

文章编号: 1001-4322(2008)03-0469-04

# 磁绝缘传输线振荡器中次级电子倍增效应的高模分析\*

郝建红, 赵莲清

(华北电力大学 电气与电子工程学院 信息工程系, 北京 102206)

**摘 要:** 以磁绝缘传输线振荡器(MILO)中次级电子倍增效应物理图像为基础,对 MILO 中发生次级电子倍增效应的各阶共振模进行了计算和分析。结果表明:与基阶共振模相比,高阶共振模发生次级电子倍增效应的敏感区域要小得多,对次级电子倍增效应起主要作用的是基阶共振模;减小或抑制次级电子倍增效应,主要应考虑控制基阶共振模的电子倍增作用。

**关键词:** 磁绝缘传输线振荡器; 次级电子倍增效应; 敏感曲线; 共振模

**中图分类号:** TN75 **文献标识码:** A

长脉冲和高重复频率对于提高高功率微波的能量及其实用化应用非常重要,微波脉冲缩短是研究长脉冲高功率微波源时遇到的重要物理现象,也是限制高功率微波向长脉冲高能量发展的主要障碍,研究脉冲缩短的产生机理和消除方法成为了近年来广泛关注的课题<sup>[1-6]</sup>。从已有的研究结果看,脉冲缩短的一个重要根源是等离子体的产生,它终止了微波的产生。产生等离子体的原因主要有两个:一个是强场作用;另一个是次级电子倍增效应。它们使腔壁表面和腔里的气体或油雪崩式电离,腔内等离子体大量增加,破坏了微波产生的结构构型<sup>[7-10]</sup>。由于次级电子是气体或油雪崩式电离的种子电子,因此建立次级电子倍增效应模型、研究次级电子倍增效应产生条件是研究高功率微波器件中脉冲缩短的一个重要方向。

磁绝缘传输线振荡器(MILO)是一种 GW 水平的同轴正交型器件,它所具有的自绝缘和低阻抗性质允许管子运行非常大的输入功率(几十 GW)和输出功率(大于 1 GW),成为近年来高功率微波领域引人注目的微波器件。MILO 的结构构型有利于单边次级电子倍增效应的发生,本文在突出主要物理图像的基础上,以 MILO 单边次级电子倍增效应模型为基础,进一步对发生次级电子倍增效应的高阶共振模进行了计算和分析。

## 1 单边次级电子倍增效应动力学模型

在微波器件的波-束相互作用腔中,一般有电子束、聚焦磁场  $B$  和射频场  $E_{rf} = E_{rf0} \sin \omega t$ 。MILO(还有磁控管)与一般微波器件不同,它的波-束相互作用腔与二极管合二为一,如图 1 所示。其中微波场  $E_{rf}^x$  和空间电荷产生的静电场均垂直表面沿着  $x$  方向。

在考虑磁绝缘损失的情况下,从金属表面发射的电子运动方程可以简化为<sup>[11]</sup>

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{e}{m} | E_{dc}^x | - \frac{e}{m} E_{rf0}^x \sin \omega t \quad (1a)$$

式中:  $E_{dc}^x = -V_0/d$ ;  $d = R_2 - R_1$ ;  $x$  的零点建立在阴极表面上;  $R_1$  和  $R_2$  分别为阴极和阳极半径。对于单边,发生次级电子倍增效应的必要条件是电子从金属表面出发又回到金属表面的渡越时间  $t_i$  必须满足共振条件

$$\omega t_i = N\pi + \theta_0 \quad (2)$$

式中:  $\theta_0$  是电子的初始相位。对于单边  $N=2, 4, 6, \dots$ , 叫做共振阶数。基阶( $N=2$ )共振模表示电子从器壁表面离开经过一个射频周期又返回器壁表面的二次碰撞,而高阶( $N=4, 6, \dots$ )共振模表示电子从器壁表面离开经过两个或两个以上射频周期才又返回器壁表面的二次碰撞。将式(1)积分并将共振条件式(2)代入,得到发生次级电子倍增效应的共振方程和电子碰撞器壁表面的轰击速度  $v_i$  分别为

$$(N\pi/2)v_{dc} - v_{rf0} \cos \theta_0 - v_{0x} = 0 \quad (3)$$

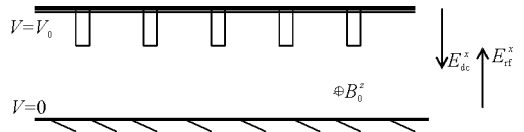


Fig. 1 Cross section of the MILO configuration  
图 1 MILO 结构示意图

\* 收稿日期:2007-03-23; 修订日期:2007-09-14  
基金项目:强辐射重点实验室基金资助课题(20050601)  
作者简介:郝建红(1960—),女,教授,博士,主要从事高功率微波的理论研究;jianhonghao@ncepu.edu.cn.

$$v_i = 2v_{rf0} \cos\theta_0 + v_{0,x} \quad (4)$$

以上式中:  $v_{rf0} = eE_{rf0}^x/m\omega$ ;  $v_{dc} = eE_{dc}^x/m\omega$ ;  $v_{0,x}$  是电子的发射速度。由上述方程可以看到: 对于 MILO 中的单边次级电子倍增效应, 射频场使电子离开器壁表面, 静电场使电子返回, 电子轰击金属表面的速度是在共振条件下由射频场决定的, 与静电场无关。

## 2 高阶共振模敏感曲线分析

敏感曲线是在不同的参数空间上确定发生次级电子倍增范围的曲线。从不同的角度考虑不同的参数, 敏感曲线有不同的表示方法。

### 2.1 共振曲线

令  $\alpha = E_{rf0}^x / |E_{dc}^x|$ ,  $v_d = v_{dc}/\omega d$ ,  $\Theta = \omega d/v_{0,x}$ , 则共振方程可以写成以  $v_d\Theta$  为参数的形式

$$\alpha = (N\pi/2 - 1/v_d\Theta)(1/\cos\theta_0) \quad (5)$$

由共振方程可以给出在任意二次电子产额条件下, 电子由器壁表面离开, 在射频场和静电场作用下又返回表面发生二次碰撞的条件范围。图 2(a) 是以  $v_d\Theta$  为参数的基模  $\alpha-\theta_0$  共振曲线。图 2(b) 是  $N=2, 4, 6$  的几种高共振模的  $\alpha-\theta_0$  曲线。由图看出: 共振阶数越高, 在共振条件下发生次级电子倍增效应的电子初始相角范围越小, 射频场与静电场比值也越高。

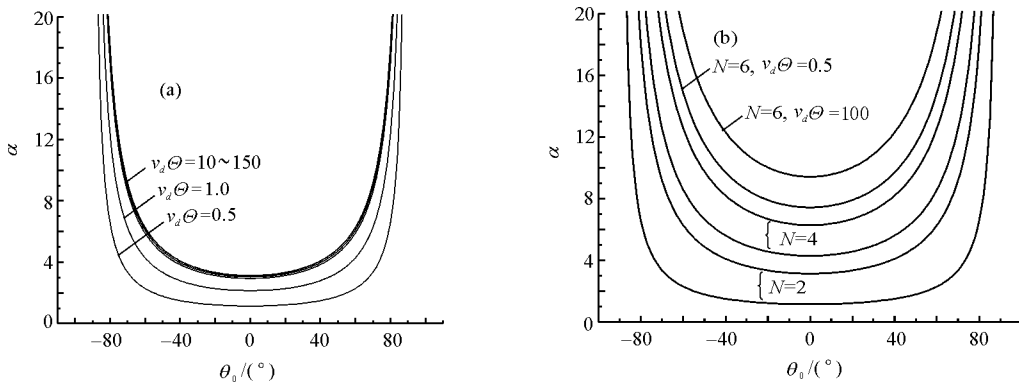


Fig. 2 Resonance curve of the multipactor occurring

图 2 次级电子倍增效应共振曲线

### 2.2 敏感曲线

发生次级电子倍增, 要求电子的轰击能量  $E_i = mv_i/2$  必须满足

$$E_1 \leq E_i \leq E_2 \quad (6)$$

式中:  $E_1$  和  $E_2$  是二次发射曲线上二次电子产额  $\delta(E_1) = \delta(E_2) = 1$  的第一个和第二个交叉点的电子轰击能量, 如图 3 所示。在  $E_1$  和  $E_2$  之间的  $E_i$ , 二次电子激发率  $\delta(E_i) > 1$ 。

令  $v_1 = \sqrt{2E_1/m}$ ,  $v_2 = \sqrt{2E_2/m}$ , 由共振方程和式(6)并利用  $v_{dc}N\pi \gg v_{0,x}$  和  $2v_{rf0} \gg v_{0,x}$  的近似条件, 得

$$v_1/N\pi \leq v_{dc} \leq v_2/N\pi \quad (7)$$

或

$$v_1 \leq 2v_{rf0} \leq v_2 \quad (8)$$

对于 MILO 的单边次级电子倍增效应, 由相位聚焦分析可以求得稳定发生次级电子倍增效应的电子相位聚焦范围是  $\theta_0 = 0 \sim 42.86^\circ$ <sup>[11]</sup>。利用  $\theta_0$  的上限  $\theta_{0,max}$  和下限  $\theta_{0,min}$  可得敏感曲线如图 4 所示。从图中可以看出: 共振阶数  $N$  越高, 发生次级电子倍增效应的敏感区域越小。电子初始速度越大, 发生次级电子倍增效应要求的射频场范围越小。图中敏感区域变小, 这个结果与双边次级电子倍增效应的结果是一致的<sup>[5,12]</sup>。

### 2.3 射频场和静电场范围曲线

电子在相互作用腔中发生二次电子碰撞, 除了要满足共振条件外, 还要受到最大位移小于等于腔半径和最小位移大于零的限制, 文献[11]对 MILO 中电子发生次级电子倍增的位移条件限制已做了详细讨论。

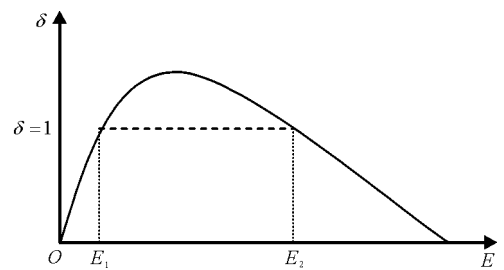


Fig. 3 Variation of secondary emission ratio

图 3 二次电子发射率曲线

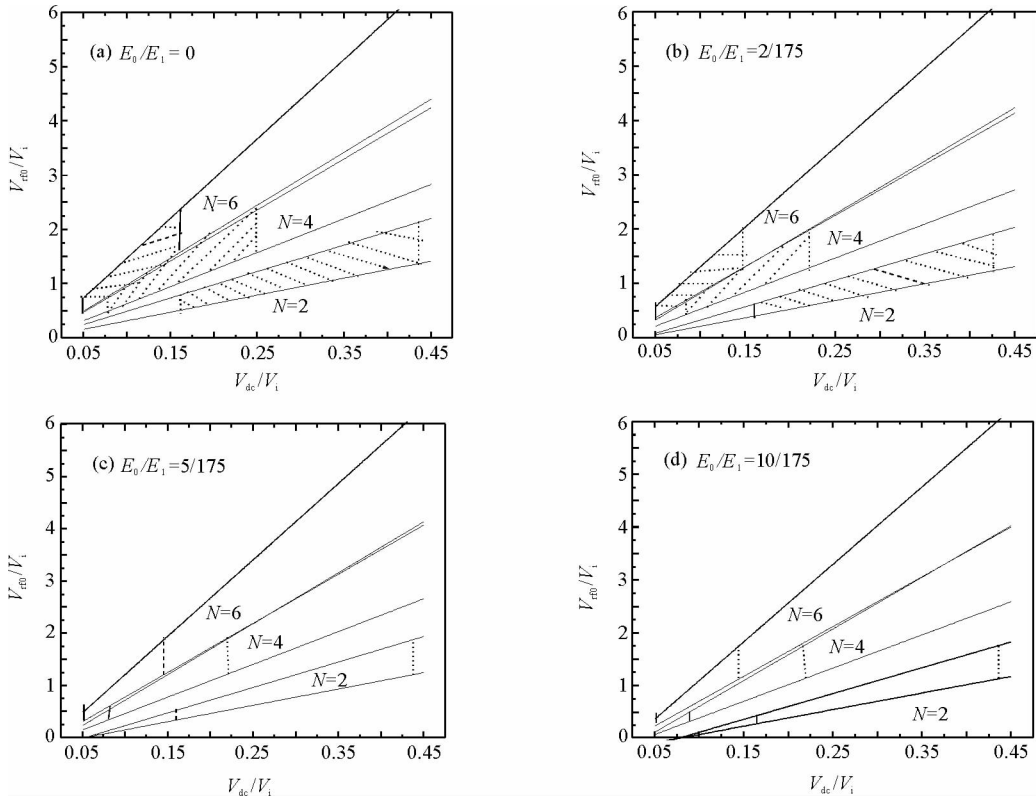


Fig. 4 Susceptibility curve of mutipactor occurring

图 4 次级电子倍增效应敏感曲线

令  $V_{rf} = v_{rf0}/\omega d$  为归一化的射频电压,共振方程可以写为

$$V_{rf} = 1/\cos\theta_0 [N\pi V_{dc}/2 - 1/\Theta] \tag{9}$$

对于一定的静电场  $V_{dc}$ , 满足共振条件的射频场  $V_{rf}$  有一个最大阈值  $V_{rf,max}$  和一个最小值  $V_{rf,min}$ 。由式(9)知,  $V_{rf,min}$  对应于  $\cos\theta_0 = 1$  处, 而  $V_{rf,max}$  则由最大位移限制曲线决定, 不同的参数  $\Theta$ , 最大射频场对应的电子初始相位是不一样的, 如图 5 所示。

考虑到实际微波器件的  $\Theta$  在几十到数百之间变化, 而当  $\Theta \approx 100$  时, 最大位移几乎对共振曲线没有限制作用<sup>[11]</sup>, 所以在  $\Theta$  比较大以后,  $V_{rf}$  最大阈值可以不予考虑。另外, 发生电子倍增, 电子撞击器壁的打击能量一定要介于二次电子激发率曲线上的  $E_1$  和  $E_2$  两个能量交叉点之间, 即打击速度满足

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{\omega t = N\pi + \theta_0} = N\pi \frac{eE_{dc}^x}{m\omega} - v_{0,x} \geq v_1 = \sqrt{2E_1/m} \tag{10}$$

或

$$V_{dc} \geq (k + 1)/(N\pi\Theta) \tag{11}$$

式中:  $k = v_1/v_{0,x}$ 。依据上述分析, 可以得出高阶共振模的最小归一化射频电压阈值与归一化直流电压的变化关系, 如图 6 所示, 由于取  $\Theta = 100$ , 所以图中没有最大射频电压阈值限制。随着共振阶数的提高, 能够发生次级电子倍增效应的射频场和静电直流场范围迅速减小, 也即发生次级电子倍增效应的敏感区域越小。

从发生次级电子倍增效应的各种敏感曲线看: (1) 与基阶共振模相比, 高阶共振模的敏感区域要小得多。因而, 对于相互作用腔/窗中的电子, 对次级电子倍增效应起主要作用的是基阶共振模, 也就是说, 对可能发生二次碰撞的种子电子, 电子倍增主要是在渡越时间为一个射频周期的二次打击中产生的, 而在渡越时间为两个或两个以上射频周期里的返回并打击器壁产生电子倍增的机会和作用都要小得多; (2) 与基阶共振模相同, 对各个高阶共振模而言, 电子初始能量越小, 发生次级电子倍增效应的敏感区域就越大, 并且电子掠入射 ( $v_{0,x}$  小,  $\Theta$  大) 时, 高阶共振模的敏感区域增大。

### 3 结 论

以 MILO 中发生次级电子倍增效应的单边模型和物理图像分析为基础, 本文对发生次级电子倍增效应的高阶共振模进行了计算和分析。结果表明: 与发生次级电子倍增效应的基阶共振模相比, 高阶共振模产生电子

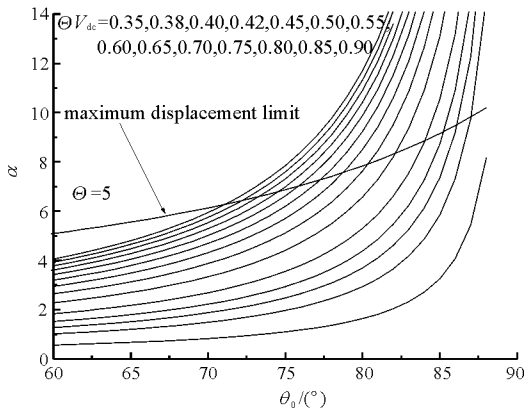


Fig. 5 Effect of maximum displacement limit on susceptibility curve

图 5 最大位移条件对共振曲线的限制作用

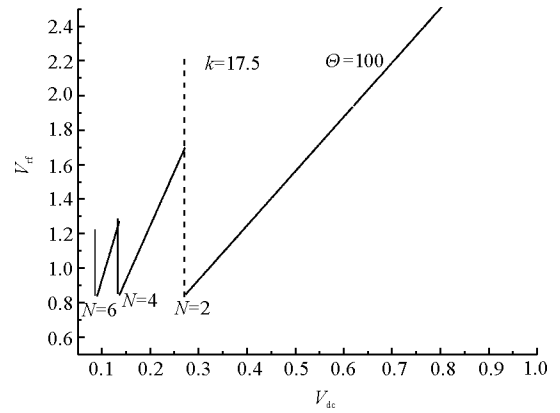


Fig. 6 Lower RF threshold voltage for higher-order modes

图 6 不同共振模的归一化射频电压最小阈值曲线

倍增效应的电子初始相位范围和射频场范围都要减小很多,所以对次级电子倍增效应起主要作用的是基阶共振模,减小和抑制次级电子倍增效应,主要要考虑控制和抑制基阶共振模的电子倍增作用。这对进一步研究抑制次级电子倍增效应和脉冲缩短是有参考价值的。

### 参考文献:

- [1] Vaughan J R M. Multipactor[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1988, **35**(7):1172-1180.
- [2] Gopinath V P, Verboncoeur J P, Birdsall C K. Multipactor electron discharge physics using an improved secondary emission mode[J]. *Phys of Plasmas*, 1998, **5**(5):1535-1540.
- [3] Kishek R, Lau Y Y. Interaction of multipactor discharge and rf circuit[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **75**(6):1218-1221.
- [4] Vaance E F. One-sided multipactor discharge modes[J]. *J Appl Phys*, 1963, **34**(11): 3237-3242.
- [5] Kishek P A, Lau Y Y, Ang L K, et al. Multipactor discharge on metals and dielectrics: historical review and recent theories[J]. *Phys of Plasmas*, 1998, **5**(5):2120-2126.
- [6] Blyachnan L G, Nechaev V E. Near-wall secondary-emission RF discharge in an insulating magnetic field[J]. *Zh T F*, 1984, **54**(11):2163-2168
- [7] Aqee F J. Evolution of pulse shortening research in narrow band high power microwave sources[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1998, **26**(3):235-245.
- [8] Drice D, Benford J N. General scaling of pulse shortening in explosive-emission-driven microwave sources[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1998, **26**(3):256-262.
- [9] Miller R B. Pulse shortening in high-peak-power tube[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1998, **26**(3):340-347.
- [10] Kim H C, Verboncoeur J P. Transition of window breakdown from vacuum multipactor discharge to rf plasma[J]. *Phys of Plasmas*, 2006, **13**(12):3506-3512.
- [11] 郝建红, 丁武, 董志伟. 磁绝缘传输线振荡器中的次级电子倍增现象[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4789-4794. (Hao J H, Ding W, Dong Z W. Mutipactor discharge in a magnetically insulated transmission line oscillator. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9): 4789-4794)
- [12] Semenov V, Kryazhev A, Anderson D, et al. Multipactor suppression in amplitude modulated radio frequency fields[J]. *Phys of Plasmas*, 2001, **8**(11): 5034-5039.

## Analysis of higher-order modes of multipactor in magnetically insulated transmission line oscillator

HAO Jian-hong, ZHAO Lian-qing

(College of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Based on the physical analysis of the multipactor for magnetically insulated transmission line oscillator (MILO), the higher-order resonance modes of multipactor in MILO are analyzed and calculated. The results show that the susceptibility region, in which the multipactor occurs, of the higher-order resonance modes is much smaller than that of the basic resonance mode, so the multipactor discharge is more importance of the basic mode than of the higher-order modes.

**Key words:** Magnetically insulated transmission line oscillator; Multipactor; Susceptibility curve; Resonance mode