



·高功率微波技术·

放射性物质¹³⁷Cs 对微波大气击穿特性的影响^{*}

陈志国^{1,2}, 闫二艳^{2,3}, 刘星辰^{1,2}, 孟凡宝², 黄诺慈^{1,2}, 杨浩^{1,2}, 鲍向阳²

(1. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
3. 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对现有的放射性物质探测手段有效距离近和效率较低等局限性, 考虑到高功率微波 (HPM) 良好的空间辐射特性, 研究放射性物质对微波大气击穿特性的影响, 以实现利用 HPM 远距离探测放射性物质的设想。阐释了微波脉冲等离子体击穿原理和自由电子对击穿特性影响, 分析了放射性物质¹³⁷Cs 射线产生自由电子的过程, 在此基础上分析了 HPM 大气击穿时间和击穿阈值。基于 HPM 大气击穿等离子体实验装置, 分别在 6000 Pa、7000 Pa 和 8000 Pa 的低气压环境对有、无放射源存在情形开展多次 HPM 辐照实验。实验结果表明: 放射源的存在降低了约 10% 的 HPM 大气击穿阈值, 缩短约 50% 的击穿时间。

关键词: 放射性物质; 高功率微波; 击穿阈值电场; 击穿时间

中图分类号: O451

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220100

Effect of radioactive material ¹³⁷Cs on microwave breakdown characteristics

Chen Zhiguo^{1,2}, Yan Eryan^{2,3}, Liu Xingchen^{1,2}, Meng Fanbao², Huang Nuoci^{1,2}, Yang Hao^{1,2}, Bao Xiangyang²

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Mianyang 621900, China)

Abstract: In view of the limitations such as close effective distance and low efficiency of the existing radioactive source detection methods, high-power microwave (HPM) is used to detect radioactive materials over a long distance because of its good spatial radiation characteristics. In this paper, the principle of microwave pulsed plasma breakdown and the influence of free electrons on breakdown characteristics are explained, the process of free electrons generated by the decay of radioactive source ¹³⁷Cs is analyzed, and the HPM breakdown time and breakdown threshold are presented. Based on the HPM atmospheric breakdown plasma experimental apparatus, HPM irradiation experiments were performed multiple times in the low-pressure environment of 6000 Pa, 7000 Pa and 8000 Pa with presence and absence of radioactive sources. Experimental results show that the presence of a radioactive source lowers the HPM breakdown threshold by approximately 10% and can reduce the breakdown time by approximately 50%.

Key words: radioactive substance, high-power microwave, breakdown electric field threshold, breakdown time

放射性物质在农业、工业、医疗以及科研等领域有广泛重要的应用,但其同时又具有极高的危险性,所以对隐藏的放射性物质进行探测极其必要。目前,对放射性物质的探测有一些比较成熟的装置,但多是依赖设备直接探测射线与闪烁体相互作用后的光信号,因此有探测距离较近和效率较低的局限性^[1-4]。近年来,国外研究人员提出了几种远距离探测的方式:美国海军研究实验室的 P. Sprangle 等人在 2013 年提出利用高强度激光束探测放射性物质附近的电磁特征;2015 年,马里兰大学的 G. S. Nusinovich 等人研究了利用聚焦强太赫兹辐射远程探测放射性物质;2016 年,韩国蔚山学院团队的 Dongsung Kim 等人提出利用高功率脉冲电磁辐射远程探测放射源^[5-7]。其中,采用激光或太赫兹法,受天气和空间传输影响较大。相较而言,依据 HPM 大气击穿阈值和击穿时间来判断放射性物

* 收稿日期:2022-05-16; 修订日期:2022-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(62001442);四川省重要技术标准研究项目(ZYBZ2021-29)

联系方式:陈志国, iamczg@qq.com。

通信作者:闫二艳, yaneryan_2002@163.com。

质的存在与否,受传输通道影响较小。具体而言,在距离辐射源一定范围内的自由电子产生速度远超过在自然背景下。在 HPM 脉冲期间,这些电子就可以作为种子电子引发击穿,并在焦点区域产生密集的等离子体^[8],从而辐射源对等离子体击穿特性的改变可以作为检测隐藏的放射性材料的明确效应。本文基于 HPM 大气等离子体实验装置,在低气压环境对有、无放射性物质存在情形分别做多次 HPM 辐照实验,对比有无放射性物质时的击穿阈值和击穿时间,得出放射性物质对等离子体击穿阈值和击穿时间的影响。

1 微波脉冲大气击穿的基本原理

HPM 大气传输过程中,空间自由电子在强电场的作用下获得高能量并加速运动,然后碰撞大气中的中性粒子,电离出新的电子,而新电子在强电场的作用下重复这一过程,这个链式过程即为“雪崩电离”。除此以外,诸如附着效应、复合反应和扩散效应等过程会消耗大气中的自由电子。通常情况下,在 HPM 脉冲作用阶段,电离率远大于其它损失项,故能在短时间内发生击穿形成等离子体^[9-11]。研究重复频率 HPM 脉冲大气击穿特性,既要分析脉冲作用时的电子数密度的增长,也要考虑相邻两个脉冲间隔时间内的损耗。脉冲间隔内,由于没有电场的作用,自由电子数密度将不再增加,此时必须考虑在脉冲作用时可以忽略的各损失项。两个脉冲的间隔时间一般远大于脉宽,该阶段电子的弛豫过程直接影响到下一个脉冲作用时的初始电子数密度,进而影响到后续脉冲的传输和电离过程^[12]。

重复频率 HPM 作用下的电子数密度演化方程可以写为如下形式

$$\frac{\partial n}{\partial t} = an + bn^2 \quad (1)$$

式中: $a = \nu_i - \nu_a - D/\Lambda^2$, $b = -k$, ν_i 为电离频率, ν_a 为电子粘附频率, D/Λ^2 为因扩散导致电子数密度减小的速率, k 为复合系数,即所有和电子数密度一次方成正比的项的系数合并为 a , 电子数密度平方项前的系数都合并为 b ^[13]。脉冲辐照阶段的电子数密度

$$n = n_0 \exp(at), \quad mT < t < mT + \tau \quad (2)$$

式中: n_0 为辐照开始时刻的电子数密度, τ 为单脉冲作用时间(脉宽), T 为脉冲周期, $m=0,1,2,3\cdots$ 。脉冲间隔阶段

$$n = n_1 \exp(a't), \quad mT + \tau < t < (m+1)T \quad (3)$$

式中: $a' = -\nu_a' - D'/\Lambda^2$, n_1 为辐照结束时刻的电子数密度。要发生重复频率 HPM 大气击穿,在单个脉冲不足以导致击穿时,必须保证下一个脉冲前沿时刻的电子密度大于前一个脉冲前沿时刻的电子密度,这样经过多个脉冲作用后,电子密度才能逐渐增加到一定的值,最终致使大气发生击穿现象^[14],则

$$\frac{n_1 e^{a(T-\tau)}}{1 + (b/a)n_1 [1 - e^{a(T-\tau)}]} > n_0 \quad (4)$$

式中: 不等号左侧为根据(1)式解得的下次脉冲辐照前的电子数密度, $(T-\tau)$ 即两个脉冲间隔时间。

击穿阈值

$$E_{cr} = 30 \sqrt{\left(\frac{p}{133}\right)^2 + 1.4f^2} \left[1 + \frac{\ln(n_e/n_0)}{451p\tau}\right]^{\frac{3}{16}} \quad (5)$$

击穿时间

$$t = \frac{\ln(n_e/n_0)}{7.9 \times 10^{-14} p \left[E / \sqrt{(p/133)^2 + 1.4f^2} \right]^{\frac{16}{3}} - 451p} \quad (6)$$

其中, n_e 为击穿时的电子数密度, n_0 为初始电子数密度,微波频率 f 单位 GHz, 气压 p 单位为 Pa。

2 理论分析

HPM 在大气中传输时,强电场引起气体内的自由电子加速到能够电离它们碰撞到的中性分子,并构成链式反应,电场强度超过本底气体局部的击穿阈值电场时会产生等离子体击穿现象^[15]。故微波辐照时的初始自由电子对 HPM 击穿特性有着至关重要的影响,而放射性物质能显著改变周围的电子数密度,所以研究其影响 HPM 击穿阈值和击穿时间问题,必须着重分析初始自由电子密度。

对于没有放射源存在的情形,由于氧气的电负性,地面附近的电子数密度 n_0 远远小于大气中的离子数密度(10^9 m^{-3}),通常可以认为 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-3}$ 。

分析周围存在放射源情形时的自由电子数密度,对于放射源¹³⁷Cs,衰变方程为



衰变过程中发射能量为 0.662 MeV 的 γ 射线,辐射的光子能量在康普顿散射占主导地位的 30 keV 到 1.3 MeV 能量范围内,可以应用 Klein-Nishina (K-N) 理论描述电子对光子的康普顿散射。在入射光子和 O_2 或 N_2 分子中束缚的电子发生碰撞之后,被束缚的电子变成自由电子,即康普顿散射产生的初级电子,其产生率为

$$q = 2Z_{\text{air}}Nc\sigma_{\text{KN}} \quad (8)$$

式中: $N = 2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 是空气分子密度, Z_{air} 是平均空气原子序数(对于标准空气成分, $Z_{\text{air}} \approx 7.21$), σ_{KN} 为康普顿微分散射截面^[16]。当光子能量为 0.662 MeV 时,单个电子的 K-N 微分散射截面 σ_{KN} 最大值约为 $1.6 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ ^[17]。由式(8)求得此时 $q = 1.9 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。代入电子数密度公式

$$n = \frac{q}{9 \times 10^{-32} N^2} \quad (9)$$

求得 $n'_0 = 2.8 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ 。此为仅考虑 γ 射线电离产生的初级电子后求得的有放射源时的电子数密度,故实际数值会大于该理论值。

无放射源时击穿一般定义为: $n_e/n_0 = 10^8$,则在放射源改变初始电子数密度的作用下: $n_e/n'_0 \approx 350$ 。将与实验相同的微波参数代入式(5),得到了有、无放射源时的理论击穿阈值电场如图 1。计算结果表明:在 6000~8000 Pa 气压范围内,有放射源¹³⁷Cs 时的理论击穿阈值降低幅度为 5%~8%。由式(6)可求得场强 1560 V/cm 时,放射源可将击穿时间缩短约 50%。

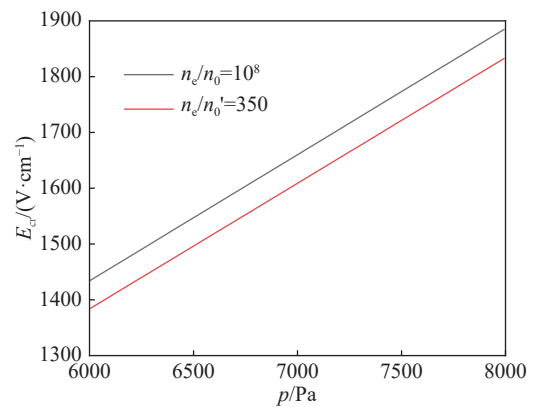
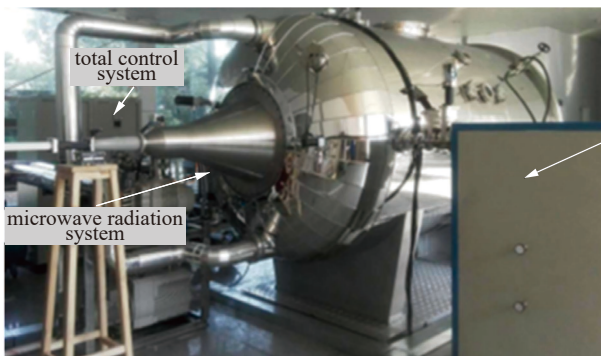


Fig. 1 Breakdown threshold field strength

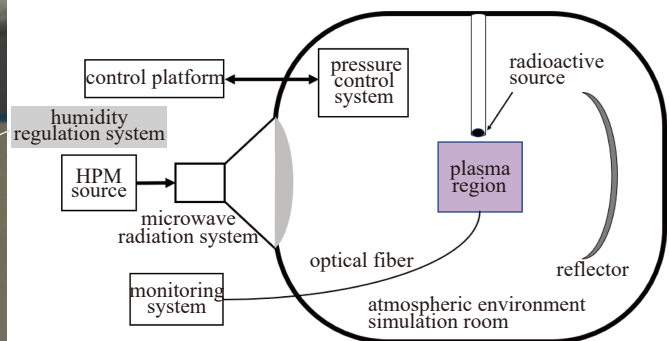
图 1 击穿阈值场强理论值

3 实验研究

在实验室条件下,对放射性物质¹³⁷Cs影响 HPM 大气击穿进行实验研究。实验平台主要由大气环境模拟室、S 波段微波辐照系统和等离子体发光监测系统组成,如图 2 所示。大气环境模拟室为尾部可打开的封闭柱形腔体,附带真空、温度、湿度调节系统。微波辐照系统由 S 波段大功率脉冲微波源和多模圆口径喇叭天线组成,微波源与天线之间通过矩圆转换波导连接。实验时为增强辐射场强,在腔室中加入可拆卸椭圆反射聚焦面,辐射天线位于椭圆的左焦点处,微波主波束经反射面反射后汇聚在右焦点,在焦点区域产生相较于边缘区极强的电场。



(a) main experimental apparatus



(b) experimental platform schematic

Fig. 2 Experimental platform

图 2 实验平台

HPM 的具体参数设置为频率 2.92 GHz、输出脉宽为 20 μs 、重复频率 20 Hz,辐照时间 60 s。置于介质管一端的放射源是活度为 0.35 mCi 的¹³⁷Cs,放置在距离等离子体产生中心区域约 10 cm 的位置。因为已有的研究表明:气压越高,本底自由电子对击穿特性影响越大^[7],所以结合本实验平台实际情况,选择在 6000 Pa、7000 Pa 和 8000 Pa

的气压条件下开展有无放射源的 HPM 大气击穿实验研究。因为监测发光是在能基本保证准确度的前提下判断 HPM 大气击穿最方便有效的方式,所以实验中根据强场区域是否发生等离子体发光现象判断击穿与否,在 HPM 辐照时间内产生等离子体发光现象即成功击穿,反之则没有击穿。按照以上实验设置,在相同的气压、湿度、场强等条件下,分别在有、无放射源时进行多次实验,记录下是否击穿以及击穿情况下的击穿时间。改变气压和 HPM 输出功率,重复上述过程。

4 实验结果与分析

4.1 击穿阈值

按上述方案进行实验,分别统计在同一气压下,施加不同大小的场强,有、无放射源时的击穿概率,绘制出图 3 所示的对比图,反映 60 s 内的 HPM 辐照下的击穿概率随场强的变化趋势。因为实验条件下 HPM 大气击穿存在一定的概率问题,所以通过比较有、无放射源时相同电场下的击穿概率以及产生相同击穿概率的场强大小来研究放射源对击穿阈值电场的影响。图 3(a)中,6000 Pa 时,无放射源环境下,场强增加到 1190 V/cm 时击穿概率为 23%,相同条件有放射源时击穿概率已经达到 100%,而无放射源时,直到场强 1810 V/cm,击穿概率才达到 100%。图 3 表明,在其他条件相同情况下,有放射源时的击穿概率较高,即放射源降低了击穿阈值,在 6000 Pa 和 7000 Pa 时,有放射源时能造成大致相同击穿概率的场强比没有放射源时低 10%~30%;8000 Pa 时,降低幅度约 10%。阈值电场降低的主要原因是放射性物质导致电子数增多,负电荷由于二体和三体粘附作用积累在氧负离子中,微波辐照时通过离脱作用进一步加速了更多自由电子的产生;同时,由于种子自由电子数增加,有更多电子从电场中碰撞吸收更多能量,促进了雪崩电离的快速形成。

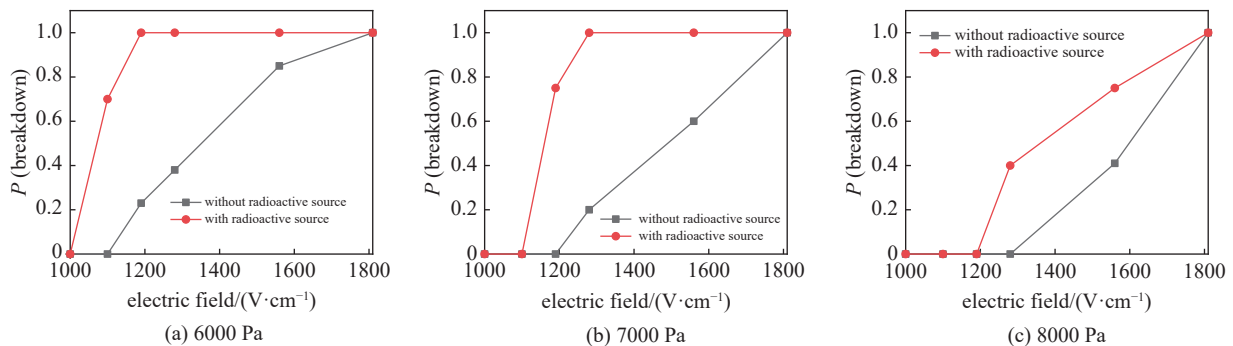


Fig. 3 Comparison of breakdown probabilities varying with field strength within 60s

图 3 60 s 内击穿概率随场强变化对比

4.2 击穿时间

研究放射性物质¹³⁷Cs对击穿时间的影响,统计 1560 V/cm 场强下实验的击穿时间,绘成图 4 所示的分布直方图及图 5 的击穿概率随辐照时间变化图。将相同条件下有放射源时的击穿时间和无放射源时比较,显而易见的是,在没有放射源时击穿时间较为均匀地分布在各个时间段;而有放射源时击穿时间显著缩短,主要分布在 0~40 s 内。分别计算各实验条件下的击穿时间平均值,在气压 6000 Pa、7000 Pa 和 8000 Pa 时,放射源使得击穿时间平均值分别减小了约 60%、50% 和 40%。实验结果与理论值相近。击穿时间显著缩短主要是因为放射源环境中较高的自由电子数密度大大减小了雪崩击穿所需的种子电子的形成时间,因此导致实验测得的 HPM 辐照时间缩短。

5 结论

本文针对放射源影响 HPM 击穿特性问题分别做了理论分析和实验研究。研究发现:在 6000~8000 Pa 气压条件下,初始自由电子数密度会影响 HPM 大气击穿阈值电场,当电子数密度增加 5 个量级,阈值降低幅度基本在 10% 左右,击穿时间平均值减小约 50%。实验结果还表明:一个辐射微弱的放射源就可以在在一定程度上增大相同条件下的 HPM 大气击穿概率,即降低产生击穿所需的阈值电场;同时,放射源可以大幅缩短发生击穿所需的微波辐照时间,在气压 6000 Pa、7000 Pa 和 8000 Pa 时,放射性物质使得击穿时间平均值分别减小了约 60%、50% 和 40%。所以,利用放射性物质辐射特性对 HPM 大气击穿阈值和击穿时间的影响,理论上可以实现判断辐照范围内是否有放射性物质存在,这验证了利用 HPM 来探测隐藏的放射性物质的构想,但具体的探测能力和探测精度还需要进一步开展工作研究。

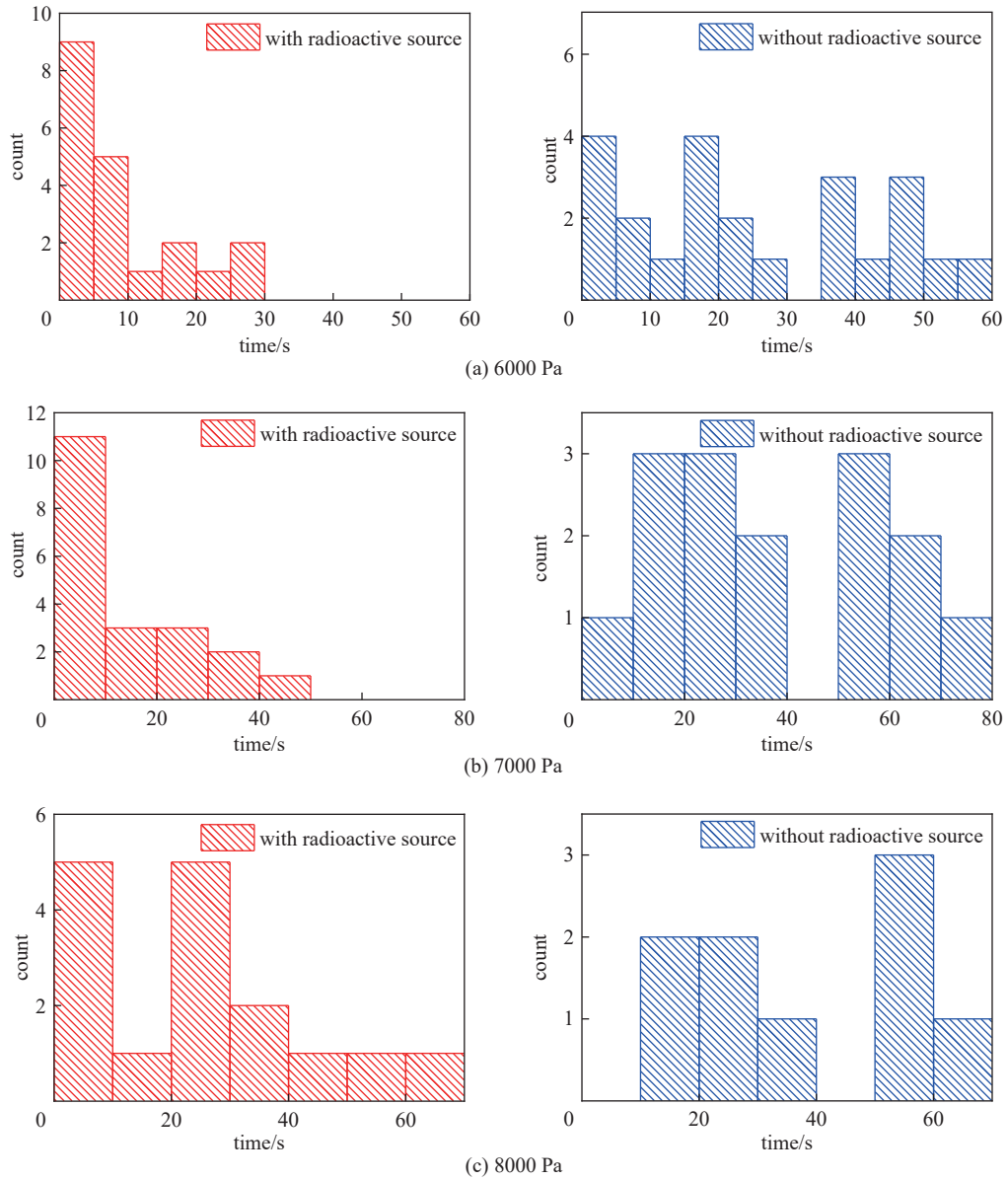


Fig. 4 Breakdown time distribution at 1560 V/cm

图4 场强 1560 V/cm 时, 击穿时间分布图

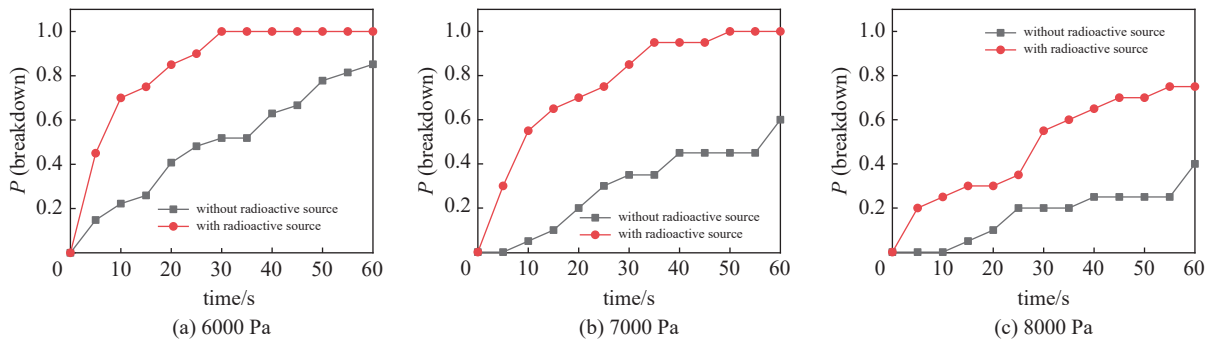


Fig. 5 Breakdown probability versus irradiation time at 1560 V/cm

图5 场强为 1560 V/cm, 击穿概率随辐照时间变化对比图

参考文献:

- [1] 王百荣, 田新, 杨忠平. 非法运输放射性物质的探查[J]. 辐射防护, 2005, 25(6): 376-379. (Wang Bairong, Tian Xin, Yang Zhongping. Detection of illicit trafficking of radioactive materials[J]. Radiation Protection, 2005, 25(6): 376-379)
- [2] 杨敏, 党瑞荣, 刘彤, 等. 放射性探测器发展分析以及应用介绍[J]. 石油仪器, 2009, 23(5): 44-45. (Yang Min, Dang Ruihong, Liu Tong, et al. Development

- analysis and application of radioactivity detectors[J]. *Petroleum Instruments*, 2009, 23(5): 44-45)
- [3] 张玉敏. 国外放射性探测装备和技术的发展现状与趋势[J]. *舰船防化*, 2009(1): 1-5. (Zhang Yumin. Development of overseas radioactive detecting technology[J]. *Chemical Defence on Ships*, 2009(1): 1-5)
- [4] 李惠彬, 冯元举, 韩斌. 航空放射性测量技术对核事故泄露核素的探测能力评估[C]//第十六届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集(下册). 绵阳: 中国电子学会核电子学与核探测技术分会, 2012: 429-433. (Li Huibin, Feng Yuanju, Han Bin. Evaluation of the detection capability of aeronautical radiometric technology on nuclear accident leaked nuclides[C]//The 16th National Annual Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology. Mianyang: Branch of Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology, China Electronics Society, 2012: 429-433)
- [5] Sprangle P, Hafizi B, Milchberg H, et al. Active remote detection of radioactivity based on electromagnetic signatures[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 013103.
- [6] Nusinovich G S. Remote detection of concealed radioactive materials by using focused powerful terahertz radiation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, 37(6): 515-535.
- [7] Kim D, Yu D, Sawant A, et al. Remote detection of radioactive material using high-power pulsed electromagnetic radiation[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15394.
- [8] 周前红, 孙会芳, 董志伟, 等. 微波大气击穿阈值的理论研究[J]. *物理学报*, 2015, 64: 175202. (Zhou Qianhong, Sun Huifang, Dong Zhiwei, et al. Theoretical study on the microwave air breakdown threshold[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64: 175202)
- [9] 闫二艳, 邱风, 孟凡宝, 等. HPM大气击穿特性初步研究[C]//第十届全国高功率微波学术研讨会论文集. 2015: 319-322. (Yan Eryan, Qiu Feng, Meng Fanbao, et al. Preliminary study on atmospheric breakdown characteristics of HPM[C]//Proceedings of the 10th National Symposium on HPM. 2015: 319-322)
- [10] 曹金坤, 周东方, 牛忠霞, 等. 重复频率高功率微波脉冲的大气击穿[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(1): 115-118. (Cao Jinkun, Zhou Dongfang, Niu Zhongxia, et al. Air breakdown by repetition-rate high power microwave pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(1): 115-118)
- [11] 朱连燕. 重复频率高功率微波脉冲大气击穿的理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 5-14. (Zhu Lianyan. The orical studies of air breakdown by repetition-rate high power microwave pulse[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014: 5-14)
- [12] 蔡北兵, 余道杰, 周东方, 等. 氧负离子解吸附过程HPM大气击穿弛豫时间分析[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 113004. (Cai Beibing, Yu Daojie, Zhou Dongfang, et al. Analysis of air breakdown relaxation time of high power microwave based on O^- detachment[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2017, 29: 113004)
- [13] 赵刚, 闫二艳, 陈朝阳, 等. 高功率微波大气击穿阈值分析及实验[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(s1): 111-114. (Zhao Gang, Yan Eryan, Chen Chaoyang, et al. Analysis and experimental study on threshold of air breakdown by high power microwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(s1): 111-114)
- [14] 胡涛, 周东方, 李庆荣, 等. 电子弛豫过程对重复频率高功率微波大气击穿的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(4): 545-549. (Hu Tao, Zhou Dongfang, Li Qingrong, et al. The effect of electronic relaxation process on air breakdown caused by repetition frequency HPM[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(4): 545-549)
- [15] Yu Daojie, Chai Mengjuan, Zhou Dongfang, et al. Research on dielectric focusing lens antenna for HPM atmospheric breakdown experiments[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2019, 28(1): 202-206.
- [16] Dimant Y S, Nusinovich G S, Sprangle P, et al. Propagation of gamma rays and production of free electrons in air[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112: 083303.
- [17] 欧阳建明. 高空核爆炸背景下大气的电离过程及其影响研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 37-41. (Ouyang Jianming. The research on ionization processes and ionization effects of atmosphere by high-altitude nuclear explosions[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 37-41)