

文章编号: 2095-4980(2016)05-0729-04

高功率微波孔缝击穿特性

闫二艳^{a,b}, 孟凡宝^{a,b}, 邱 风^b, 马弘舸^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.复杂电磁环境科学与技术重点实验室; b.应用电子学研究所
高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对微波通过封装腔体狭缝出现的共振增强效应和击穿特性开展研究, 重点研究影响高功率微波辐射传输通道上的防护因素—微波击穿时间、传输能量等。研究结果表明: 在微波击穿防护过程中, 如果在腔体强电场区域存在自由电子, 使得不存在较长的击穿时间延迟条件下, 那么微波击穿将会是限制高功率微波通过狭缝进行能量传输的有效方法。

关键词: 击穿等离子体; 高功率微波防护; 微波击穿; 狭缝

中图分类号: TN365

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0729

Preliminary analysis on high power microwave breakdown characteristics in slots

YAN Eryan^{a,b}, MENG Fanbao^{a,b}, QIU Feng^b, MA Hongge^{a,b}

(a.Complicated Electromagnetic Environment Laboratory; b.Science and Technology on High Power Microwave Laboratory,
Institute of Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The properties of microwave-induced breakdown of air in narrow metallic slots are investigated, with emphasis on factors important for protection against transmission of incident High-Power Microwave (HPM) radiation. The key factors investigated are breakdown time, peak-leakage power, as functions of incident pulse and power density. The investigation demonstrates that self-induced microwave breakdown will be an efficient mechanism for limiting high-power microwave transmission through slots, if seed electrons must always be available in the slot volume in order to start the breakdown process without delay in the microwave breakdown protection process.

Key words: breakdown plasmas; High-Power Microwave protection; microwave breakdown; slots

随着高功率微波技术的发展, 峰值功率越来越高, 频率范围越来越宽。高功率微波一般通过“前门”或“后门”耦合到电子学系统中, 特别是通过耦合使能量集中到一些敏感部件/部位, 从而产生扰乱、甚至破坏性的干扰, 这些是目前 HPM 效应研究涉及较多的内容, 但是高功率微波能量在通过电子设备封装体的孔、缝以及前门关键部件处, 如果出现共振增强现象, 出现局部强电场区域, 在强场区域可能会出现大气击穿, 从而影响微波能量的传输和耦合^[1], 不利于 HPM 效应现象的出现。从另一方面来说, 可以利用该现象对电子学设备进行防护, 例如防护结构、防护器件的设计和利用, 在前门关键器件前端设计在一定条件下的击穿防护器件, 对于低能量信号传输没有影响, 但是对于强微波能量会出现击穿保护现象, 阻止强微波能量的通过, 进而保护关键部件/器件。本文针对 HPM 在电子设备封装孔、缝处出现共振增强效应以及可能出现的微波大气击穿开展初步的理论和数值模拟仿真研究。

1 共振增强效应

电磁波遇见封装表面的间隙和孔缝, 就会发生散射和透射。采用 Helmholtz-Schrödinger 方法对特定条件下的孔缝耦合现象进行分析^[2]。

收稿日期: 2015-06-04; 修回日期: 2015-07-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划)

建立如图1所示的模型, a 为缝长, ψ_n 为波函数, 假设金属壁为理想导体, 在缝壁处 $x=0$ 和 $x=a$, $\psi_n=0$, 这种情况可以模拟为量子力学的一维无限深势阱。

$$V(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < a \\ \infty, & x < 0, x > a \end{cases} \quad (1)$$

式中 $V(x)$ 为势能。

粒子在阱外出现的概率为零, 在阱内 ($0 < x < a$), 体系所满足的定态薛定谔方程是 $\frac{d^2}{dx^2} \psi + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0$, 利用边界条件得到能量的本征

值 E_n 及对应的本征波函数 $E = E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2ma^2}$, $n=1, 2, 3, \dots$, 对应于能级

E_n 的波函数记为 $\psi_n(x)$, $\psi_n(x) = A_n \sin(\frac{n\pi}{a}x)$, n 为整数, 可见对每一本征态, 阱内波函数为驻波。

$|\psi_n|^2 = \left| A_n \sin(\frac{n\pi}{a}x) \right|^2$, 当 $x = \frac{a}{2}$ 时, $|\psi_n| = \begin{cases} |\psi_n|_{\max}, & n \text{ 为奇数} \\ |\psi_n|_{\min}, & n \text{ 为偶数} \end{cases}$, n 为整数。

按照上述数学模型建立了初步的物理模型, 物理模型孔缝结构为长 $a=32 \text{ mm}$, 宽 $W=1 \text{ mm}$, 厚 $T=5 \text{ mm}$ 。入射波电场方向垂直孔缝的长边, 进行了数值模拟仿真, 结果见图2, 当入射微波波长与孔、缝结构满足一定关系条件下, 出现共振增强现象会使局部场强陡增, 见图2(a)和2(c)。

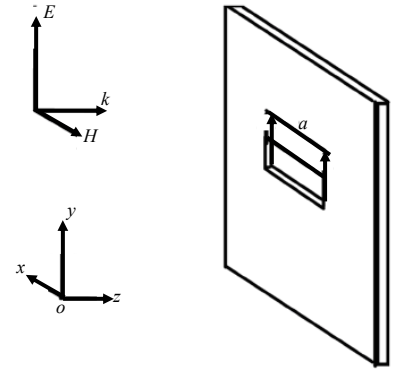


Fig.1 Schematic diagram of the slot and the incident microwave
图1 入射微波与狭缝关系示意图

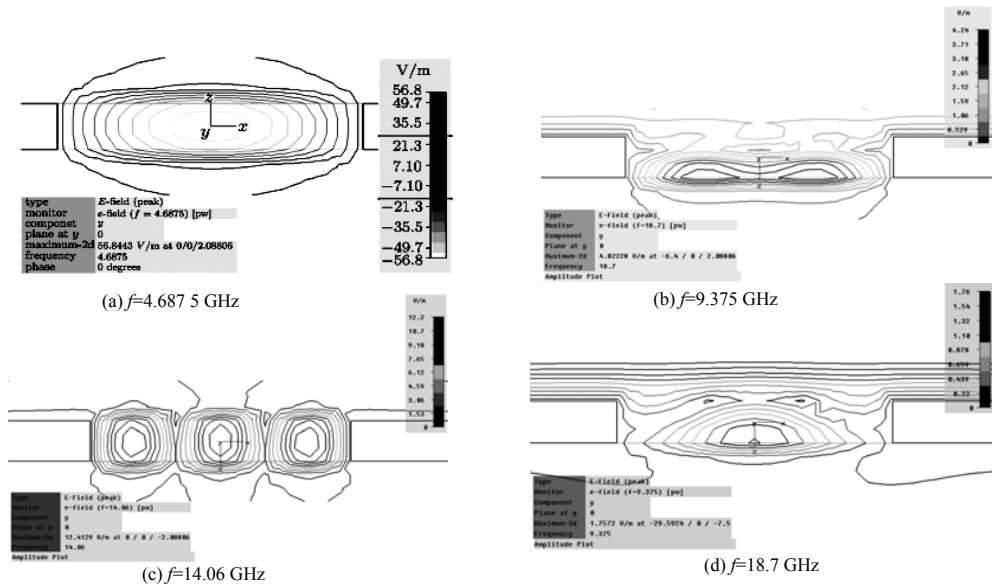


Fig.2 E_y changes with different frequencies in the slot images at $T=5 \text{ mm}$ and $a=32 \text{ mm}$
图2 $T=5 \text{ mm}$, $a=32 \text{ mm}$ 条件下, 不同频率微波耦合狭缝处场强变化情况

2 基本击穿理论分析

处于高电场中的窄孔缝可能会出现电场击穿现象, 从电场基本击穿理论出发^[3-8], 连续波击穿经验公式为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla n) + \nu_i n - \nu_a n \quad (2)$$

式中: n 为电子密度; D 为扩散系数; ν_i 为电离频率; ν_a 为粘附系数。

上述方程可以近似为: $\nabla \cdot (D \nabla n) \approx -\frac{D}{L_{\text{eff}}^2} n \equiv -\nu_D n$, $\frac{dn}{dt} = \nu_{\text{net}} n$, $\nu_{\text{net}} = \nu_i - \nu_D - \nu_a$, L_{eff} 为有效长度, ν_D 为扩

散损耗频率, ν_{net} 为电子净增长率。

对于连续波而言, 击穿条件为 $\nu_{\text{net}} = 0$ 。而对于脉冲微波击穿, 必须在一定的时间内电子数密度上升到临界电子数密度, 以保证微波能量传输的有限性, 因为自由电子的出现(可以人为控制)时间, 在此不做深入研究, 假设存在种子电子, 需要的击穿时间为 τ_b , 不失一般性, 出现大气击穿 $\ln \frac{n_c}{n_0} \approx 20$, n_c 为击穿临界密度, n_0 为初始电

子数密度, 即 $\int_0^{\tau_b} \nu_{\text{net}}(t) dt = \ln \frac{n_c}{n_0} \approx 20$, 假设微波脉冲为理想方波, 且为强电场, 可以简化为 $\tau_b \approx \frac{20}{\nu_i}$ 。

3 实验

基于上述基本理论分析, 随即对 HPM 大气击穿时间开展了相应的实验验证。实验装置示意图如图 3 所示。实验中采用 C 波段 5.3 GHz 微波聚焦产生等离子体, 脉冲宽度为 1 μs , 重复频率为 500 Hz, 峰值功率为 600 kW~800 kW。反应腔体为高 50 cm, 直径 60 cm 的柱状真空室。反应腔体上方放置光电倍增管进行光学测量, 光电倍增管探头为圆柱形, 直径 3 cm。真空室气压维持在 300 Pa。放电效果如图 4 所示, 真空室内空间远大于等离子体区域。

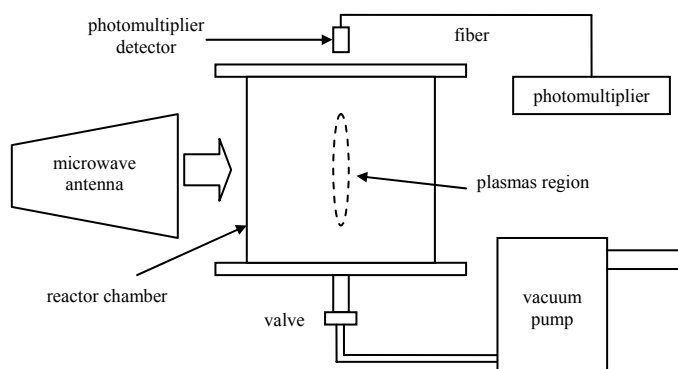


Fig.3 Scheme of experimental setup

图 3 实验装置示意图

4 结果分析

依据上述实验参数和实验装置, 开展了 HPM 大气击穿时间特性、HPM 大气击穿前后自身微波能量传输特性研究。图 5~图 6 为 HPM 大气击穿时间特性实验结果和理论预估结果。图 7 为 HPM 大气击穿前后自身微波能量传输特性实验结果。

图 5 测量结果表明, HPM 在有自由电子存在的强电场区域会出现击穿现象, 且会击穿延时, 击穿时间的长短与局部电场强度有关, 依据上述基本击穿理论, 就实验对应参数进行击穿时间估算。其中电离频率参数在此引用的是 5.33 次方经验公式, 计算参数为 C 波段 5.3 GHz 微波, 脉冲宽度为 1 μs , 重复频率为 500 Hz, 计算结果见图 6。

从上述实验测量结果以及图 6 中对不同参数下微波击穿时间进行了估算, 微波击穿时间的存在是其特有的性质, 其击穿时间的长短直接关系着微波能量传输的多少。如果采用此种方式对强电磁脉冲电子设备进行防护, 必须优化结构和参数缩短微波击穿时间, 尽量减小微波能量传输, 更好地保护电子设备。从图 7 可以清晰地看出在微波传输通道上有无等离子体对微波传输能量影响较大。



Fig.4 Image of discharge with microwave pulse width 1 μs under 300 Pa

图 4 微波脉宽 1 μs , 气压 300 Pa 下的放电视图

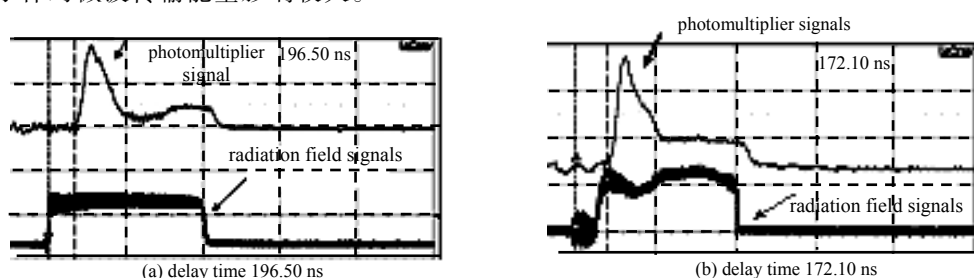


Fig.5 Experimental diagnostic signals

图 5 实验测量结果

5 结论

本文利用 Helmholtz-Schrödinger 方法对特定条件下的孔缝耦合现象进行分析, 可以利用该方法对更为复杂的结构进行理论分析, 为电磁波孔缝耦合现象的分析提供了一种新的方法和思路。对于利用击穿特性对强电磁进行防护技术研究时, 首先要分析电子系统出现电磁共振增强现象的区域和强场大小。依据强场分布区域、大小以及大气击穿特性, 对强电磁脉冲进行防护设计。

上述研究结果表明: 如果在缝隙处出现大气击穿形成等离子体, 会大大减小微波能量的传输, 对电子系统是一种很好的保护手段。但是也存在一定潜在的风险, 如果在微波高能量到来之前, 在强场分布区域内没有自由电子的出现, 击穿时间会比较长, 导致大量的微波能量通过缝隙, 对电子设备造成危害。

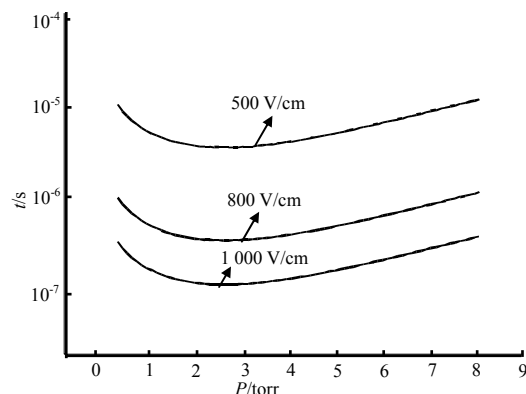


Fig.6 Microwave breakdown time is estimated under the experimental condition.

图6 实验对应参数脉冲微波击穿时间估算

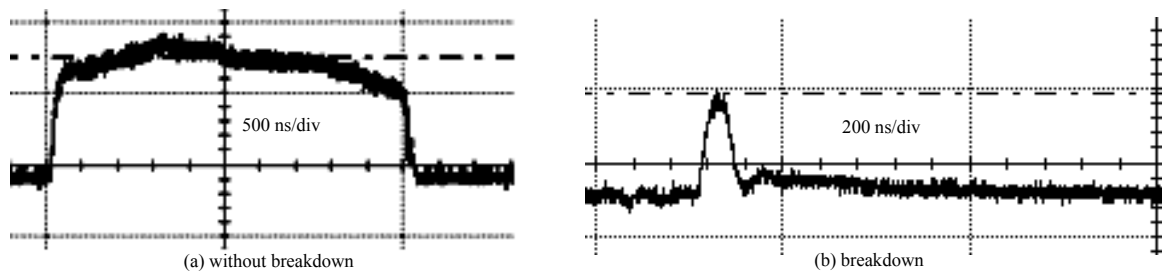


Fig.7 Transmitted and received signals

图7 微波传输和接收信号

参考文献:

- [1] SULLIVAN C A, DESTLER W W, Rodgers J, et al. Short-pulse high-power microwave propagation in the atmosphere[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(11): 5228-5232.
- [2] YAN Eryan, MENG Fanbao, MA Hongge, et al. Preliminary analysis of resonance effect by Helmholtz Schrödinger method[J]. Chin. Phys. B, 2010, 19(10): 100304-1-6.
- [3] UIF Jordan, DAN Anderson, MATS Bäckström. Microwave breakdown in slots[J]. IEEE Transactions on plasma science, 2004, 32(6): 2250-2262.
- [4] GOULD L, ROBERTS L W. Breakdown of air at microwave frequencies[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(10): 1162-1170.
- [5] ROSE D J, BROWN S C. Microwave gas discharge breakdown in air, nitrogen, and oxygen[J]. Journal of Applied Physics, 1957, 28(5): 561-563.
- [6] MACDONALD A D. Microwave Breakdown in Gases[M]. New York: Wiley, 1966.
- [7] TETENBAUM S J, MACDONALD A D, BANDEL H W. Pulsed microwave breakdown of air from 1 to 1000 Torr[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42: 5871.
- [8] FOSTER J, THOMAS M, KRILE J, et al. An investigation of pulsed high power microwave dielectric surface flashover initiation in atmospheric conditions[D]. Lubbock USA: Texas Tech University, 2012.

作者简介:



闫二艳(1978-), 女, 河南省焦作市人, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波效应机理研究及低温等离子体. email: yaneryan_2002@163.com.