations in a wall-less ion-counting nanodosimeter: Quantitative analysis and the effect on the comparison of measured and simulated track structure parameters in nanometric volumes[J]. The European Physical Journal D, 2015, 69: 1-18.

作者简介

龚雨程, 硕士研究生, 主要研究方向为电离辐射剂量与装置研究。

E-mail: 372832908@qq.com

黄骥, 副研究员, 主要研究方向为电离辐射剂量。

E-mail: huangji@nim.ac.cn

吴国新(通信作者), 研究员, 主要研究方向为检测诊断与仪器科学。

E-mail: wgx1977@bistu.edu.cn

王坤, 研究员, 主要研究方向为电离辐射剂量。

E-mail: wangkun@nim.ac.cn