



·复杂电磁环境中的等离子体过程·

## 微波脉冲大气击穿临界场强估计\*

杨 浩<sup>1</sup>, 黄诺慈<sup>1</sup>, 刘星辰<sup>1</sup>, 郑强林<sup>1</sup>, 鲍向阳<sup>1</sup>, 闫二艳<sup>1,2</sup>

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

**摘 要:** 针对高功率微波在大气传输中可能出现的击穿现象, 研究了脉冲序列中首次击穿时的延迟脉冲数, 发现其与种子电子、脉冲击穿概率以及微波场强密切相关。研究发现, 微波场强可通过作用于种子电子间接影响脉冲击穿概率和延迟脉冲数, 由此提出利用延迟脉冲数估计微波击穿临界场强的方法, 并定义在脉冲击穿概率大于一定值时的微波临界场强作为击穿阈值。推导了脉冲击穿概率的估计公式, 并对估计量的性能进行了分析, 随后利用 S 波段微波大气击穿模拟装置开展了实验验证。实验结果表明, 在一定范围内, 重复频率微波脉冲击穿延迟脉冲数仅与种子电子产生率和脉宽成反比, 能用于估计脉冲击穿概率, 进而给出击穿临界场强。

**关键词:** 微波击穿; 临界场强; 击穿概率; 估计; 延迟脉冲

中图分类号: O531

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230248

## Critical field strength estimation for microwave pulse atmospheric breakdown

Yang Hao<sup>1</sup>, Huang Nuoci<sup>1</sup>, Liu Xingchen<sup>1</sup>, Zheng Qianglin<sup>1</sup>, Bao Xiangyang<sup>1</sup>, Yan Eryan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

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

**Abstract:** In response to the possible breakdown phenomenon of high-power microwave in atmospheric transmission, our study focuses on the first breakdown delay pulse number in pulse sequences. It is found that it is closely related to seed electrons, pulse breakdown probability, and microwave field strength. Microwave field strength can indirectly affect the pulse breakdown probability and delay pulse number through seed electrons. A method is proposed to estimate the critical field strength of microwave breakdown using the number of delayed pulses, and the microwave critical field strength is defined as the breakdown threshold when the probability of pulse breakdown is greater than a certain value. In this paper, the estimation formula of pulse impulse breakdown probability is derived, and the performance of the estimator is analyzed. Then, the experimental verification is carried out using the S band microwave atmospheric breakdown simulation device. The experimental results show that, within a certain range, the number of pulse delays for repetitive frequency microwave pulse breakdown is only inversely proportional to the seed electron generation rate and pulse width, and can be used to estimate the probability of pulse breakdown, thereby giving the critical field strength for breakdown.

**Key words:** microwave breakdown, critical field strength, breakdown probability, estimate, pulse breakdown

高功率微波 (HPM) 具有短脉宽、高重频、高峰值功率的特点<sup>[1-4]</sup>, 在传输应用过程中, 存在的大气击穿问题被广泛研究与关注。通过分析 HPM 与一定高度大气相互作用规律、击穿阈值、击穿延迟等, 可以有效避免 HPM 大气击穿或利用击穿形成人造电离层等<sup>[5-9]</sup>。受大气中种子电子的影响, 对于重复频率微波脉冲而言, 击穿往往并不发生在第一个脉冲, 也有可能脉冲序列结束仍未发生击穿, 由此引起的击穿延迟具有较大的不确定性, 击穿阈值的概念也变得模糊。这与长脉冲或者连续波情形下存在较大差异, 在长脉冲或连续波条件下, 击穿与否是一个确定结

\* 收稿日期: 2023-08-01; 修订日期: 2023-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62001442)

联系方式: 杨 浩, mushui9@qq.com。

通信作者: 闫二艳, yaneryan\_2002@163.com。

果:当场强超过阈值时必然击穿,反之则不能击穿。对于重频脉冲,击穿阈值与脉冲数或时间耦合在一起。因此,研究微波大气击穿延迟脉冲特性,准确定义击穿临界场强,对消除击穿延迟的不确定性、有效利用 HPM 能量具有重要的现实意义。本文从脉冲击穿概率与击穿延迟脉冲数出发,建立了脉冲击穿临界场强估计模型,并依托准光学反射聚集微波大气等离子体实验装置,模拟开放空间中的微波脉冲大气击穿现象进行实验验证,结果表明该模型可有效分析微波脉冲大气击穿阈值。

## 1 击穿延迟脉冲数

强微波场可以加速气体内的种子电子到足够能量电离碰撞到的中性分子,碰撞新产生的电子可能被再次加速去电离别的中性分子,当区域内电子产生速度大于电子损失速度时就会构成链式反应的雪崩击穿。

种子电子的产生是一个概率性过程,若采用平均种子电子产生率模型<sup>[10]</sup>,到时间  $t$  为止至少存在一个种子电子的概率为

$$P_w(n \neq 0, t) = 1 - \exp(-St) \quad (1)$$

式中:  $S$  为种子电子产生率,  $n$  为电子数密度。

在产生种子电子后,击穿过程进入雪崩增长阶段,电子密度急剧上升。在雪崩增长末期,气体击穿形成等离子体并伴随发光现象。电子雪崩增长基本是一个确定性过程,但根据电离率的不同,雪崩击穿时间依然存在一定的抖动性。在电离率相对较高即脉宽相对于电子雪崩时间较大时,击穿延时概率分布近似为等待时间概率分布,脉冲击穿概率近似为

$$p \approx P_w(\tau_p) = 1 - \exp(-S\tau_p) \quad (2)$$

式中:  $\tau_p$  为脉冲宽度。

在重复频率条件下,击穿可能会出现累积效应,脉冲间隔期间的自由弛豫过程使得脉冲开始时的背景环境可能存在差异,导致脉冲击穿概率发生变化。由于微波击穿非常依赖种子电子,通常一旦击穿后续脉冲均能击穿,只在电离率极低时会出现偏离,在种子电子出现之前的脉冲均可认为背景环境相同,独立同分布。

因此在第  $J$  个脉冲首次击穿的累积概率分布

$$P(J) = \sum_{j=1}^J (1-p)^{j-1} p = 1 - (1-p)^J \quad (3)$$

击穿延迟脉冲数的期望为  $1/p$ , 依赖于单脉冲的击穿概率,与重频无关。假如  $J$  是连续的,可以求得其期望为  $1/[-\ln(1-p)]$ , 在  $p$  较小时,两者无限趋近,故可近似给出  $J$  的期望为

$$E(J) = 1/p \approx -1/\ln(1-p) \approx 1/(S\tau_p) \quad (4)$$

从式(4)可知,击穿延迟脉冲数期望值仅与脉宽和种子电子产生率成反比,而不涉及到重频、电离率等其他因素。脉冲击穿概率取值范围为  $0 \sim 1$ , 由种子电子产生率和脉宽共同决定,一般重复频率条件下脉宽均相同,仅依赖于种子电子产生率。通常情况下,大气中的种子电子极少,等待种子电子产生的时间较长,可通过外部预电离的方式提供种子电子,提高脉冲击穿概率,如放置放射源、紫外灯等。另外微波电场作用下可以通过解吸附等方式产生种子电子,种子电子产生率受电场强度影响,呈正相关。因此,微波场强可通过种子电子间接影响脉冲击穿概率和延迟脉冲数。

## 2 击穿临界场强

通常意义上的微波击穿阈值,指的是能引起自由电子雪崩增长的电场强度。在微波持续足够长时间下必然会引起击穿。但对于持续时间有限的微波或脉冲串,在微波持续期间,受种子电子条件的影响,击穿与否成为一个概率问题,击穿阈值与击穿延时耦合在一起,难以清晰获得。相同场强下,每次击穿所需的脉冲数可能不一致,而固定脉冲数下大气击穿所需要的最低场强是不清晰的。为消除击穿延时的影响,对于重复频率微波脉冲,本文定义在脉冲击穿概率大于一定值时的微波场强作为击穿临界场强,给定微波脉宽  $\tau$ , 概率值  $\alpha$ , 脉冲击穿概率  $p > \alpha$  时的微波场强  $E_{cr}$  为脉冲击穿临界场强,可表示为

$$E_{cr}(\tau, \alpha) = E|_{p(E) > \alpha} \quad (5)$$

式中:  $1/\alpha$  即为该脉冲序列击穿所需要的期望脉冲数。

获取脉冲击穿临界场强主要需得到对应场强下的脉冲击穿概率, 可通过实验获取击穿延迟脉冲数进行估计。

对脉冲击穿概率的估计, 可转换成以下数学问题。在  $m$  次实验中, 每次发射  $N$  个脉冲, 每个脉冲的击穿概率为  $p$ , 其中  $k$  次实验在第  $n_i$  个脉冲击穿, 其余未击穿, 求  $p$  的估计量。使用最大似然估计的方法进行求解, 观察到的数据概率为

$$P(\mathbf{n}; p) = \prod_{i=1}^k (1-p)^{n_i-1} p \prod_{i=1}^{m-k} (1-p)^N \quad (6)$$

进而得到估计量为

$$\hat{p} = \frac{k}{k\bar{n} + (m-k)N} \quad (7)$$

式中:  $\bar{n}$  为平均击穿延迟脉冲数。

从信息量的角度对估计效果进行分析, 计算得到估计值的费舍尔信息<sup>[11]</sup> 为

$$I(p) = \frac{m}{(1-p)p^2} \left( \frac{k}{m} + \frac{m-k}{m} \frac{Np^2}{1-p} \right) \quad (8)$$

费舍尔信息越大, 估计值方差越小。显然, 数据量  $m$  越大、脉冲总数  $N$  越大, 估计值越准确。假如  $m$  次实验全部击穿 ( $k=m$ ), 估计量为击穿延迟脉冲数均值的倒数, 观测数据概率分布满足正则条件, 可以直接得到估计量的标准差为

$$\sigma(\hat{p}) = \sqrt{1/I(p)} = p \sqrt{\frac{1-p}{m}} \quad (9)$$

标准差是关于真值的函数, 在  $p$  趋于 0 和 1 时最小, 但式(4)中击穿概率与脉宽的近似线性关系要求  $p$  较小, 因此脉宽应足够小使得  $p < 0.1$  较合适, 首脉冲即击穿 ( $n=1$ ) 的数据估计值是不准的。同时可以对数据量进行估算, 假如标准差取 0.2 倍真值, 需要的数据量约为 25。

对于未击穿的实验, 同样包含信息量, 但对费舍尔信息的贡献较小。假如全部未击穿 ( $k=0$ ), 费舍尔信息变为  $mN/(1-p)^2$ ,  $p$  越小其值越小, 估计结果准确性越低, 此时提高脉冲总数  $N$  是更有效的方法。因此击穿实验次数  $k$  也不能太少, 这就要求脉宽也不能太小, 一般可使  $p=1/N$  较为合适。存在未击穿情况下 ( $k < m$ ) 时, 仍然是击穿数据对费舍尔信息贡献较大, 击穿次数  $k$  越大估计结果准确性越高。

### 3 实验验证

下面对该估计方法开展实验验证, 实验装置可参考文献 [12], 采用 S 波段大功率微波源输出, 通过准光学反射聚焦系统在柱形真空腔室内形成强微波辐射场, 超过大气击穿阈值后击穿形成等离子体。放电约束在中心区域, 可近似为开放空间, 使用光电倍增管采集等离子体发光信号获取击穿延迟脉冲数。通过调节微波场强、重频、脉宽、气压及放置 Cs-137 放射源等改变实验条件, 同一条件下进行 20 次重复实验, 每次实验发射脉冲数 200 个, 统计实验过程中的击穿延迟脉冲数。实验条件及结果如表 1 所示, 其中  $\hat{p}$  为计算的估计量。

通过调节放射源远近改变种子电子产生率。实验结果显示: 种子电子产生率越高, 脉冲击穿概率越大; 同时场强也能改变种子电子产生率大小, 场强越高, 种子电子产生率越大, 脉冲击穿概率越大; 在 5、50、500 Hz 重频实验条件下, 重频大小对脉冲击穿概率基本无影响, 如图 1 所示, 不同重频下均需达到一定脉冲数才能击穿, 与式(4)相符。在 20、200、2000、20000 ns 脉宽实验条件下, 20 ns 需较长时间放电, 击穿所需脉冲数远超过 200 个脉冲。脉宽为 20000 ns 时, 在首脉冲即放电。脉宽为 200 ns 及 2000 ns 时的击穿情况如图 2 所示, 由此可以看出, 击穿延迟脉冲数受脉宽影响较大, 脉宽越长, 越容易击穿, 脉冲击穿概率越大, 且实验中拟合的脉冲击穿概率与脉宽成线性关系, 与式 4 相符。

综合而言, 击穿概率估计量的真值应满足  $1/N < p < 0.1$ , 击穿数据量越多击穿概率估计值越准确, 按此标准对实验数据进行整理, 只有表 1 中的  $A_2$ 、 $B_1$ 、 $C_2$ 、 $D_3$  实验数据是符合的, 因此可以得出: 在气压 300 Pa, 脉宽 2000 ns 条件下, 脉冲击穿概率大于 0.0056 的临界击穿场强为 0.92 kV/cm, 平均击穿延迟脉冲数约为 179 个。

实验结果可以验证, 根据脉冲击穿临界场强估计模型, 在给定背景环境条件下, 固定脉宽  $\tau$ , 定义显著概率水

表 1 实验条件及结果  
Table 1 Results of experiments

No.	pressure/ Pa	electric intensity/ (kV/cm)	radioactive source distance	repetitive frequency/Hz	pulse width/ns	$p$	$k$	$\bar{n}$	$\hat{p}$
A <sub>1</sub>	8000	1.87	far	20	20000	0.006	13	73.1	0.0055
A <sub>2</sub>	8000	1.87	near	20	20000	0.03	20	33.4	0.030
B <sub>1</sub>	1000	0.92	none	20	20000	0.04	20	27.7	0.036
B <sub>2</sub>	1000	1.29	none	20	20000	0.5	20	2.3	0.43
C <sub>1</sub>	300	0.92	none	5	2000	0.005	13	102.5	0.0048
C <sub>2</sub>	300	0.92	none	50	2000	0.005	14	92.7	0.0056
C <sub>3</sub>	300	0.92	none	500	2000	0.005	12	78.6	0.0047
D <sub>1</sub>	300	1.29	none	50	20	0	0	0	0
D <sub>2</sub>	300	1.29	none	50	200	0.003	11	113.2	0.0036
D <sub>3</sub>	300	1.29	none	50	2000	0.03	20	35.3	0.028
D <sub>4</sub>	300	1.29	none	50	20000	1	20	1	1

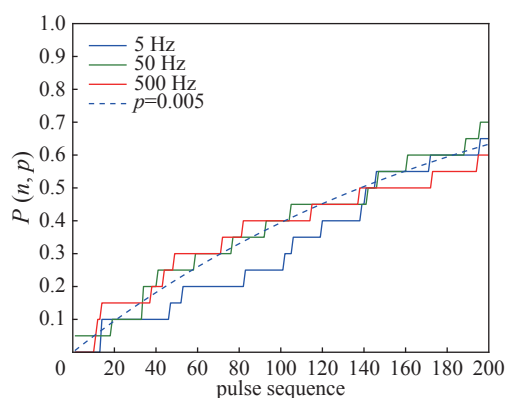


Fig. 1 Cumulative probability density function of microwave pulse breakdown under different repetitive frequency

图 1 不同重频条件下的脉冲击穿累积概率密度分布

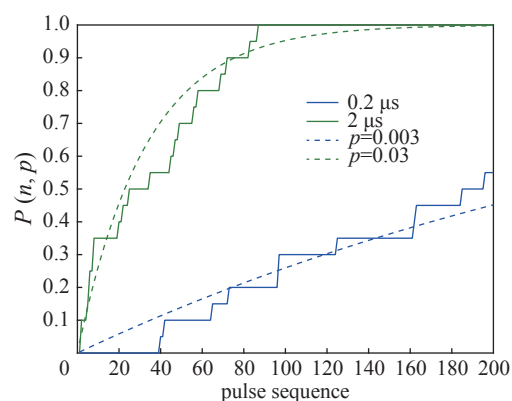


Fig. 2 Cumulative probability density function of microwave pulse breakdown under different pulse width

图 2 不同脉宽条件下的脉冲击穿累积概率密度分布

平  $\alpha$ , 针对不同微波场强  $E$  开展系列实验得到对应的脉冲击穿概率估计值  $p$ , 当  $p=\alpha$  时, 即得到该条件下的脉冲击穿临界场强  $E_{cr}$ 。

## 4 结论

本文推导了击穿延迟脉冲数的期望公式, 定义了脉冲击穿临界场强, 并依托准光学反射聚集微波大气等离子体实验装置开展多轮实验, 得到了击穿延迟脉冲数累积概率密度分布。用最大似然估计方法给出了脉冲击穿概率估计量, 提供了一种测量估计微波脉冲击穿临界场强的方法, 结合实验指出估计量的适用范围应满足  $1/N < p < 0.1$ 。实验结果表明, 在一定范围内, 重复频率微波脉冲击穿延迟脉冲数仅与种子电子产生率和脉宽成反比, 与其他因素无关, 这侧面反映出种子电子在放电过程中的启动作用。

## 参考文献:

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. 高功率微波源与技术[M]. 刘国治, 周传明, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005: 154-158. (Barker R J, Schamiloglu E. High power microwave source and technology[M]. Liu Guozhi, Zhou Chuanming, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 154-158)
- [2] 杨浩, 闫二艳, 郑强林, 等. 临近空间高功率微波辐照放电试验技术[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 103216. (Yang Hao, Yan Eryan, Zheng Qianglin, et al. Examination research of high power microwave irradiation discharge in near space[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 103216)
- [3] Sprangle P, Hafizi B, Milchberg H, et al. Active remote detection of radioactivity based on electromagnetic signatures[J]. Physics of Plasmas, 2014, 21: 013103.
- [4] Isaacs J, Miao Chenlong, Sprangle P. Remote monostatic detection of radioactive material by laser-induced breakdown[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23: 033507.
- [5] Nusinovich G S, Pu Rui Feng, Antonsen T M Jr, et al. Development of THz-range gyrotrons for detection of concealed radioactive materials[J]. Journal of

- [Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves](#), 2011, 32(3): 380-402.
- [6] Nusinovich G S, Sprangle P, Semenov V E, et al. On the sensitivity of terahertz gyrotron based systems for remote detection of concealed radioactive materials[J]. [Journal of Applied Physics](#), 2012, 111: 124912.
- [7] Dorozhkina D, Semenov V, Olsson T, et al. Investigations of time delays in microwave breakdown initiation[J]. [Physics of Plasmas](#), 2006, 13: 013506.
- [8] 王华杰, 马喆, 龚少博, 等. 高功率微波与大气等离子体相互作用研究[J]. [核聚变与等离子体物理](#), 2022, 42(s1): 170-174. (Wang Huajie, Ma Zhe, Gong Shaobo, et al. Study on the interaction between high power microwave and atmospheric plasma. [Nuclear Fusion and Plasma Physics](#), 2022, 42(s1): 170-174)
- [9] Shimamura K, Yamasaki J, Miyawaki K, et al. Propagation of microwave breakdown in argon induced by a 28 GHz gyrotron beam[J]. [Physics of Plasmas](#), 2021, 28: 033505.
- [10] Foster J, Krompholz H, Neuber A. Investigation of the delay time distribution of high power microwave surface flashover[J]. [Physics of Plasmas](#), 2011, 18: 013502.
- [11] Li Shuguang, Xu Da, Zhang Jie, et al. A new three-level fourth-order compact finite difference scheme for the extended Fisher-Kolmogorov equation[J]. [Applied Numerical Mathematics](#), 2022, 178: 41-51.
- [12] 杨浩, 闫二艳, 郑强林, 等. 一种准光反射聚焦微波放电大气等离子体装置[J]. [强激光与粒子束](#), 2019, 31: 053002. (Yang Hao, Yan Eryan, Zheng Qianglin, et al. A microwave plasma system with quasi optical focusing reflector[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2019, 31: 053002)