

电流模式下微型裂变电离室参数对探测性能的影响

孟令杰 赖伟

(中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

摘要 裂变电离室在工作时,其内部气体中持续地发生着电离和复合过程。为了进一步了解这些过程对探测性能的影响,需要从等离子体物理的角度来研究裂变电离室。借助 BOLSIG+ 以及电流模式下微型裂变电离室的基本理论模型,计算了电极的几何尺寸、裂变率以及气体电离度等参数对探测器饱和区电压范围的影响,并对结果进行了讨论。此外,根据不同电离度情况下的计算结果,对高温导致探测器饱和区电压范围变小这一现象给出了一种可能的解释。

关键词 裂变电离室, 电流模式, 电压范围, 饱和区

中图分类号 TL8

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120402

Influence of parameters of micro fission chamber operated in current mode upon the detection performance

MENG Lingjie LAI Wei

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

Abstract Background: When a fission chamber is operating for neutron detection, the ionization and recombination processes occur continually in its inner gas. Its detection performance correlates with these processes.

Purpose: This study aims to further understand the influence of these processes and parameters of micro fission chamber on the detection performance from the aspect of plasma physics. **Methods:** BOLSIG+ software and basic theory model of fission micro chamber are applied for the simulation of the detection performance in current mode. The voltage range of saturation zone is taken as function of parameters such as geometry dimension of the electrode size, fission rate and gas ionization degree. **Results:** The voltage range of saturation zone increases with the sensitive length, but decreases with fission rate and gas ionization degree. An optimal geometric electrode size exists for maximum voltage saturation zone. **Conclusion:** According to the computation results at different gas ionization degrees, one possible reason for the reduction of the voltage range of saturation zone at high temperature is explained.

Key words Fission chamber, Current mode, Voltage range, Saturation zone

裂变电离室的内部涂有一层裂变材料并充以不同的可电离的气体,由中子和裂变材料发生核反应产生的裂变碎片引起内部气体电离,正负离子在电场作用下,给出电信号,从而达到测量中子的目的。由于外加电场的电压不同,所形成的电信号特性不同。对于电离室,其输出的电流信号随电压变化的

曲线有三个典型的特征区域,分别为:复合区、饱和区以及雪崩区^[1]。其中,裂变电离室工作在饱和区,饱和区的电压范围越大,探测器的性能越好,而电离气体的复合速率系数和电离系数的增加会使复合区和雪崩区更加明显,相应地,饱和区电压范围就会变小。

中国科学院战略性先导科技专项(No.XD02001003)资助

第一作者:孟令杰,男,1983年出生,2012年于中国科学院近代物理研究所获博士学位,研究领域为粒子物理与原子核物理

Supported by Strategic Pilot Science and Technology of China Academy of Sciences (No.XD02001003)

First author: MENG Lingjie, male, born in 1983, graduated from Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2012, focusing on particle physics and nuclear physics

收稿日期:2016-07-26,修回日期:2016-11-02

影响复合速率系数和电离系数的因素有很多, 如气体成分、温度、外加电场以及电离度等。除了气体的影响外, 探测器的阴极、阳极尺寸和灵敏区长度也对饱和区范围有影响。微型裂变电离室通常应用于反应堆堆芯区域, 即中子通量密度和温度很高的环境中, 又因为其尺寸小, 因此对这些参数更加敏感。本文在已有工作^[1-6]的基础上, 借助最新版本的 BOLSIG+(03/2016)^[7-8], 重新评估了这些参数对电流模式下裂变电离室的影响, 并对研究方法和研究内容进行了一定的改进和补充。BOLSIG 是一款数值求解电子波尔兹曼方程的免费程序, 适用于计算在均匀电场中弱电离气体的各种基本系数和截面数据。

1 计算与分析

计算中需要用到的一个关键参数为 Townsend 第一电离系数(Townsend first ionization coefficient), 它的定义是沿电场方向, 在单位长度上由电子碰撞产生的平均电离数。对于该系数的拟合, 拟合形式不能过于复杂, 否则在后续的计算中难以求解。根据文献[2], 如果以横坐标 x 表示电场强度的倒数 $1/E$, $\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$, 以纵坐标 y 表示 Townsend 系数 α , m^{-1} , 那么在只考虑一个大气压的情况下, 采用的拟合形式为 $y=a\exp(bx)$, 式中: a 和 b 为拟合系数。该表达式简单, 便于后续计算, 但在考虑电离度的影响后 对于电场强度较小时的拟合结果很不理想。如果采用 $y=\exp(a+bx+cx^2)$ 的形式进行拟合, 可以改善这种情况, 并且易于计算, 式中: c 为拟合系数。当电离度为 10^{-7} 时, 两种方法拟合结果的对比如图 1 所示。

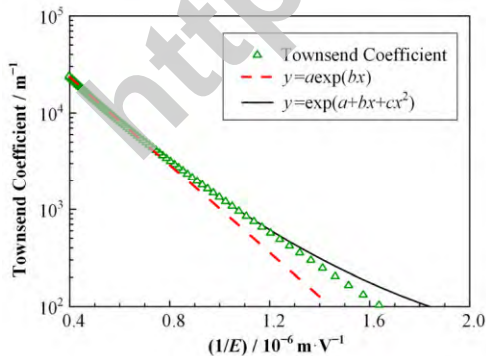


图 1 Townsend 系数的两种拟合结果对比
Fig.1 Comparison of two methods in fitting of the Townsend coefficients.

为了简化计算, 本文只考虑最简单的同轴型探测器结构, 图 2 为同轴型裂变电离室的基本结构。其中: R_1 为阳极半径; R_2 为阴极半径; h 为灵敏区长度。

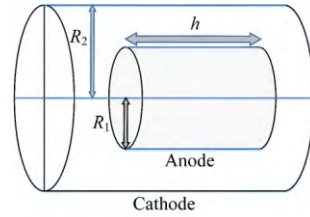


图 2 同轴型探测器基本结构示意图
Fig.2 Diagram of the basic structure of coaxial type detector.

根据文献[2]以及上述讨论的另一种拟合方法, 可以得到裂变电离室在饱和区的最小电压 V_{\min} 、最大电压 V_{\max} 和饱和电流 I_{sat} 的表达式:

$$V_{\min} \approx 0.5 \times (1 + \varepsilon(\lambda_e, \lambda_a)) \times \ln(R_2 / R_1) \sqrt{k I_{\text{sat}} (R_2^2 - R_1^2) / \mu_e \mu_a e h} \quad (1)$$

$$V_{\max} \approx 2c(R_2 - R_1) / \left[-b - \sqrt{b^2 - 4c(a + \ln(R_2 - R_1) + 2.323)} \right] \quad (2)$$

$$I_{\text{sat}} = e \tau_f X_0 [R_2 \times E(R_1 / R_2) - R_1] \quad (3)$$

式中: λ_e 、 λ_a 分别为填充气体的电子和离子的郎之万因子; ε 为 λ_e 和 λ_a 的函数; k 为气体中离子与电子的复合速率系数; e 为元电荷; τ_f 为裂变率; X_0 为气体单位长度径迹内裂变产物产生的电子-离子对的平均数, 对于微型裂变电离室, 可以近似认为 X_0 是一个常数; E 为第二类完全椭圆积分; μ_e 、 μ_a 分别为电子和离子迁移率; a 、 b 、 c 是通过 Townsend 电离系数拟合得到的参数。

定义探测器的饱和区电压范围:

$$L = V_{\max} - V_{\min} \quad (4)$$

该值越大, 则探测器性能越好。

根据文献[1], 对于 Ar 气 300 K 环境下的 k 为:

$$k = 8.8 \times 10^{-4} \sqrt{P} \times 4\pi \mu_e(E) e / \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (5)$$

表 1 给出了不同条件下的拟合参数。

表 1 不同条件下的拟合参数
Table 1 Fitting parameters under different conditions.

气体 Gas	电离度 Ionization degree	a	$b / 10^6$	$c / 10^{12}$	μ_e (800 V)
Ar	10^{-7}	12.460	-6.468 2	1.195 4	0.036 16
Ar (99%)+Xe (1%)	10^{-7}	12.197	-5.683 4	1.140 8	0.036 16
Ar	10^{-6}	12.423	-6.368 1	1.220 7	0.029 59
Ar	10^{-5}	12.114	-5.396 3	1.077 5	0.028 35
Ar	10^{-4}	11.630	-3.360 7	0.648 1	0.036 36

1.1 几何尺寸对饱和区电压范围的影响

假设气体为 Ar 气，电离度为 10^{-7} ，温度为 300 K，气压为 10^5 Pa，则饱和区电压范围 L 的分布如图 3 所示。图 3 中横坐标表示阴极半径，纵坐标表示阳极半径，不同 L 在图 3 中用颜色的深浅区分。从图 3 可见， L 较大的区域，其阴极半径与阳极半径之差 ΔR 约为 0.4 mm。当 ΔR 太大或太小时， L 都会变得很小。此外，计算结果（图 4）表明， L 随灵敏区长度 h 而增加，但曲线呈收敛趋势，说明 h 增加到一定程度后， L 不会再有明显变化。

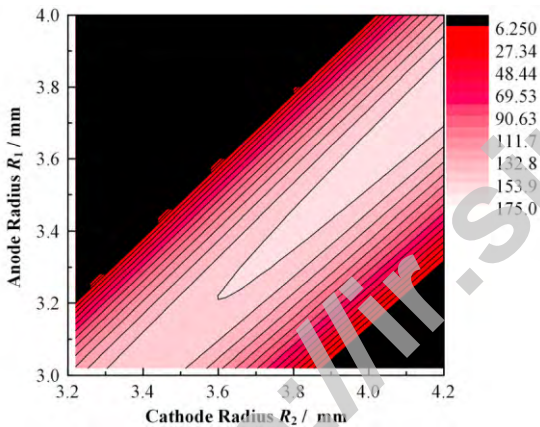


图 3 300 K、 10^5 Pa 氩气环境下饱和区电压范围随阴极、阳极半径的分布

Fig.3 Change in voltage extension as a function of radius of anode and cathode in 300 K, 10^5 Pa and argon environment.

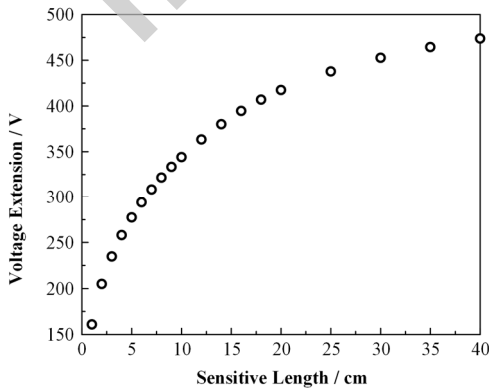


图 4 300 K、 10^5 Pa 氩气环境下饱和区电压范围与灵敏区长度的关系

Fig.4 Change in voltage range of saturation zone as a function of sensitive length in 300 K, 10^5 Pa and argon environment.

1.2 电离度和裂变率对饱和区电压范围的影响

在其他参数不变的情况下，考虑裂变率对探测器的影响，计算结果如图 5 所示。从图 5 可以看到，裂变率增加会导致饱和区电压范围的下降。也就是说，在中子通量密度很高或者探测器内转换材料很多的情况下，探测器的性能会有明显的下降。

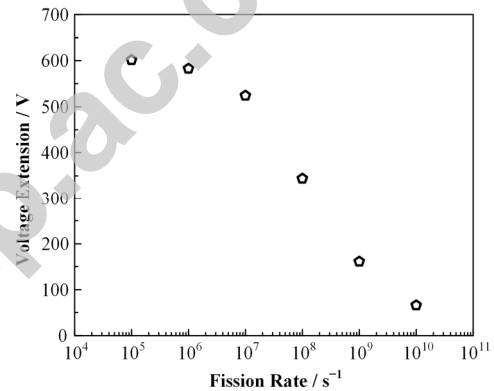


图 5 300 K、 10^5 Pa 氩气环境下饱和区电压范围与裂变率的关系

Fig.5 Change in voltage extension as a function of fission rate in 300 K, 10^5 Pa and argon environment.

图 6 考察了探测器在其它参数不变的情况下，电离度变化带来的性能变化。当电离度达到 10^{-5} 时，饱和区电压范围出现了明显的降低。裂变率的增加会导致电离度的增加，考虑到裂变率和电离度的双重影响，实际的电压范围下降会更加显著。除了裂变率导致电离度增加外，温度可能是导致电离度增加的另一因素。在电子和离子的复合过程中，电子可能处于气体原子的高里德堡态^[9]。根据美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的数据，以 Ar 原子 $3s^23p^5(^2P_{1/2})7f$ 态为例，处于该能级的电子电离需要约 0.1 eV 的能量。如果不考虑外加电场，根据经典热力学估算，300 K 温度下自由电子的平均动能约为 0.0388 eV，这个能量不足以电离 $3s^23p^5(^2P_{1/2})7f$ 能级的电子，而当温度增加到 1000 K 时，自由电子的平均动能约为 0.1293 eV，这一能量就可以将 $3s^23p^5(^2P_{1/2})7f$ 能级以上的电子电离。从以上分析中至少可以得出一个结论，在温度高时，电子更容易

被电离, 电离度也会随之增加。但这是否是高温下电离度增加的主要原因, 还需要更细致的理论分析和实验验证。

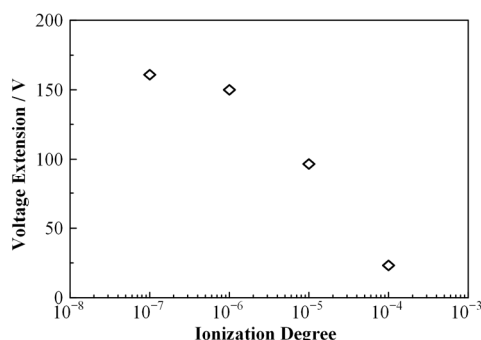


图 6 300 K、 10^5 Pa 氩气环境下饱和区电压范围与电离度的关系

Fig.6 Change in voltage extension as a function of ionization degree in 300 K, 10^5 Pa and argon environment.

2 结语

对文献中关于 Townsend 系数的拟合方式进行改进, 计算了裂变电离室各个参数对饱和区电压范围的影响, 得到以下结论: 增加灵敏区长度可以有效地增加探测器的饱和区电压范围, 但曲线呈收敛趋势, 过长的灵敏区并不能带来更好的性能。裂变率的增加会显著降低探测器的电压范围, 说明在高中子通量密度或探测器转换材料太多的情况下, 探测器的性能会明显变差。电离度升高会显著降低探测器的电压范围。增加电离度的一个重要原因是裂变率增加导致空间电荷效应; 另外一个可能的原因是辐射复合产生高里德堡态布居, 而温度升高时处于高里德堡态的电子更容易被电离, 进一步增加电离度。

通过这些计算和分析, 希望能为裂变电离室的研究和设计工作提供一些思路和数据参考。

参考文献

- 1 Chabod S, Fioni G, Letourneau A, *et al.* Modelling of fission chambers in current mode-analytical approach[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2006, **566**(2): 633–653. DOI: 10.1016/j.nima.2006.06.067
- 2 Chabod S, Letourneau A. Improvements in the modelling of micro fission chambers operated in current mode[C]. ANIMMA International Conference, Marseille, France, 2009. DOI: 10.1109/ANIMMA.2009.5503675
- 3 Chabod S. Impact of space charges on the saturation curves of ionization chambers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2009, **602**(2): 574–580. DOI: 10.1016/j.nima.2009.01.018
- 4 Chabod S. Saturation current of miniaturized fission chambers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2009, **598**(2): 578–590. DOI: 10.1016/j.nima.2008.09.051
- 5 Chabod S. A perturbation method to examine the steady-state charge transport in the recombination and saturation regimes of ionization chambers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2008, **595**(2): 419–425. DOI: 10.1016/j.nima.2008.07.115
- 6 Chabod S. Charge collection efficiency in ionization chambers operating in the recombination and saturation regimes[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2009, **604**(3): 632–639. DOI: 10.1016/j.nima.2009.03.019
- 7 Hagelaar G J M, Pitchford L C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2005, **14**(4): 722–733. DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/011
- 8 Hagelaar G J M. Coulomb collisions in the Boltzmann equation for electrons in low-temperature gas discharge plasmas[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2016, **25**(1): 015015. DOI: 10.1088/0963-0252/25/1/015015
- 9 Li C Y, Qu Y Z, Wang J G. State-selective radiative recombination cross sections of argon ions[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2012, **113**(15): 1920–1927. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.05.005