

# 电子弛豫过程对重复频率高功率微波大气击穿的影响\*

胡 涛<sup>1,2</sup>, 周东方<sup>1</sup>, 李庆荣<sup>1</sup>, 牛忠霞<sup>1</sup>

(1. 信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002; 2. 解放军 61085 部队, 杭州 311200)

**摘 要:** 研究了重复频率高功率微波脉冲作用下的大气击穿。分析了重复频率脉冲作用下电子的弛豫过程,对脉冲间隔时间内电子温度和自由电子密度的变化规律进行了研究,得出了电子温度弛豫时间远小于电子密度弛豫时间的结论。分析了电子弛豫过程的附着效应和复合效应,给出了高功率微波重复频率脉冲作用下发生大气击穿的条件和重复频率高功率微波大气击穿的电子数密度方程。

**关键词:** 高功率微波; 电子弛豫过程; 重复频率; 大气击穿

**中图分类号:** TN011.2 **文献标志码:** A

对于单脉冲而言,由于脉冲作用期间电子的产生速度大于电子的损失速度,因此分析大气击穿现象只考虑了大气的电离作用<sup>[1-3]</sup>。但对连续脉冲来说,在两个脉冲之间由于无外加电场的作用,自由电子数密度不再增加,相反,此时电子的附着、复合反应将使自由电子数密度迅速减少,从而影响下一个脉冲作用时大气的初始电子数密度,并对后续脉冲的传播产生一定的影响。因此,在重复频率高功率微波(HPM)脉冲大气击穿研究中,必须考虑自由电子的弛豫过程。

## 1 自由电子的弛豫过程

在静电力的作用下,自由电子趋于与大气中的正离子复合重新形成中性分子或原子,这一过程叫做“复合反应”,它将导致自由电子数密度减小

$$\partial N_e / \partial t = -\nu_r N_e = -aN_e^2 \quad (1)$$

式中: $N_e$  为电子数密度; $a$  为电子的复合系数,它与外加电场、电子温度和电子本身的密度相关,在电离层 E 区, $N_e$  约为  $10^{11} \text{ m}^{-3}$ , $a$  约为  $10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

如果 HPM 重复频率脉冲为理想的矩形脉冲,则两脉冲间隔之间无电场作用,电子的复合频率  $\nu_r$  将主要由电子温度  $T_e/\text{eV}$  和电子数密度决定<sup>[4-5]</sup>,表达式为

$$\nu_r = aN_e = N_e(4.8T_e^{-0.39} + 2.1T_e^{-0.63}) \times 10^{-14} \quad (2)$$

但是在静电力的作用下,自由电子会趋于附着到中性粒子上形成负离子,这一过程叫做“附着效应”,它将导致自由电子数密度减小

$$\partial N_e / \partial t = -\nu_a N_e = -\beta NN_e \quad (3)$$

式中: $\beta$  为电子的附着系数; $N$  为大气中的中性粒子数密度;电子附着频率  $\nu_a$  主要与外加电场、大气密度和电子温度相关。在电离层 E 区, $N$  约为  $10^{24} \text{ m}^{-3}$ , $\beta$  约为  $10^{-20} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

如果 HPM 重复频率脉冲为理想的矩形脉冲,则两脉冲间隔之间无电场作用,电子的附着频率将主要由大气密度和电子温度决定,即

$$\nu_a = 8.3 \times 10^6 p / T_e^{1.5} \times e^{-6.7/T_e} + 3.98 p^2 / T_e^{1.5} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,电子附着频率与大气压强成正比,与电子温度的关系则比较复杂。

## 2 弛豫过程中的电子温度

在一个 HPM 脉冲作用结束后,电子经过强电场的加速作用将具有很高的能量,由于它与背景大气间的温度存在着极大的差异,一部分能量将通过碰撞而传递给中性粒子,从而电子温度随着碰撞作用迅速下降。如果电子的弛豫时间足够长,这种下降将一直持续下去,直到电子与中性粒子间的碰撞没有能量传递、达到平衡状

\* 收稿日期:2008-10-09; 修订日期:2009-02-12

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:胡 涛(1976—),男,安徽桐城人,主要从事高功率微波技术研究;hu\_tao\_tao@sohu.com。

态时为止。根据 Landau 方程可知,电子温度  $T_e$  为

$$dT_e/dt = -\delta\nu_m(T_e - T) \quad (5)$$

式中: $T$  为背景大气或中性粒子的温度; $\delta$  为电子与各类中性粒子一次碰撞中所损失能量的平均数; $\nu_m$  为电子的碰撞频率。对于两个脉冲间隔内无外加电场作用时,电子的碰撞频率主要由电子温度和大气中的中性分子数密度决定。在弱电离的等离子体中,以  $T_s=1$  eV 为分界线来定义电子能量的高低。

当  $T_s > 1$  eV 时为高电子能量,电子碰撞频率由经验公式可近似为<sup>[4-5]</sup>

$$\nu_m \approx 1.8 \times 10^{-13} N_n \sqrt{T_e} \quad (6)$$

当  $T_s < 1$  eV 时为低电子能量,电子碰撞频率由经验公式可近似为

$$\nu_m \approx 1.8 \times 10^{-13} N_n T_e \quad (7)$$

式中: $N_n$  为背景大气中的中性分子数密度。

将式(6)和式(7)分别代入式(5)可得

$$T_e = \frac{T_{e0} - T}{(1 + 0.98 \times 10^{-16} N_n t \sqrt{T_{e0} - T})^2} + T, \quad T_e > 1 \text{ eV} \quad (8)$$

$$T_e = \frac{T}{1 + (T/T_{e0} - 1)e^{(-1.96 \times 10^{-16} N_n T t)}}, \quad T_e < 1 \text{ eV} \quad (9)$$

式中: $T_{e0}$  为  $t=0$  时电子的初始温度。

取海拔 30 km 和 60 km 高度,对应的中性气体分子数密度分别为  $3.828 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$  和  $6.361 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,背景大气温度分别为 226 K 和 255 K,即分别为 0.019 49 eV 和 0.021 99 eV,则弛豫过程中电子温度随时间变化关系如图 1 和图 2 所示。

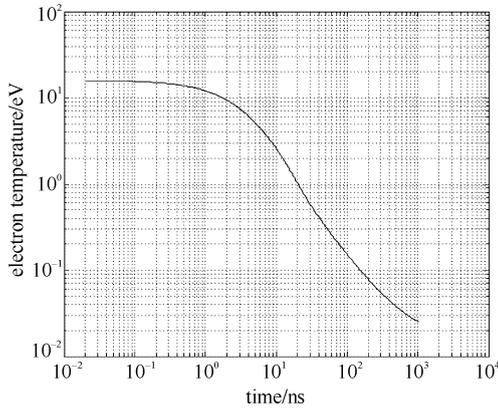


Fig. 1 Relation of electron temperature and time at 30 km altitude

图 1 30 km 处电子温度与时间关系

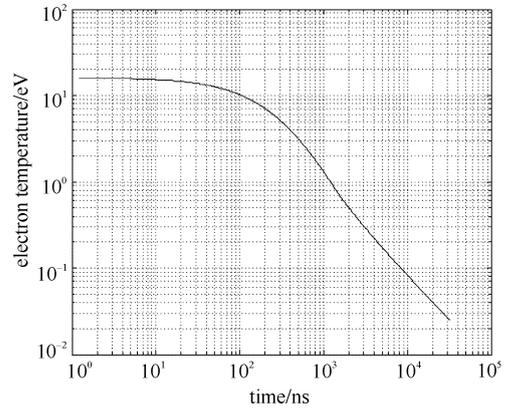


Fig. 2 Relation of electron temperature and time at 60 km altitude

图 2 60 km 处电子温度与时间关系

图 1 中,电子温度从 16 eV 下降到 1 eV 只需要 20.25 ns,而从 1 eV 下降到平衡状态(背景大气温度)时需要 1 020.75 ns。而图 2 中,它们的时间分别是 1 203.1 ns 和 31 280.9 ns。即如果有足够的脉冲间隔时间,弛豫过程中电子温度将迅速下降,其下降过程分两个阶段,但从高温下降到 1 eV 时所需的时间远远小于从 1 eV 下降到平衡状态时所需要的时间。从图中还可以看出,高度越高,电子温度从 16 eV 下降到平衡态所用的时间越长。这是因为高度越高,大气中分子数密度越小,自由电子与分子之间碰撞越少。

### 3 HPM 重复脉冲作用下的电子数密度方程

对于 HPM 重复频率脉冲的大气传输过程,可以先考虑一个脉冲周期内脉冲作用过程中和脉冲间隔内电子数密度的变化情况,再扩展到通过任意个脉冲时的情况。

HPM 重复频率脉冲在脉冲作用时间内的电子数密度方程为

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = \nu_i N_e - \nu_r N_e - \nu_a N_e = \nu_i N_e - \nu_a N_e - a N_e^2 \quad (10)$$

这里略去了天然电离源产生的电离强度和电子的扩散,把复合频率和附着频率代入式(10)并求解可得脉冲作用过程中的电子数密度为

$$N_e = \frac{n_{e0}(\nu_i - \nu_a)}{(\nu_i - \nu_a - n_{e0}a)e^{(\nu_a - \nu_i)t} + n_{e0}a} \quad (11)$$

式中:  $n_{e0}$  为自然条件下大气中的自由电子数密度;  $\nu_i$  为微波脉冲作用下的电离频率。在脉冲作用期间内, 大气的电离起主要作用,  $\nu_a$  和  $n_{e0}$  可以忽略不计, 式(11)可简化为

$$N_e = n_{e0}e^{(\nu_i - \nu_a)t} \quad (12)$$

而在两个脉冲之间的间隔时间内, 自由电子的复合反应和附着效应是影响电子弛豫过程的主要因素, 电子扩散效应的影响可以忽略不计, 因此, 根据式(1)和式(3)可知, 弛豫过程中自由电子数密度方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\nu_r n_e - \nu_a n_e = -an_e^2 - \nu_a n_e \quad (13)$$

求解式(13)可得

$$n_e = \frac{N_{e0}\nu_a}{(\nu_r + \nu_a)e^{\nu_a t} - \nu_r} \quad (14)$$

式中:  $N_{e0}$  为脉冲作用刚结束时的电子数密度, 即为电子弛豫过程刚开始时的初始电子数密度。  $\nu_a$  和  $\nu_r$  分别为脉冲间隔时间内的附着频率和复合频率。结合电子的复合频率公式(1)、附着频率公式(3)、电子温度方程式(8)和公式(9), 可求出 HPM 脉冲间隔时间内电子数密度随时间的变化关系。

在 30 km 和 60 km 高度处, 由文献[6]可计算出大气中自由电子数密度分别为  $305 \text{ m}^{-3}$  和  $8 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ 。在这些高度上发生大气击穿时的电子数密度约为  $10^{18} \text{ m}^{-3}$ , 假设弛豫过程中初始电子数密度都为  $10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。选择重复频率 200 Hz 的高功率微波, 则两个脉冲之间的间隔时间约为 5 ms。图 3 和图 4 为初始电子密度  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  时, 海拔 30 km 和 60 km 处电子数密度随时间的变化关系。

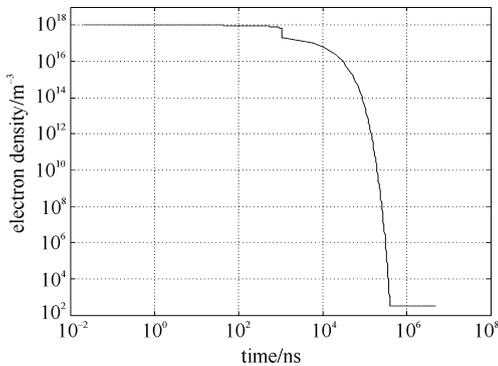


Fig. 3 Relation of electron density and time at 30 km altitude

图3 30 km 处电子数密度与时间关系

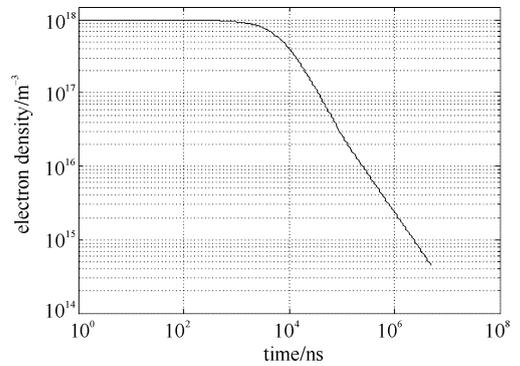


Fig. 4 Relation of electron density and time at 60 km altitude

图4 60 km 处电子数密度与时间关系

把弛豫过程中电子温度随时间的变化关系图 1、图 2 和电子数密度随时间的变化关系图 3、图 4 综合比较, 可以得出: 在脉冲间隔时间内, 电子温度的下降速度比电子数密度的下降速度快得多。即当电子温度从具有离化能下降达到平衡状态时, 电子数密度值仍较大。而在目前重复频率脉冲输出参数条件下, 两个脉冲之间的间隔时间一般远大于弛豫过程中电子温度达到平衡状态所需的时间, 而相对于电子数密度达到平衡状态所需要的时间在高低空则有所不同。对于 60 km 高度, 两脉冲之间的间隔时间远小于电子数密度达到自然状态下密度所需的时间。但对于 30 km 高度处, 脉冲间隔时间大于电子数密度达到自然状态下密度所需的时间, 电子数密度达不到累积的效果。

#### 4 HPM 重复频率脉冲作用下发生大气击穿的条件

以上是一个 HPM 重复频率脉冲周期内电子数密度的变化过程。设 HPM 一个脉冲作用时间为  $T_p$ , 相邻两脉冲间隔时间为  $T_0$ , 则一个脉冲周期为  $T_p + T_0$ 。在脉冲作用时间  $T_p$  内如果大气电离频率大于附着频率, 那么电子数密度将呈指数迅速增长。而当这个脉冲作用结束后, 进入脉冲间隔时间  $T_0$  内, 由于电子的复合反应和附着效应, 电子数密度又将迅速减小。要使大气发生击穿, 必须要在一个脉冲周期结束后, 其电子数密度大于脉冲刚开始时的电子数密度, 这样经过多个脉冲作用后电子数密度达到一定的累积, 才会发生大气击穿。假设第一个脉冲刚开始时的初始电子数密度为  $n_{e0}$ , 经过一个脉冲作用后电子数密度为  $N_{e0}$ , 再经过一个脉冲

间隔后到下一个脉冲开始前电子密度为  $n_{e1}$ , 则由公式(12)和公式(14)可知, 如果满足  $n_{e1} > n_{e0}$ , 有

$$N_{e0} = n_{e0} e^{(\nu_i - \nu_a) T_p} \quad (15)$$

$$n_{e1} = \frac{N_{e0} \nu_a}{(N_{e0} a + \nu_a) e^{\nu_a T_0} - N_{e0} a} > n_{e0} \quad (16)$$

如果始终满足式(16), 那么每经过一个脉冲周期, 电子数密度都将有所增加, 因此, 在有限多个周期脉冲的作用下, 电子密度将逐渐增大直至发生大气击穿<sup>[7]</sup>。

如果不满足式(16), 即  $n_{e1} \leq n_{e0}$ , 则在此重复频率脉冲作用下, 大气不会被击穿。原因是脉冲间隔时间过长, 电子数密度已恢复到自然状态, 除非持续足够长的一个脉冲作用时间, 使其在一个脉冲作用时间内发生大气击穿。

现在考虑有限个 HPM 重复频率脉冲作用下的电子密度的积累以及相邻脉冲间的电子损失<sup>[2,6-7]</sup>, 设初始电子数密度为  $n_{e0}$ , 利用式(12)和式(14)两式可得经过第 1 个脉冲作用时间  $T_p$  后电子数密度为

$$N_{e1} = n_{e0} e^{(\nu_i - \nu_{a1}) T_p} \quad (17)$$

经过第 1 个脉冲间隔时间  $T_0$  后电子数密度为

$$n_{e1} = \frac{N_{e1} \nu_{a2}}{(N_{e1} a + \nu_{a2}) e^{\nu_{a2} T_0} - N_{e1} a} = \frac{\nu_{a2}}{(N_{e1} a + \nu_{a2}) e^{\nu_{a2} T_0} - N_{e1} a} n_{e0} e^{(\nu_i - \nu_{a1}) T_p} \quad (18)$$

经过第 2 个脉冲作用时间后电子数密度为

$$n_{e2} = n_{e1} e^{(\nu_i - \nu_{a1}) T_p} = \frac{\nu_{a2}}{(N_{e1} a + \nu_{a2}) e^{\nu_{a2} T_0} - N_{e1} a} n_{e0} e^{2(\nu_i - \nu_{a1}) T_p} \quad (19)$$

经过第 2 个脉冲间隔时间后电子密度为

$$n_{e2} = \frac{N_{e2} \nu_{a2}}{(N_{e2} a + \nu_{a2}) e^{\nu_{a2} T_0} - N_{e2} a} = \frac{\nu_{a2}}{(N_{e1} a + \nu_{a2}) e^{\nu_{a2} T_0} - N_{e1} a} \frac{\nu_{a2}}{(N_{e2} a + \nu_{a2}) e^{\nu_{a2} T_0} - N_{e2} a} n_{e0} e^{2(\nu_i - \nu_{a1}) T_p} \quad (20)$$

当经过第  $k$  个脉冲作用时间后电子数密度为

$$n_{ek} = n_{e(k-1)} e^{(\nu_i - \nu_{a1}) T_p} = \left[ \prod_{i=1}^{k-1} \frac{\nu_{a2}}{(N_{ei} a + \nu_{a2}) e^{\nu_{a2} T_0} - N_{ei} a} \right] n_{e0} e^{k(\nu_i - \nu_{a1}) T_p} \quad (21)$$

式中:  $\nu_{a1}$  为脉冲作用时间内电子的附着频率;  $\nu_{a2}$  为脉冲间隔时间内电子的附着频率。式(21)即为通过  $k$  个脉冲作用后等离子体中的电子数密度。设  $N_{eth}$  为大气击穿时的临界电子数密度, 如果在通过第  $k$  个脉冲时发生大气击穿, 即  $N_{ek} = N_{eth}$ , 则发生大气击穿前最多能有  $k$  个脉冲作用到打击目标上。利用重复频率高功率微波, 可以通过适当降低脉冲的功率密度和宽度来避免发生大气击穿, 同时可以通过控制重复频率来保证打击到目标效应物上的能量。

## 5 结 论

本文主要分析了电子弛豫过程对高功率微波重复频率脉冲的大气击穿的影响。在脉冲作用时间内, 电子的电离占主导作用; 而在脉冲间隔时间内, 电子的损失占主导作用, 自由电子数密度主要受电子复合反应和附着效应的影响。自由电子弛豫过程可分为两个阶段, 在第一阶段, 电子温度迅速下降到电子的平均离化能左右, 所需时间很短, 而电子数密度基本不变; 在第二阶段, 电子温度从 1 eV 到达平衡状态及以后, 电子数密度则迅速减小。在目前的高功率微波重复频率脉冲所能达到的输出参数条件下, 两个脉冲之间的间隔时间一般大于电子温度的弛豫时间。最后给出了重复频率高功率微波大气击穿所需满足的电子数密度方程。

## 参 考 文 献:

- [1] Yang Jianhong, Niu Zhongxia, Zhou Dongfang, et al. The temporal disperse character in the nonlinear propagation of high power microwave [C]//2004 Asia-Pacific Radio Science Conference. 2004.
- [2] Kuo S P, Zhang Y S, Kossey P. Propagation of high power microwave pulses in air breakdown environment[J]. *Phys Fluids*, 1991, **133** (10):2906.
- [3] 周光猛, 朱红刚. 高功率微波脉冲大气传输的一些规律[J]. 强激光与粒子束, 1996, **8**(4):485-490. (Zhou Guangyi, Zhu Honggang. Some properties of high power microwave pulse propagation in the atmosphere. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(4):485-490)
- [4] 古列维奇 A V. 电离层中的非线性[M]. 北京: 科学出版社, 1986:21-42. (Gurevich A V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. Beijing: Science Press, 1986:21-42.)
- [5] 熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999:311-353. (Xiong Nianlu, Tang Cunchen, Li Xingjian. Ionosphere Physics. Wuhan: Wuhan University Press, 1999:311-353.)

sphere physics phenomena. Wuhan: Wuhan University Press, 1999:311-353)

- [6] 周东方,等. 高功率微波大气传输特性分析与模拟软件研制[R]. 郑州:信息工程大学,2005:154-186. (Zhou Dongfang, et al. Analysis of characteristics of high power microwave propagation in atmosphere and their simulation software development. Zhengzhou: Institute of Information Engineering,2005:154-186)
- [7] 曹金坤,周东方,牛忠霞,等. 重复频率高功率微波脉冲的大气击穿[J]. 强激光与粒子束,2006,**18**(1):115-118(Cao Jinkun, Zhou Dongfang, Niu Zhongxia, et al. Air breakdown by repetition-rate high power microwave pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006,**18**(1): 115-118)

## Effect of electronic relaxation process on air breakdown caused by repetition frequency HPM

Hu Tao<sup>1,2</sup>, Zhou Dongfang<sup>1</sup>, Li Qingrong<sup>1</sup>, Niu Zhongxia<sup>1</sup>

(1. *Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;*

2. *PLA Unit 61085, Hangzhou 311200, China*)

**Abstract:** Air breakdown caused by repetition frequency high power microwave (HPM) has been investigated. The electronic relaxation process affected by repetition frequency pulses has been analyzed, and variations regulation of the electron temperature and free electron density pulse interval time has been studied. It is found that the electron temperature relaxation time is far less than the electron density relaxation time. This paper analyzes the attachment and recombination effects in the electronic relaxation process, and present the occurrence condition of air breakdown caused by repetition frequency HPM, and the electronic density equation of the air breakdown.

**Key words:** high power microwave; electronic relaxation process; repetition frequency; air breakdown