



·高功率微波技术·

# 多脉冲磁绝缘线振荡器阴极释气电离仿真研究\*

杨郁林, 董志伟, 孙会芳, 杨温渊, 张芳

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 在磁绝缘线振荡器(MILO)阴极释气电离物理建模技术以及三维自洽运算基础上,研究了残存气体脉冲缩短,并分析了释气电离对多脉冲 MILO 运行的影响。把多脉冲释气分为脉冲内阴极释气脉冲间残余气体累积两个部分,研究了不同释气率以及残余气体对整个器件的运行产生影响。计算结果表明,多脉冲运行 MILO 最主要影响因素是释气后电离产生的正离子,当正离子密度超过发射电子密度时,束波相互作用被破坏。

**关键词:** 磁绝缘线振荡器; 释气; 电子碰撞激发; 电离

中图分类号: TN752.5

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210121

## Physical modeling and particle simulation technology of multi-pulse MILO cathode outgassing ionization

Yang Yulin, Dong Zhiwei, Sun Huifang, Yang Wenyuan, Zhang Fang

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The commutation phenomena produced by cathode outgassing ionization is a possible factor to limit work performance of magnetically insulated transmission line oscillator (MILO), and also is the main obstacle to limit its repeat frequency. In this paper, physical modeling technology of MILO cathode outgassing ionization phenomena and three-dimensional particle simulation are presented. The relation between remaining gas of previous outgassing and pulse duration is analyzed. When the number of positive ions is greater than that of electrons the plasma caused by the ionization will rapidly reduce microwave output power.

**Key words:** magnetically insulated transmission line oscillator; outgassing; electron impact excitation; ionization

随高功率微波输出特性的持续改进和人们对制约其性能提高的各种物理问题研究和认识的不断深化,相关物理建模以及数值模拟技术不断探索与改进<sup>[1]</sup>,尤其是对于长脉冲以及多脉冲运行的影响。低阻抗高功率微波器件磁绝缘线振荡器(MILO)<sup>[2-3]</sup>是一种典型的低阻抗高功率微波器件,阴极材料一般采用的是天鹅绒等,它具有较强的气体吸附能力,在高场强作用下发射电子的同时也会出现脉冲放气,严重的不仅会导致系统真空度变差,影响器件性能,而且也严重地影响了重频运行<sup>[4-5]</sup>。对于单脉冲阴极释放的气体与电子产生碰撞电离,在阴极释气电离相关的建模与数值模拟技术基础上<sup>[6-7]</sup>模拟了释气电离对 MILO 器件性能的影响<sup>[8]</sup>,得到了不同释气率对 MILO 器件运行的一些规律。本文主要研究 MILO 多脉冲运行时阴极释气的影响。

### 1 阴极释气电离的物理建模与粒子模拟技术

我们对于阴极释气电离的物理建模和数值模拟用到了以下的假设:(1)首先假定在阴极表面附近存在着厚度为一个网格的中性粒子释气层,随阴极电子发射而在释气网格层中均匀产生释气分子;(2)中性气体分子将作随机无规律运动,其平均动能由阴极表面温度决定。释气分子逐渐向相互作用区热扩散;(3)发射电子(宏电子粒子,简称电子)与释气中性气体分子发生碰撞;(4)碰撞过程包括了电子碰撞电离、电子碰撞激发以及电子与分子间的弹性碰撞,并假设释气分子由氮气组成。

\* 收稿日期:2021-03-30; 修订日期:2021-06-23  
基金项目:国家自然科学基金项目(11875094)  
联系方式:杨郁林, yang\_yulin@iapcm.ac.cn.

由于本文计算的是多脉冲, 气体分子可以分为产生与扩散过程两个过程, 每个脉冲由于阴极电子发射而在阴极表面释放气体, 释气分子以热运动速度在向真空区扩散。常温下分子的热运动平均速度约 460 m/s, 每个脉冲内新产生的释气层非常薄。而脉冲间隔一般在 10 ms 左右, 由前一个脉冲产生的释气, 认为它通过扩散可以均匀充满整个器件, 本文用在下一个脉冲前在计算区域加载均匀气体的方法模拟这个过程。这样将气体分为两部分, 一部分是随电子发射释放的气体, 另一部分是上一个脉冲释气残存的气体。

电子碰撞电离以及电子碰撞激发等产生的二次电子或者离子, 在电场作用下被加速, 分别达到阳极或者阴极被金属吸收。如果脉冲间隔小, 就有可能存在电子以及离子的残存, 影响下一个脉冲的运行, 而实际上, 由于脉冲间隔时间长, 电子或者离子有足够的时间达到阳极或者阴极被金属吸收。完全模拟脉冲间隔这个过程, 既没必要也浪费了计算资源, 我们在脉冲间人为地增加了一个负电压, 目的是使电离出来的离子或者二次电子快速脱离计算区域, 所需要计算脉冲间隔时间可以大大缩短, 从而节约大量的计算时间。

## 2 初步的数值模拟结果

以 L 波段磁绝缘线振荡器 MILO 为例, 该模拟器件的基本运行参数为: 电压 500 kV, 阴极发射电流约 60 kA, 输出频率为 1.6 GHz, 峰值微波功率接近 4.0 GW。

图 1 给出了 MILO 的结构剖面图, 其中假设释气层置于阴极表面外一个网格层内, 且只在阴极发射区域外存在。

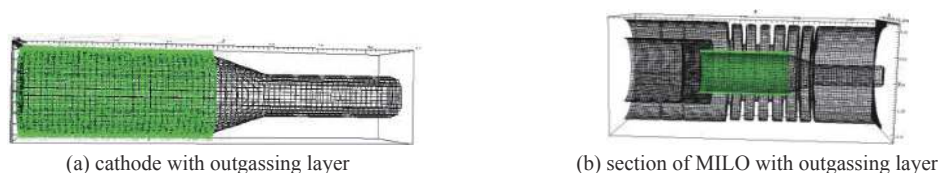


Fig. 1 Model of L-MILO with outgassing layer (green)

图 1 含有释气层(绿色)的 L-MILO 结构剖面图

我们假定释放的气体通过热运动均匀充斥整个器件中, 计算中, 每过一个脉冲周期, 根据发射速率, 加入一个均匀分布的气体。图 2 给出了均匀充斥释气分子 MILO 的结构剖面图。

为了计算方便, 我们把阴极直接释气和填充气体定义为两种计算粒子 N2 与 N3 粒子(只是为了计算时区分), 粒子的物理属性都是一样为氮气分子( $N_2$ ), 与电子碰撞电离都产生氮离子与二次电子, 本模型中没有考虑二次电子与气体分子的再次电离。

### 2.1 残存气体对 MILO 运行的影响

无论是阴极释气还是气体残留都会对 MILO 运行产生影响, 我们先研究了残留气体对 MILO 的影响, 残余气体最典型的表现就是脉冲缩短。图 3 给出了 MILO 不同残留氮气气体密度为  $2.51 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、 $5.02 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、 $2.51 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、 $5.02 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  时输出功率随时间变化图。从图 3 中可以看出, 随着残留气体密度的增加, 脉冲缩短时间越来越短。

表 1 给出了不同残余气体密度时不同脉冲缩短时间。可以看出, 随着残余气体分子密度的增加, 脉冲缩短的时间也越来越短, 当残余气体分子密度大于  $2.51 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  (相当于常温下 0.5 Pa) 脉冲宽度迅速缩短。

图 4 给出残留气体密度为  $1.004 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、 $t=6 \text{ ns}$  和  $t=20 \text{ ns}$  时, 正离子与电子的空间分布图, 其中红色为正离子, 蓝色为电子。从图 4 可以看出, 在 6 ns 时电子还能正常群聚, 随着正离子不断增加, 破坏了电子的群聚, 最终导致束波互作用过程的终止, 从而导致了脉冲宽度缩短。

要保障 MILO 多脉冲运行, 至少要让残留气体密度引起脉冲缩短时间高于每个脉冲宽度, 否则就会导致多脉冲运行不稳定。

脉冲缩短因素很多, 最主要的原因有两种: 一种是残存气体密度比较大的时候, 电子与气体碰撞电离, 由于在

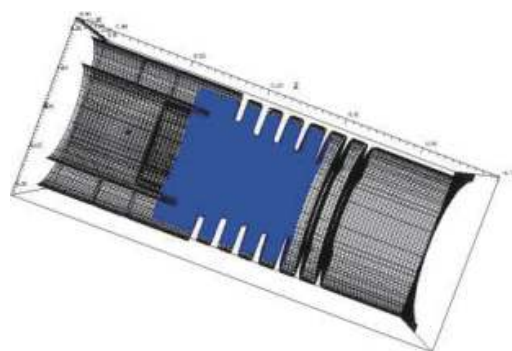


Fig. 2 Model of L-MILO filled with gas (blue)

图 2 填充释气(blue)的 L-MILO 结构剖面图

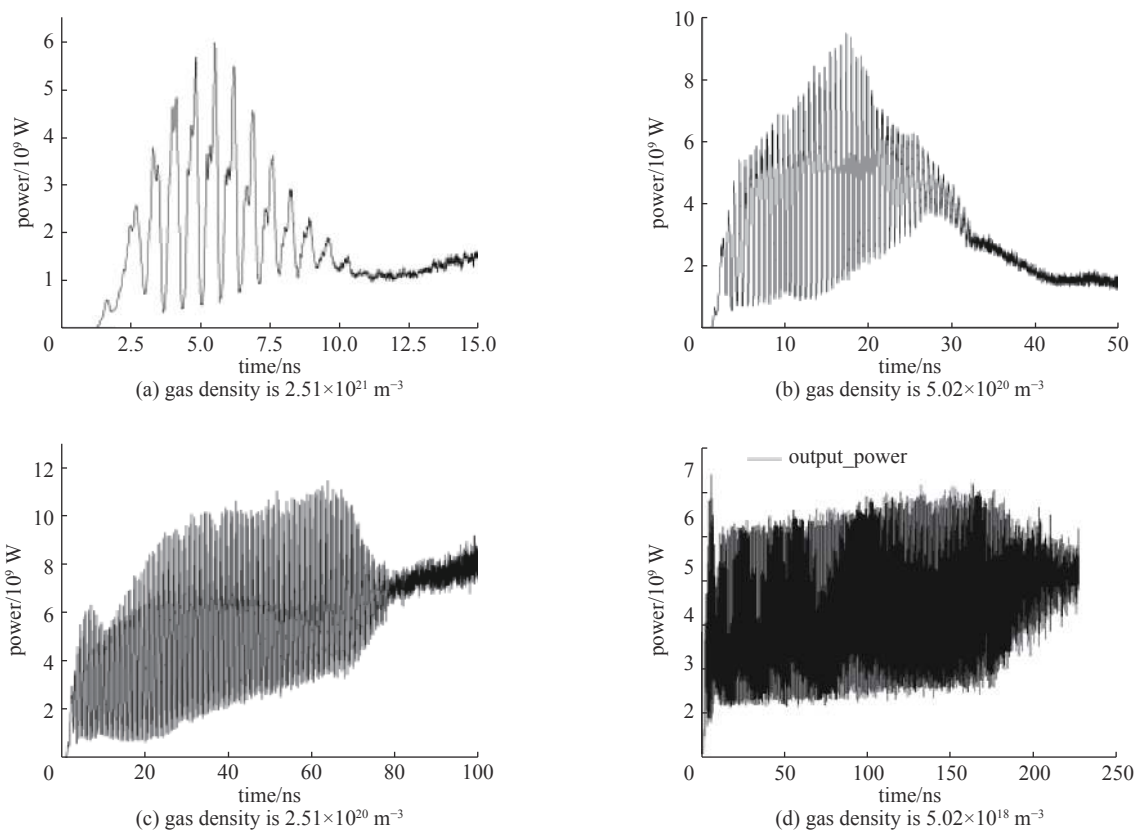


Fig. 3 Output power vs time for different gas density

图3 不同残余气体密度对输出功率随时间变化图

电场中运动, 电子的速度远远大于正离子的速度, 这样就会导致正离子在整个器件中不断被积累。当积累的正离子密度大于电子的密度时, 导致束波相互作用过程的终止, 从而产生脉冲缩短现象。

还有一种是残存气体密度低的时候, 由于正离子的积累, 它会最终影响电子的调制。图5为系统电子与气体电离离子数随时间变化关系图。从图5(c)可以看出, 电子调制越来越弱, 进而导致束波相互作用过程终止, 从而产生脉冲缩短现象。

电子束的空间电荷中和度 $f_c$ 定义为

$$f_c = n_i / (n_b + n_{se}) \quad (1)$$

式中:  $n_i$ 是离子密度;  $n_b$ 为电子束密度;  $n_{se}$ 是二次电子密度。

图6给出了气体密度  $5.02 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  中性化因子 $f_c$ 随时间的变化以及归一化周期平均功率随时间的变化图。从图6可以看出, 随着时间的增加, 中性化因子超过 1.0 以后, 导致输出功率迅速下降产生脉冲缩短。

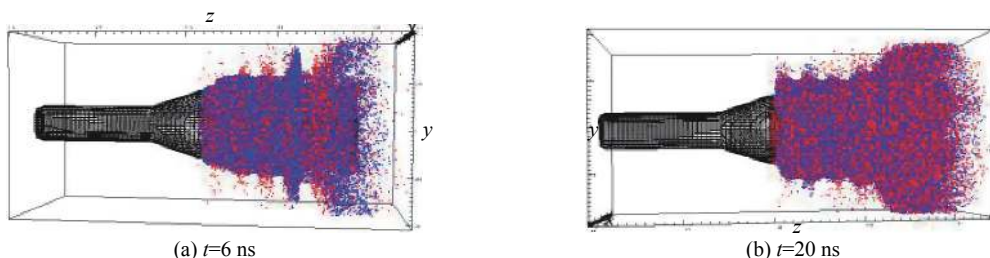


Fig. 4 Distribution of positive ions (red) and electrons (blue)

图4 正离子与电子空间分布图

表1 不同密度残余气体脉冲缩短时间

Table 1 Different remaining gas density vs pulse shorten time

gas density/ $\text{m}^{-3}$	pulse shorten time/ns
$5.02 \times 10^{21}$	3
$2.51 \times 10^{21}$	5
$1.004 \times 10^{21}$	10
$5.02 \times 10^{20}$	20
$2.51 \times 10^{20}$	70
$5.02 \times 10^{19}$	95
$2.51 \times 10^{19}$	105
$5.02 \times 10^{18}$	175
$5.02 \times 10^{17}$	220

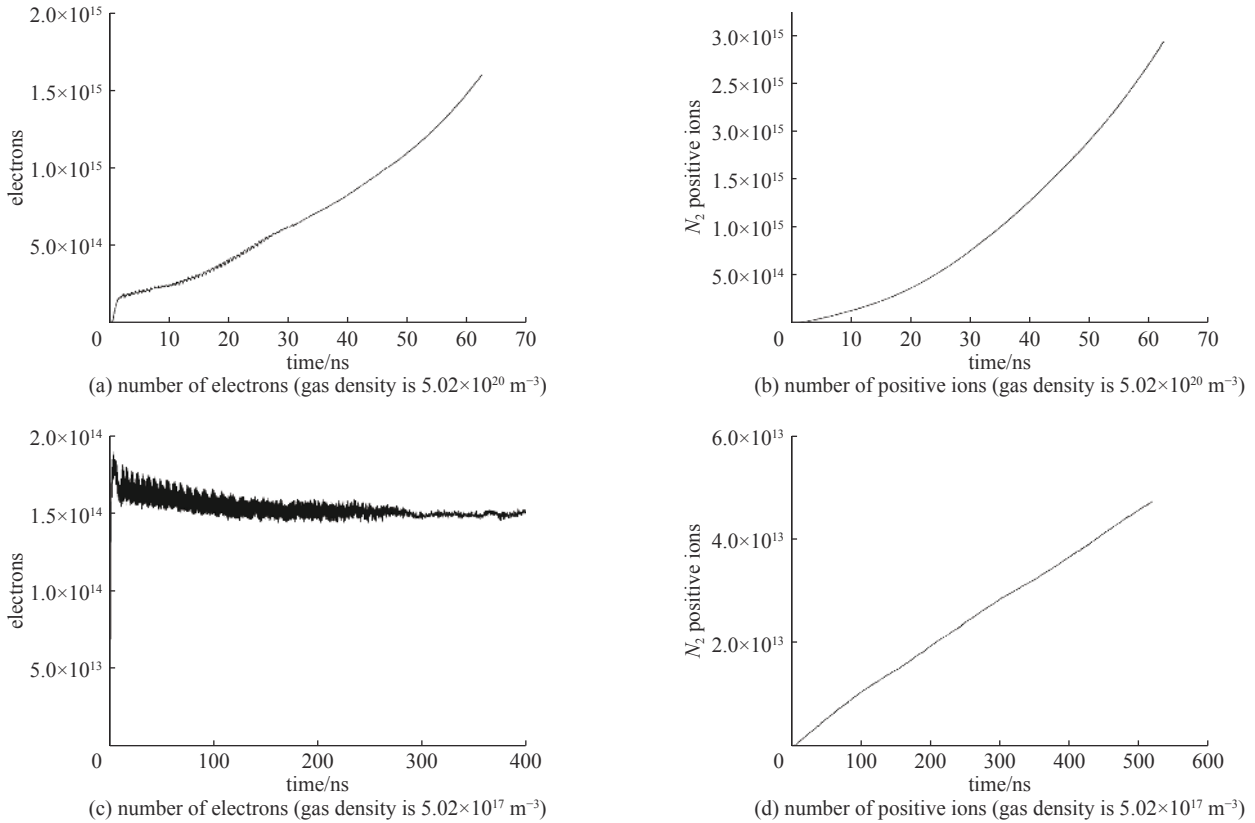


Fig. 5 Number of electrons and positive ions produced by  $N_2$  ionization vs time

图 5 系统电子与气体电离离子数随时间变化关系图

### 2.2 电子发射与释气

根据实验观察,在高功率微波器件运行中天鹅绒阴极每发射一个电子就将发射几个甚至数十个吸附气体分子,对于上述选定的模型受计算资源限制,典型脉冲宽度为 20 ns,脉间距为 30 ns,为了在脉间让氮离子不对下一个脉冲产生影响,我们加了一个较高的负电压。

相对释气率定义为每发射一个电子所放出的吸附气体分子个数,即( $N_N/N_e$ ),我们对释气率为 10 情况进行了模拟计算,典型的电压、电流、氮气分子的宏粒子演化关系如图 7 所示。

$N_2$  按照释气率为 10 产生,  $N_3$  是在每次脉冲开始前用注入方式填充整个计算区域,注入的量与前一脉冲释放的气体总量基本相当,这样模拟了多脉冲运行系统的释气以及分子扩散过程。从图 7 也可以看出,输入电压稍微有所下降,而发射电流略微增加,而调制的幅度在减小。

### 2.3 气体分子碰撞电离

无论是残留的气体还是阴极释气产生的气体,阴极发射的电子在其向阳极加速运动以及与高频电磁场的相互作用过程中会与气体分子发生弹性和非弹性相互作用,导致正离子和次级电子产生。为了节省计算资源,氮气分子、氮气正离子、发射电子以及碰撞电离产生的二次电子都由可变权重的宏粒子来描述。图 8 给出了相对释气率为 10 时,  $t=60$  ns 时释气层氮气分子以及填充的氮气分子电离产生的正离子和二次电子的空间分布。从图 8 可以看出,在  $t=60$  ns 由气体分子电离正离子层充满在整个互作用空间,而由二次电子质量较小,电离产生的二次电子分布和一次电子分布类似,有一定的群聚。随着气体分子越聚越多,氮气分子电离正离子和二次电子也越来越多。

图 9 分别给出了电子在  $t=60$  ns 和  $t=410$  ns 电子的空间分布图。从图中可以看出,前者电子能够很好地群聚,而  $t=410$  ns 时候,电子由于正离子与二次电子的影响,不能很好地群聚,从而导致束波相互作用过程的终止。

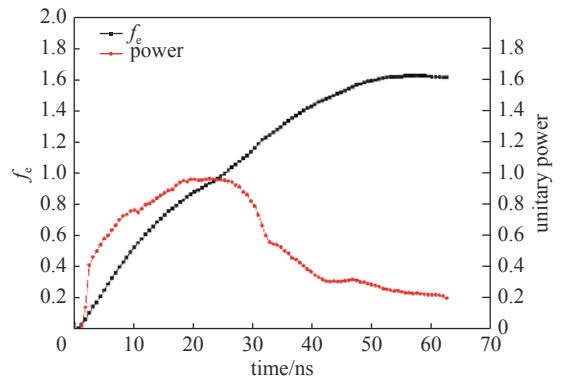


Fig. 6 Charge neutralization factor  $f_c$  and unitary power vs time

图 6 中性化因子以及归一化周期平均功率随时间变化图

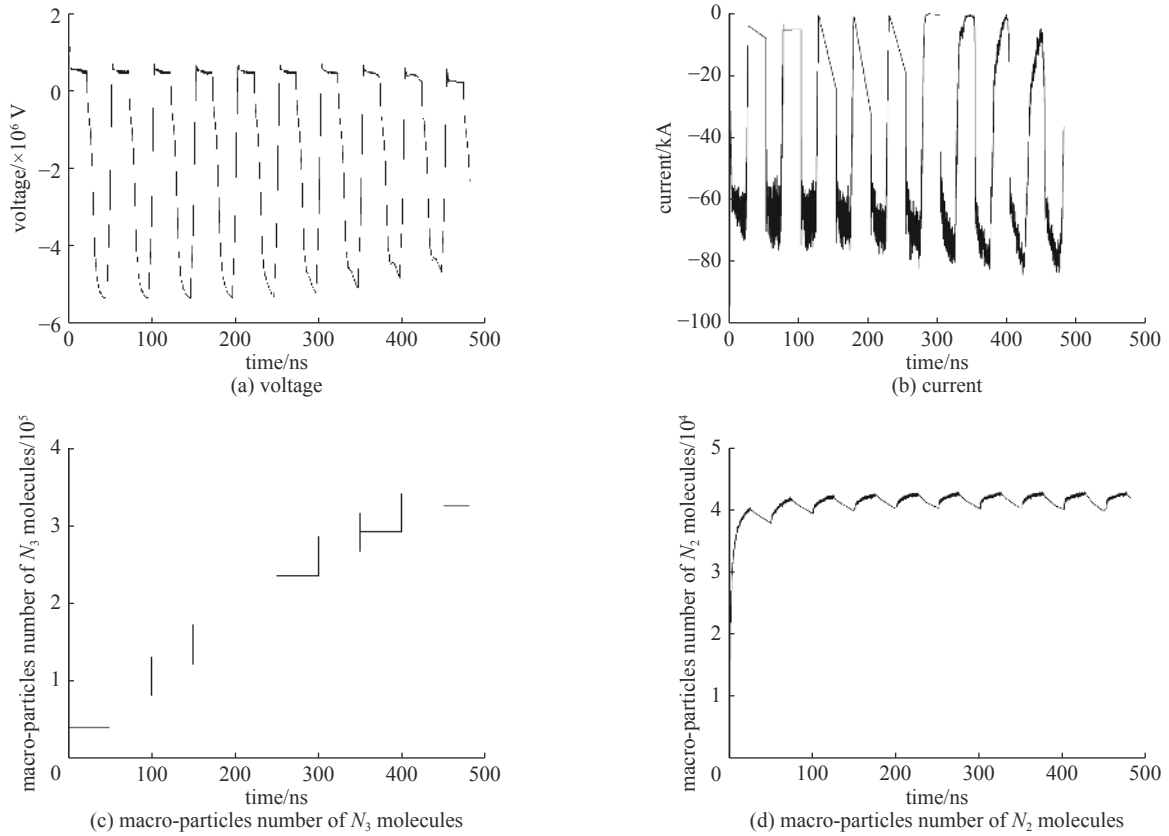


Fig. 7 The classical waveform of input voltage, current in the L-MILO and the waveform of number of macro-particles both of electrons and  $N_2$  molecules,  $N_3$  molecules when relative outgassing rate is 10

图 7 L-MILO 典型的输入电压、电流以及相对释气率 10 时电子和氮气分子的宏粒子数波形图

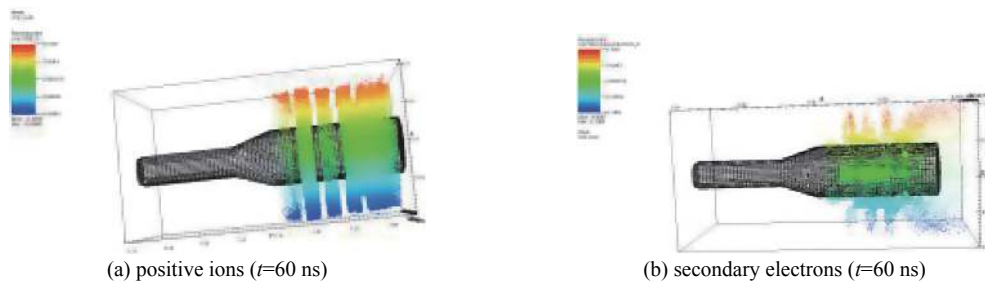


Fig. 8 Distribution of positive ions and secondary electrons produced by  $N_2$  ionization when relative outgassing rate is 10

图 8 相对释气率为 10 时氮气分子电离产生的正离子和二次电子的空间分布

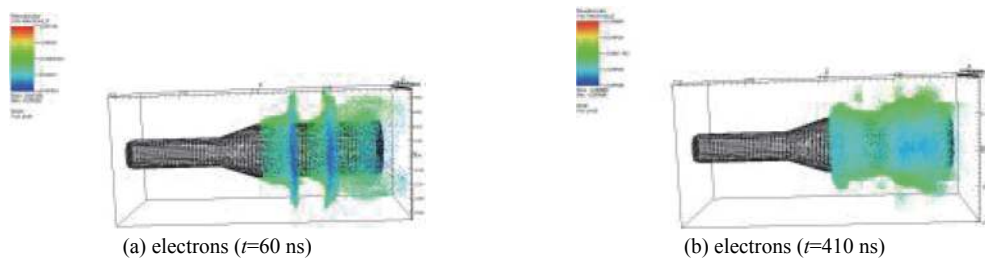


Fig. 9 Distribution of electrons produced by cathode

图 9 MILO 电子的空间分布

## 2.4 释气分子电离对 MILO 输出特性的影响

图 10 给出了相对释气率为 10 的 MILO 器件的电流、正离子宏粒子数和电子宏粒子数以及输出的微波峰值功率。

从模拟结果可以推断出：(1) 微量的释气气体电离, 反而使微波功率略有增加; 而当释气层气体大量释放、形

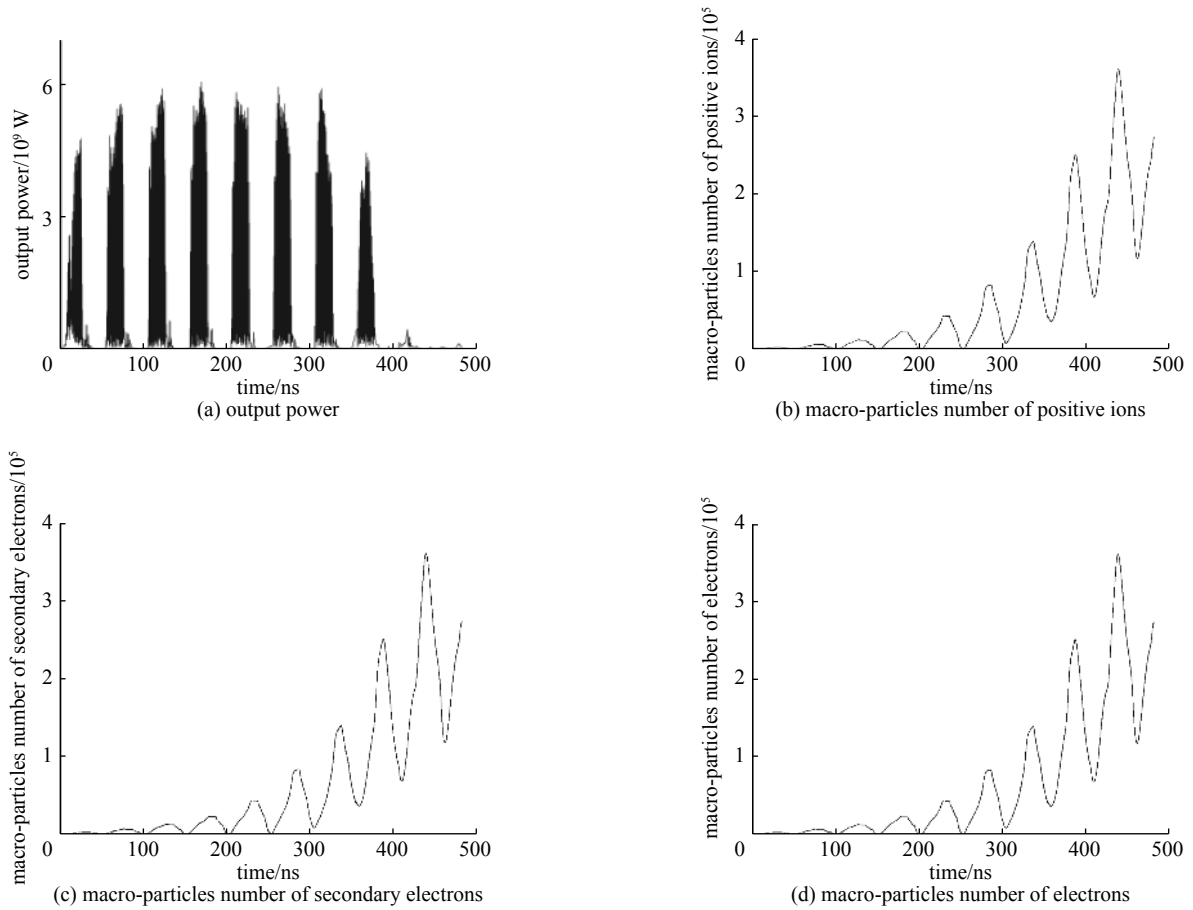


Fig. 10 Waveforms when relative outgassing rate is 10 with negative voltage

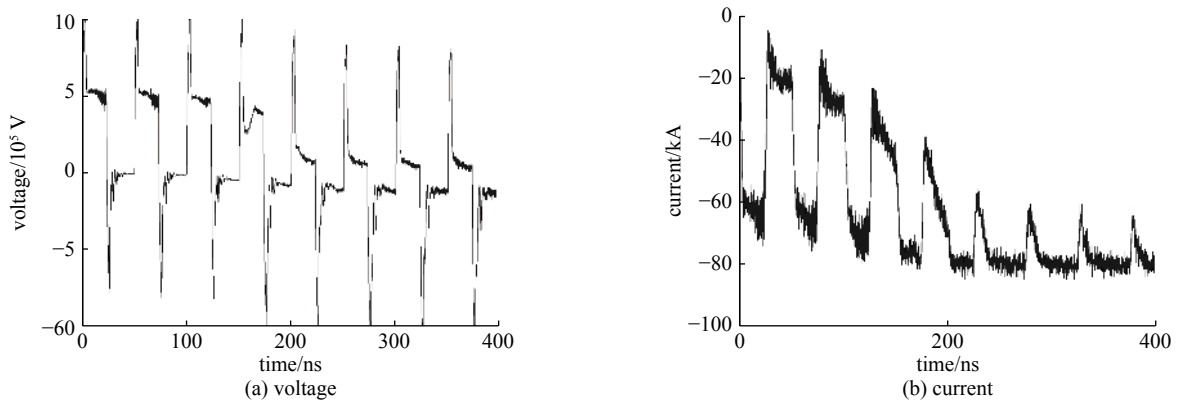
图 10 脉间加负电压时相对释气率为 10 输出功率、电流以及正离子宏粒子数和二次电子, 电子宏粒子数(含发射一次电子和电离的二次电子)随时间的演化关系

成足够数量的正离子时,微波功率会快速下降;(2)随着释气分子密度的增加,电离的离子和二次电子也在迅速增加最后导致束波相互作用机制遭到破坏。

图 11 给出了脉冲间隔不加负压时电压随时间变化图(a)、电流随时间变化图(b)以及输出功率(c)、正离子宏粒子数(d)、二次电子宏粒子数(e)、电子宏粒子数(f)随时间变化图。

从图 11 可以看出,气体电离产生的正离子在不断的积累增加,它对输入电压和电流影响也在加大,并很快导致束波相互作用机制遭到破坏。

图 12 给出了中性化因子以及归一化平均功率随时间变化图,从中可以看出,不加负压的时候,输出功率随正离子的积累很快就导致不能输出,加负压的时候,由于正离子被驱除能保持一定的稳定输出,随脉冲次数增加,积累的释气分子也会增加,碰撞电离产生的正离子也逐步增加。当中心化因子  $f_e > 1.0$  时候,都会导致微波振荡终止,从而导致不能输出微波功率。



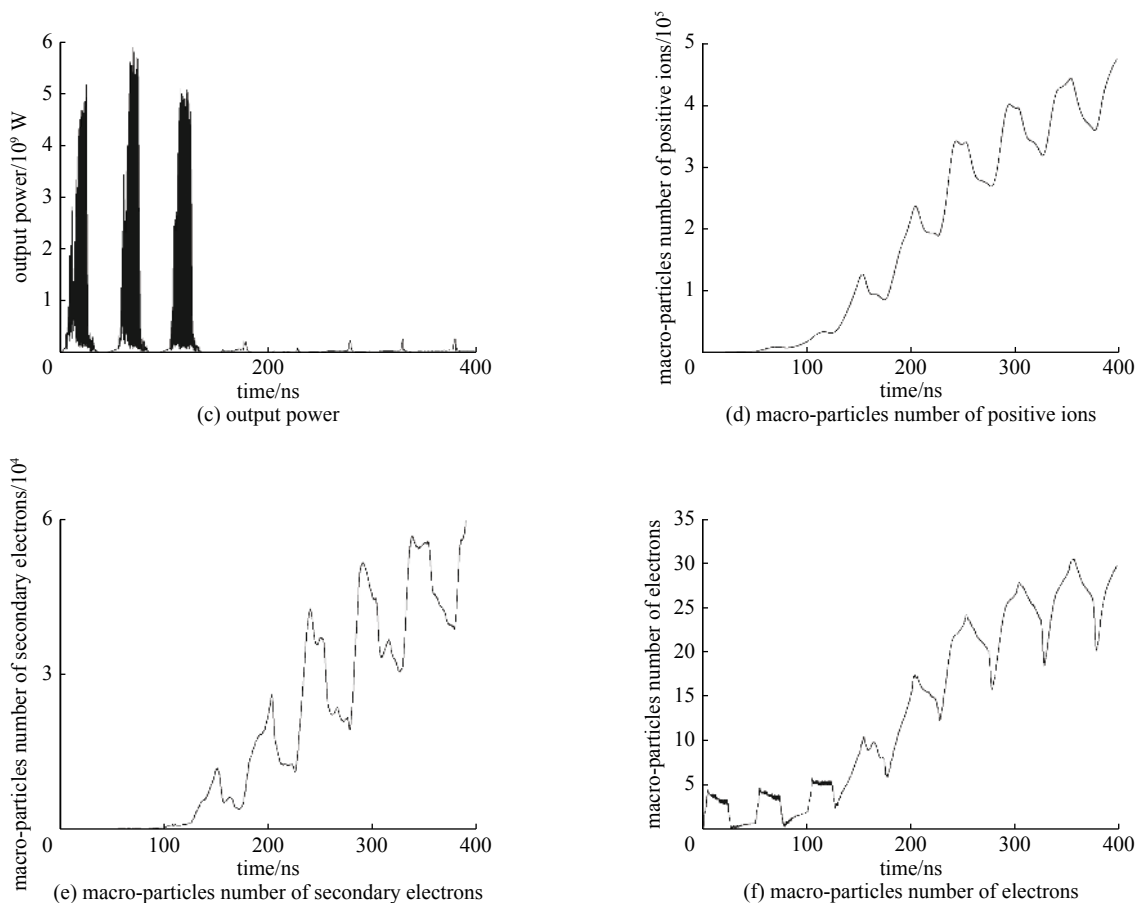


Fig. 11 Waveforms when relative outgassing rate is 10 without negative voltage

图 11 脉间不加负电压时, 相对释气率为 10 时的输出功率、电流以及正离子宏粒子数和二次电子, 电子宏粒子数(含发射一次电子和电离的二次电子)随时间的演化关系

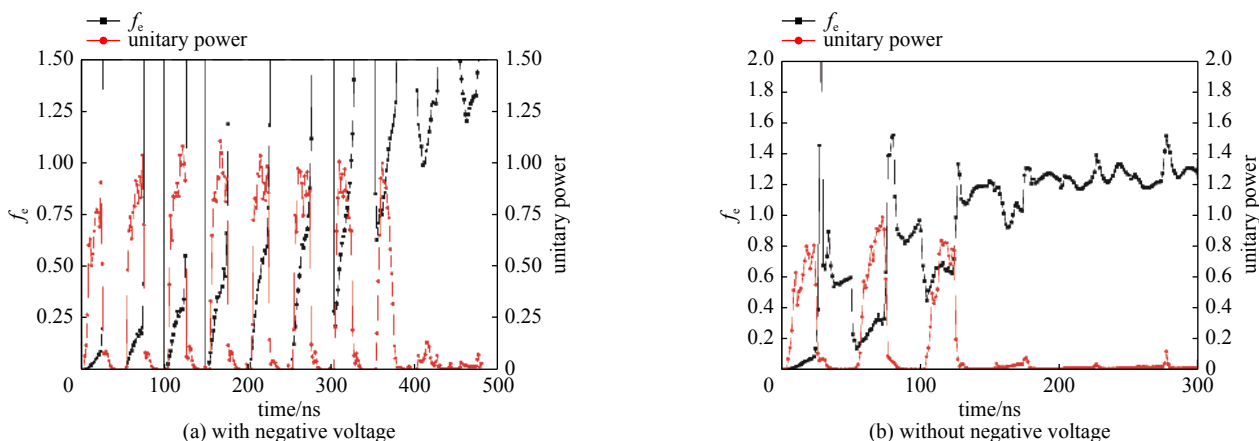


Fig. 12 Repeat frequency MILO charge neutralization factor  $f_e$  and unitary power vs time

图 12 多脉冲中性化因子以及归一化周期平均功率随时间变化图

### 3 结论

阴极释气电离产生的击穿现象是限制 MILO 工作性能的一个可能因素也是限制其重频运行的主要障碍。为了模拟考察阴极释气电离现象对多脉冲 HPMs 工作特性的影响, 开展了相关的物理建模技术以及粒子模拟技术研究: (1) 在阴极表面建立一个网格层厚的释气层, 用宏粒子来描述释气分子, 并将释气分子数与发射电子数相联系; (2) 在下一个脉冲, 我们认为释放的气体粒子均匀充满了相互作用空间, 直接充一定密度的气体来实现这一过程; (3) 为了节约计算资源, 我们用脉间加负电压驱除正离子来快速消除正离子的影响。由研究可知: 阴极释气电离是导致长脉冲或者多脉冲运行不稳定的一个重要因素, 主要是碰撞电离后产生的正离子影响比较大, 尤其是对

于多脉冲, 随气体分子的积累, 气体电离的正离子密度大于电子密度, 也就是中性化因子 $f_e$ 大于1.0时, 系统的束波相互作用会快速终止。

#### 参考文献:

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. 高功率微波源与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies. Beijing: Tsinghua University Press, 2005)
- [2] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, 26(3): 698-713.
- [3] Yang Wenyuan. Numerical study of a simply constructed magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 2008, 36(5): 2801-2804.
- [4] Yang Wenyuan, Dong Ye, Dong Zhiwei, et al. Brief introduction and recent applications of a large-scale parallel three-dimensional PIC code named NEPTUNE3D[J]. *IEEE Trans Plasma Sci.*, 2002, 30(7): 1937-1944.
- [5] 荀涛, 张建德, 舒挺, 等. 强流真空二极管材料放气特性研究[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(5): 141-144. (Xun Tao, Zhang Jiande, Shu Ting, et al. Investigation of outgassing characteristic for a high-current vacuum diode[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(5): 141-144)
- [6] [http://www.btigroup.com/p\\_1\\_1.asp](http://www.btigroup.com/p_1_1.asp).
- [7] [http://www.btigroup.com/p\\_7.asp](http://www.btigroup.com/p_7.asp).
- [8] 董志伟, 孙会芳, 杨郁林, 等. 磁绝缘线振荡器阴极释气电离粒子模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 033023. (Dong Zhiwei, Sun Huifang, Yang Yulin, et al. Particle simulation technology of MILO cathode outgassing ionization[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 033023)