

波导等离子体限幅器中气体的选择与触发条件计算*

杨 耿, 谭吉春, 盛定仪, 杨雨川

(国防科学技术大学 理学院, 长沙 410073)

摘 要: 为保护电子设备不受高功率微波损坏,在矩形波导中嵌入等离子体限幅器。计算了不同气体的微波击穿场强随气体压强以及微波频率的变化规律。在高气压条件下(1 333~133 320 Pa),气体击穿场强随气压增大而增大,在计算的 4 种气体中 Ne 的击穿场强最小;低气压条件下(1.333 2~133.32 Pa),气体击穿场强随气压增大而减小,且 Xe 具有最小击穿场强。高气压条件下气体的击穿场强明显高于低气压下的击穿场强。计算结果表明:当填充 133.32 Pa 的 Xe 时,限幅器能够在约 30 km 范围内,有效地防护 10 GW 级高功率微波对电子设备的损坏。

关键词: 高功率微波; 波导; 等离子体限幅器; 微波击穿场强

中图分类号: TJ99 **文献标识码:** A

高功率微波技术的快速发展给雷达、通讯电子设备等的防护带来挑战^[1]。已有的能够用于高功率微波防护的器件主要有气体放电管和固体器件(如二极管等)^[2]。其中,气体放电管的功率容限高,但其响应速度较慢;固体器件的响应速度虽快,但其功率容限较低^[3]。当受到快上升沿、高峰值功率、高重复频率、宽频谱范围高功率微波的照射时,这两类器件均难以达到满意的防护效果。

根据等离子体反射微波的原理,人们提出了等离子体限幅概念^[3-4]。等离子体限幅器的响应速度快、功率容限高、防护频段宽,能够很好地满足高功率微波防护的实际需要。但文献[3]并未对限幅器的关键参数,如气体种类、气体压强等进行详细分析。本文研究波导等离子体限幅器的气体击穿条件,参照文献[3]所采用的气压参数,计算了在高气压(1 333~133 320 Pa)和低气压条件(1.333 2~133.32 Pa)下气体的微波击穿场强,比较了不同气体种类及放电条件的防护效果。

1 等离子体限幅器的结构和原理

波导等离子体限幅器是充有易电离气体的密封腔体,利用入射的高功率微波使气体电离,产生频率高于入射微波频率的等离子体,该等离子体反射微波能量,起到保护敏感电子设备的作用。处于理想工作状态的限幅器如图 1 所示,当入射微波场强低于阈值、限幅器处于导通状态(图 1(a))时,微波透过限幅器中的气体,在波导中正常传播。当入射微波场强超过一定阈值时,激发限幅器内气体形成等离子体(图 1(b));一旦等离子体形成,限幅器就会反射微波(图 1(c)),从而保护后端的敏感电子器件。

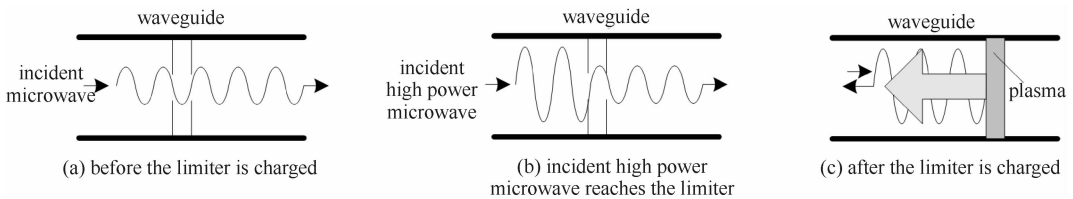


Fig. 1 Schematic diagram of plasma limiter

图 1 理想工作状态时的等离子体限幅器原理示意图

2 基本方程

不考虑附着效应时,微波气体击穿条件的表达式为

$$\nu_i = D/\Lambda^2 \quad (1)$$

式中, ν_i 为电离产生电子的频率; D 是扩散系数; Λ 是特征扩散长度^[5]。

* 收稿日期:2007-05-21; 修订日期:2008-01-17

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:杨 耿(1984—),男,硕士研究生,从事高功率微波防护研究;petteryg@163.com。

当限幅器附加外电场时,初始电子由于被电场加速而获得的能量为

$$d\varepsilon/dt = \Delta\varepsilon_E \nu_m \quad (2)$$

式中: ν_m 为碰撞频率($\nu_m = \alpha p$, p 是气体压强, α 是碰撞系数,其值见表 1^[3,6])、 $\Delta\varepsilon_E$ 是每次碰撞从高频电场获得的能量,在低气压条件下(1.333 2~133.32 Pa),微波频率 ω 远远大于碰撞频率 ν_m ,则^[3]

$$\Delta\varepsilon_E = \frac{e^2 E_0^2}{2m(\omega^2 + \nu_m^2)} \approx \frac{e^2 E_0^2}{2m\omega^2} \quad (3)$$

式中: E_0 是微波的场强; m 是电子质量。

为了获得足够的能量将气体电离,电子需要在微波电场中被加速一段时间 τ_i 。所以

$$\nu_i = \tau_i^{-1} = \frac{\Delta\varepsilon_E \nu_m}{\varphi_i} = \frac{e^2 E_{BL}^2 \nu_m}{m\omega^2 \varphi_i} \quad (4)$$

式中: φ_i 为气体原子的电离能; $E_{BL} = E_0^{1/2}$ 是微波电场的均方根值(即低气压条件下气体击穿的微波电场强度)^[5]。

根据气体运动论有^[6]

$$D = l^2 \nu_m / 3, \quad l = 1/n\sigma, \quad p = nkT \quad (5)$$

式中: l 是平均自由程; n 为气体密度; σ 是碰撞截面; k 是玻尔兹曼常数; T 为温度。将式(5)及式(4)代入式(1),可以得到低气压条件下气体击穿场强 E_{BL} 的表达式^[3]

$$E_{BL} = \sqrt{\frac{m\varphi_i}{3} \frac{kT\omega}{e\sigma p \Lambda}} \quad (6)$$

高压条件下(1 333~133 320 Pa), $\nu_m \gg \omega$,电子在碰撞过程中从高频电场吸收的能量为

$$\Delta\varepsilon_E = e^2 E_{BH}^2 / m\nu_m^2 \quad (7)$$

式中 E_{BH} 为高压条件下的气体击穿微波电场强度。参照式(6)的推导步骤,得到高压条件下气体击穿场强 E_{BH} 的表达式^[3]

$$E_{BH} = \sqrt{\frac{2\varphi_i}{M} \frac{m\nu_m}{e}} \quad (8)$$

式中 M 为气体原子质量。

3 气体击穿场强的计算

假设矩形波导参数 $a=72.14$ mm, $b=34.04$ mm,为了有效防护高功率微波,我们在波导中产生厚度 $d=50$ mm 的等离子体。根据

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{d^2} \right) \quad (9)$$

则矩形等离子体的特征扩散长度 $\Lambda=0.834$ cm^[5]。温度为 300 K,其余气体参数参照表 1,入射微波频率为 1 GHz。根据式(6)计算低气压条件下气体击穿场强随气压的变化,计算结果如图 2 所示。可以看出,低气压条件下气体的击穿场强随气压的增大而减小,在所计算的 4 种气体中, Xe 的击穿场强最小,在气压为 133.32 Pa 时,约为 70.78 V/m。

根据式(8)计算高压条件下气体击穿场强随气压的变化,计算结果如图 3 所示,其中入射微波频率为 2.5 GHz,计算过程中选取的其余参数见表 1。可以看出,高压条件下气体的击穿场强随气压增大而变大,所计算的 4 种气体中 Ne 的击穿场强最小。在气压压

表 1 计算中用到的气体参数

Table 1 Parameters of the gases

gas	ionization potential/eV	coefficient α	collisional cross section/m ⁻²
He	24.580	2.5×10^9	5.086×10^{-20}
Ne	21.559	2.5×10^9	5.726×10^{-20}
Ar	15.755	15×10^9	8.552×10^{-20}
Xe	12.127	24×10^9	2.524×10^{-19}
H ₂	15.370		4.973×10^{-20}

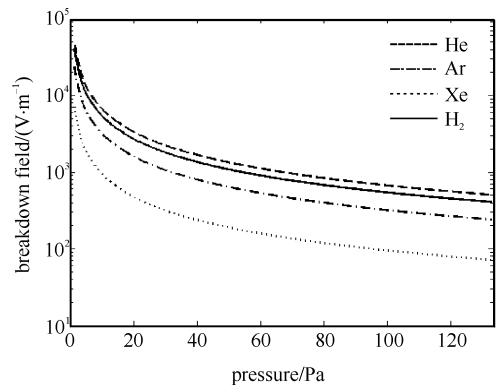


Fig. 2 Breakdown field as a function of gas pressure under low pressure condition

图 2 低气压条件下击穿场强随气压的变化

强为 1 333 Pa 时,Ne 的击穿场强约为 2.06 kV/m,133 320 Pa 时为 206 kV/m。且高压条件下几种气体的击穿场强明显高于低气压条件下的击穿场强。

设气体压强为 133.32 Pa,温度为 300 K,特征扩散长度 0.834 cm,其余气体参数参照附表 1,根据式(6)计算气体击穿场强随入射微波频率的变化,计算结果如图 4 所示。可以看出在低气压条件下,例如,当击穿场强为小于 10^3 V/m 的某值时(见图 4 水平横线),只有 Xe 能被频率处于 1~10 GHz 的入射微波击穿,而图 4 中其余气体只能被小于 3 GHz 的微波击穿。

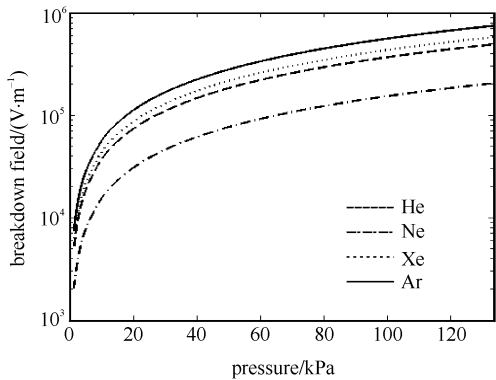


Fig. 3 Breakdown field as a function of gas pressure under high pressure condition

图 3 高压条件下击穿场强随气压的变化

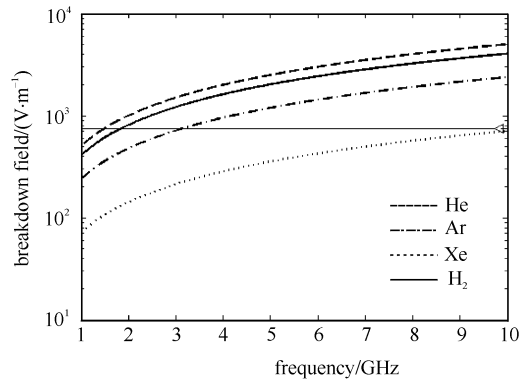


Fig. 4 Breakdown field as a function of frequency under low pressure condition

图 4 低气压条件下击穿场强随微波频率的变化

4 讨论

4.1 气体成份及压强的选择

当限幅器中的等离子体形成后,微波被等离子体反射,从而起到保护后端电子设备的作用。一般来说,微波在真空与等离子体的交界面处被反射的能量,随等离子体密度增大而增大^[7]。因而在微波气体击穿时,选用较高气压的气体更能产生自由电子密度较大的等离子体,从而防护效果越好。

但是,对比图 2 和图 3 的结果,我们可以看到,高压条件下的气体微波击穿场强要远大于低气压条件下的击穿场强。比如,低气压条件下 Xe 的击穿场强最小,在气压为 133.32 Pa 时,约为 70.78 V/m;而高压条件下,击穿场强最小的 Ne 在 1 333 Pa 时约为 2.06 kV/m,比低气压条件下 Xe 的击穿场强大 1 个数量级。同时考虑到,当气压过高时不容易稳定放电形成等离子体,所以限幅器中的气体压强应该在低气压范围内选择较高的气压,如 133.32 Pa。

在确定了气体压强的范围后,由图 2 的计算结果我们看出:与其它几种气体相比,Xe 气具有较低的击穿场强,更适合用作限幅器的填充气体。

4.2 限幅器对微波的频率响应

图 4 的计算结果表明:在低气压条件下,当击穿场强为小于 10^3 V/m 的某值时,只有 Xe 能被频率处于 1~10 GHz 的入射微波击穿。如采用低压的 Xe 作为限幅器的填充气体,对防护的高功率微波没有明显的频率选择性。

4.3 等离子体限幅器可行性的评估

表 2 列举了功率为 10 GW、频率为 1 GHz、脉冲宽度 100 ns、天线面积 100 m²(效率 50%)的高功率微波源在不同距离处的电场强度^[8]。

由表 2 可以看到,高功率微波随着距离的增大其电场强度不断减小,所以高功率微波的作用距离一般为几十 km^[9]。在 32 km 的距离处,表 2 中的微波场强约为 1 400 V/m。由图 2 的计算结果,在气压为 133.32 Pa 时,Xe 的微波击穿场强最小,约为 70.78 V/m。所以,在 32 km 的距离范围内,入射的高功率

表 2 高功率微波在不同距离处的电场强度

Table 2 Electric field intensity of high power microwave source in different distance

distance/km	electric field/(kV · m ⁻¹)
0.1	460
1	46
5	9
10	4.6
32	1.4

微波均能将 Xe 气击穿形成等离子体,从而使限幅器起到保护电子设备的作用。

5 结 论

本文计算了等离子体限幅器中气体击穿场强随气体压强及微波入射频率的变化规律,根据所取波导参数和高功率微波入射参数,在限幅器中填充 133.32 Pa 的 Xe,能够在约 30 km 的范围内有效防护 10 GW 级高功率微波源的辐射。相对于气体放电管的长响应时间和固体器件的低功率容限,新型波导等离子体限幅器能够在一定程度上克服传统气体放电管及固体器件在防护高功率微波方面的不足,有望成为新的高功率微波防护器件。

为了改善等离子体限幅器的响应,可以采取一些附加手段,比如给限幅器预加电压进行预先放电,或者在限幅器内壁涂敷放射性同位素。

参考文献:

- [1] Wilson C. High altitude electromagnetic pulse (HEMP) and high power microwave (HPM) devices; threat assessment[R]. AD-A-449540, 2006.
- [2] 汪海洋,李家胤,周翼鸿,等. PIN 限幅器 PSpice 模拟与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(1): 88-92. (Wang H Y, Li J Y, Zhou Y H, et al. Experimental study and PSpice simulation of PIN diode limiter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1): 88-92)
- [3] Kikel T, Altgilbers L, Merritt I, et al. Plasma limiters[R]. AIAA-A-98-32537, 1998.
- [4] Mankowski J J, Hemmert D, Neuber A, et al. Field enhanced microwave breakdown in a plasma limiter[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2002, **30**(1): 102-103.
- [5] 罗恩 J R. 工业等离子体工程[M]. 北京: 科学出版社, 1998. (Roth J R. Industrial plasma engineering. Beijing: Science Press, 1998)
- [6] 江剑平, 翁甲辉, 杨沫棠, 等. 阴极电子学与气体放电原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980. (Jiang J P, Weng J H, Yang M T, et al. Cathodal electronics and theory of gas discharge. Beijing: National Defence Industry Press, 1980)
- [7] Laroussi M, Roth J R. Numerical calculation of the reflection, absorption, and transmission of microwave by a nonuniform plasma slab[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1993, **21**(4): 366-372.
- [8] Li H, Wang Z B. Development of foreign high-powered microwave weapons and prospect of future application in space-based target defense and air defense[R]. AD-A-306465, 1996.
- [9] Ianoz M, Wipf H. Modeling and simulation methods to assess EM terrorism effects[C]//Asia-Pacific CEEM, 2000.

Gas selection and calculation of its breakdown field for plasma waveguide limiter

YANG Geng, TAN Ji-chun, SHENG Ding-yi, YANG Yu-chuan

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To protect electronic systems against high power microwave, a plasma waveguide limiter is presented. The threshold breakdown electric fields of He, Ne, Ar, Xe and H₂, which are filled in the limiter, are deduced as a function of gas pressure and microwave frequency. Under high pressure (1 333~133 320 Pa), the breakdown fields increase as pressure increases, and Ne has the lowest breakdown field compared with the other gases. Under low pressure (1. 333 2~133. 32 Pa), the breakdown fields decrease as pressure increases, and Xe has the lowest breakdown field. The breakdown field of gases under high pressure is higher than that of gases under low pressure. The calculation results show that the limiter filled with Xe with pressure about 133. 32 Pa can protect the electronic systems against high power microwave within 30 km.

Key words: High power microwave; Waveguide; Plasma limiter; Breakdown field