

高功率微波注入对流层对氟利昂的影响

冉茂怡 胡耀垓 赵正予 张援农

Effect of high power microwave injection on tropospheric freon

Ran Mao-Yi Hu Yao-Gai Zhao Zheng-Yu Zhang Yuan-Nong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 045101 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.045101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.045101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压氦气平行极板击穿电压实验研究

[Experimental study on breakdown voltage between parallel plates in high-pressure helium](#)

物理学报.2015, 64(10): 105101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105101>

高功率微波作用下 O^- 离子解吸附产生种子电子过程

[Seed electron production from \$O^-\$ detachment in high power microwave air breakdown](#)

物理学报.2016, 65(5): 055202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.055202>

电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中传输特性研究

[Study on transmission characteristics of electromagnetic waves in inhomogeneously magnetized plasma sheath](#)

物理学报.2016, 65(3): 035201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.035201>

电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究

[Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma](#)

物理学报.2015, 64(5): 055201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.055201>

毛细管放电 69.8nm 激光强度空间分布特性研究

[Intensity distribution of 69.8 nm laser pumped by capillary discharge](#)

物理学报.2016, 65(9): 095201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.095201>

高功率微波注入对流层对氟利昂的影响*

冉茂怡 胡耀垓† 赵正予 张援农

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

(2016年8月6日收到; 2016年11月17日收到修改稿)

采用高功率微波注入大气的方法来促进氟利昂的分解具有一定可行性, 本文基于麦克斯韦方程、电流密度控制方程等, 利用时域有限差分法定量分析了高功率微波注入不同对流层高度促进电子生成从而促进氟利昂分解的过程. 结果显示, 在微波作用下, 电子数密度随时间呈指数增长, 最大能达到 10^{17} cm^{-3} ; 电子对氟利昂的分解主要发生在电子衰减过程中, 利用估算公式和化学反应过程两种方法计算得出的分解率一致, 能够达到6%.

关键词: 高功率微波, 氟利昂, 自由电子, 时域有限差分法

PACS: 51.50.+v, 52.40.Db, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.66.045101

1 引言

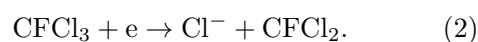
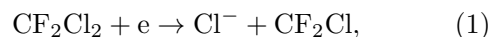
随着现代科技发展及人类生产和生活方式的改变, 如氟氯烃(CFCs, 又名氟利昂)和含溴氟烃等的大量排放对臭氧层会构成严重威胁. 这些物质在平流层由于强烈的太阳紫外线UV-C的照射会分解出氯和溴自由基, 臭氧会被这些游离基催化形成氧气而消失. 针对CFCs的大量排放及其对平流层臭氧的破坏, 20世纪90年代初, Askar'yan等^[1,2]提出了通过微波放电产生大量电子在对流层(10 km高度以下)对CFCs进行分解的方案; Wong等^[3]提出通过直接注入电子破坏CFCs以恢复臭氧的构想. Batanov等^[4]分析了通过微波放电方法来改善大气问题的可能性. 还有学者^[5-7]实验并分析了CFC-12(二氯二氟甲烷, CF_2Cl_2)在非平衡等离子体下分解的机制, 实验得出的分解效率都很可观. 高功率微波能够使高速运动的电子与中性空气分子碰撞, 由于雪崩电离, 将会在传输路径中产生大量电子^[8]. 微波气体电离的研究始于20世纪40年代, 但是早期研究主要集中在测量和计算不同气压、微波频率、脉宽下的气体击穿

阈值^[8-11]. 近年来也有许多学者结合时域有限差分法(FDTD)^[12]研究高功率微波传播过程中的大气电离规律^[13-15], 如袁忠才等^[13]分析了等离子体电子密度和高功率微波传输特性的变化; 唐涛等^[14]验证了FDTD求解高功率微波大气传播的合理性和正确性.

本文总结分析了微波放电过程中分解CFCs的主要化学反应, 结合FDTD法模拟了高功率微波注入对流层电子数密度的变化, 用两种方法定量分析了不同条件(频率、脉冲场强、高度)微波注入下产生电子促进CFCs分解的效率, 探讨基于高功率微波注入对流层分解CFCs的可能性.

2 氟利昂的分解

在微波放电分解氟利昂的过程中, 电子的解离附着过程为主要分解过程^[4], 如下所示:

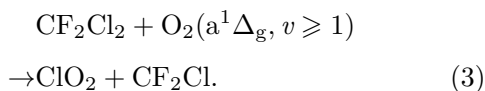


除了电子能够直接分解CFCs, 一些间接分解过程也可以在一定程度上清除大气中的氟利

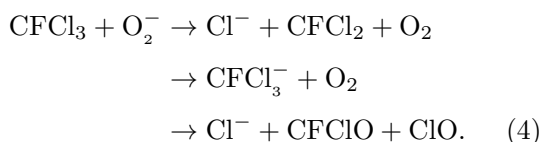
* 国家自然科学基金(批准号: 41375007)和湖北省自然科学基金青年杰出人才项目(批准号: 2011CDA099)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yaogaihu@whu.edu.cn

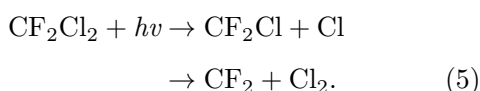
昂^[2], 如CFCs与氮气和氧气的亚稳态原子分子的碰撞. CFC-11 (CFCl₃)和CFC-12与亚稳态氧原子O(¹D)的碰撞率很高, 其反应常数接近气体动力学值(1—2) × 10⁻¹⁰ cm³·s⁻¹. 但是, O(¹D)在与氮气和氧气分子的碰撞中有很高的淬灭速率, 这使得其分解CFCs的效率相对于冷等离子体而言不具备竞争力. 电子激发态的氧气分子O₂(a¹Δ_g, *v* ≥ 1)和O₂(b¹Σ_g⁺)对CFCs也有一定的分解作用, 其反应过程类似下式:



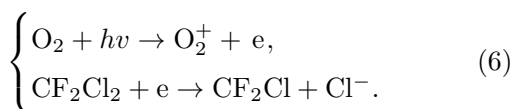
CFCs和O₂⁻的电荷交换过程也是一种破坏CFCs的渠道^[16]:



由微波放电或者激光火花产生的紫外辐射同样可以造成对CFCs的破坏:



或者空气中的其他成分光解电离出电子, 电子附着解离CFCs:



以上列出的所有方式中, 只有很少一部分可以有效净化空气中的CFCs^[4]. 在低电子温度和低压环境下, 电子附着解离CFCs的反应方程(1)和(2)在分解反应中起主要作用, 随着气压和电子平均动能(电子温度)的增高, 三体反应贡献会逐步提高, 甚至可能占据主导作用, 但是就本文所讨论的环境, CFCs气体分压很小, 且维持高电子温度的时间极短, 所以主要考虑解离附着在微波放电过程中对氟利昂的分解作用.

当电子温度 $T_e \approx 0.02707$ eV (240 K)时, (1)和(2)式的反应系数为

$$\begin{cases} k_{\text{D}}^{(\text{CFC-12})} \approx 2.05 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \\ k_{\text{D}}^{(\text{CFC-11})} \approx 8.86 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}. \end{cases}$$

当电子温度 $T_e \approx 0.25$ eV时, (1)和(2)式的反应系数为

$$\begin{cases} k_{\text{D}}^{(\text{CFC-12})} \approx 1.85 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \\ k_{\text{D}}^{(\text{CFC-11})} \approx 2.87 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \end{cases}$$

其中 $k_{\text{D}}^{(\text{CFC-12})}$ 为(1)式的反应系数, $k_{\text{D}}^{(\text{CFC-11})}$ 为(2)式的反应系数. 从这两个温度下的反应系数可以看出, 电子温度越大, 反应系数反而小. 因为电子和氯原子的亲和力大于CFCs分子的离解能, 所以在电子能量很低的情况下有大的反应系数.

高功率微波注入大气能够产生一个带有高电子数密度的空气等离子体, 此时电子温度较高, 分解速率几乎为0; 脉冲作用结束后, 电子温度降低, 反应系数增大, 分解速率增大, 但是电子数密度随之减小, 所以大部分CFCs在脉冲间隔期间的电子衰减期被破坏.

若电离脉冲作用期间电子数密度远远大于CFCs数密度, 并且假设等离子体通过复合衰减和电子附着是CFCs惟一破坏机制, 可以通过下式近似求解CFCs分子通过电子附着解离的相对数量随时间的变化^[1]:

$$\eta_{\text{CFC0}} \approx 1 - (1 + \alpha_{\text{r}} N_{\text{e}} t)^{-\gamma}, \quad (7)$$

其中 N_{e} 为电子数密度, $\eta_{\text{CFC0}} \equiv \Delta n_{\text{CFC}} / n_{\text{CFC0}}$, n_{CFC0} 为CFC分子的初始密度数, $\Delta n_{\text{CFC}} = n_{\text{CFC0}} - n_{\text{CFC}}(t)$, $n_{\text{CFC}}(t)$ 为CFC分子随时间的变化量, $\gamma = k_{\text{D}}^{\text{CFC}} / \alpha_{\text{r}}$, α_{r} 为等离子体中电子和正离子的复合系数, $k_{\text{D}}^{\text{CFC}}$ 为对应的反应系数. 可以看出, N_{e} 和 $k_{\text{D}}^{\text{CFC}}$ 越大, η_{CFC0} 越大, 即CFCs通过电子附着解离被净化的相对数量与自由电子数密度以及解离附着常数成正比. 由(7)式可以得到 $n_{\text{CFC}}(t)$

$$n_{\text{CFC}}(t) \approx (1 + \alpha_{\text{r}} N_{\text{e}} t)^{-k_{\text{D}}^{\text{CFC}} / \alpha_{\text{r}}} n_{\text{CFC0}}. \quad (8)$$

对于在单脉冲下击穿大气的情况下, 自由电子数密度可以达到10¹⁷ cm⁻³数量级^[17,18], 甚至更大, 大气中CFCs的数密度一般在10¹² cm⁻³左右. 对于 $N_{\text{e}} = 10^{13}$ cm⁻³, $T_{\text{e}} = 240$ K, $\alpha_{\text{r}} = 2 \times 10^{-6}$ cm³·s⁻¹, 100 μs便可以获得超过20%的分解量, 如图1所示.

除了解离附着能够分解CFCs外, CFCs还可以通过氧负离子之间的电荷交换、与电子激发态的相互作用等进行分解. 总的来说, 这些影响都将

导致 $N_e \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 等离子体能够获得更高的净化效率.

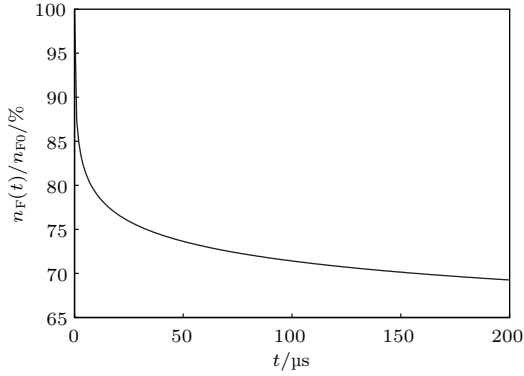


图1 CFC随着时间的分解百分比

Fig. 1. Relation curves of CFCs' decomposition vs time.

3 FDTD方法分析微波大气传播过程中电子的变化

3.1 高功率微波的大气传播模型

高功率微波的大气传播模型可由麦克斯韦方程、电流密度控制方程、电子数密度方程和电子能量方程描述. 利用FDTD^[12]将麦克斯韦方程等转化为一组差分方程, 由电磁问题的初始值及边界条件逐步推进求得以后各时刻各空间的电磁场分布. 如果用一维模型来近似描述高功率微波的大气传播问题^[19], 那么对于沿 z 方向传播的电磁波, 电场只有 x 方向分量, 磁场只有 y 分量, 电流密度只有 x 方向分量, 方程具体如下^[13-15]:

$$\begin{aligned} & H_y^{n+1/2}(k+1/2) \\ &= H_y^{n-1/2}(k+1/2) \\ & \quad - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_x^n(k+1) - E_x^n(k)], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & E_x^{n+1}(k) \\ &= E_x^n(k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta z} [H_y^{n+1/2}(k+1/2) \\ & \quad - H_y^{n-1/2}(k-1/2)] - \frac{e \Delta t}{2 \varepsilon_0} (U_x^{n+1/2}(k+1/2) \\ & \quad + U_x^{n-1/2}(k-1/2)), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & U_x^{n+1/2}(k+1/2) \\ &= \frac{e \Delta t}{4m} (E_x^n(k+1) + E_x^n(k)) (n_e^n(k+1) + n_e^n(k)) \\ & \quad + (1 - v_m \Delta t) U_x^{n-1/2}(k+1/2), \end{aligned} \quad (11)$$

$$N_e^{n+1} = (1 + (v_i - v_a) \Delta t) N_e^n$$

$$\begin{aligned} & - \frac{\Delta t}{2 \Delta z} (U_x^{n+1/2}(k+1/2) \\ & \quad - U_x^{n-1/2}(k-1/2)). \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 方程(9)和(10)为Maxwell方程组; 方程(11)为电流密度控制方程; 方程(12)为电子数密度方程. E_x 和 H_y 为 x 方向电场强度和 y 方向磁场强度; ε_0 和 μ_0 为自由空间的介电常数和磁导率; U_x 为电子流体速度沿 x 方向的电流密度分量; N_e 为电子数密度; $e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 为电子电荷; $m = 9.3 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 为电子质量; v_m , v_i , v_a 为电子与中性粒子的碰撞频率、电离频率和附着频率. 利用初始值及边界条件对方程组(9)–(12)式进行迭代求解. 初始条件为: 电场分量的初始值为设定微波电场强度值, 磁场分量和电流密度分量的初始值为0, N_e 的初始值为自由电子数密度 N_0 . 在对流层高度, 自由电子数密度可以近似认为 10 cm^{-3} ^[10]. 对于截断边界, 电场采用一维Mur吸收边界条件^[20], 电子数密度和电流密度采用流体力学边界^[15].

图2和图3分别给出了在给定模拟脉冲频率为3 GHz, 脉冲宽度10 ns, 以不同入射场强作用在3.58 km高度下以及固定场强50000 V/cm作用在不同对流层高度下的电子数密度随时间的变化.

从图2和图3中可以看出, 在微波脉冲作用下, 电子数密度随时间呈指数增长, 存在最大值, 能够达到 10^{17} cm^{-3} , 这是由于在微波作用下空气发生了雪崩电离; 在相同脉冲作用时间下, 随着场强的增大, 电子数密度增长得越快; 相同脉冲作用在10 km以下的不同高度时, 随着高度的增加, 电子数密度增大得越快. 产生这种现象的原因是由于低空中空气稠密, 压强大, 所以不易发生电离; 但随着高度的增加, 空气变稀薄, 压强变小, 空气电离相对变得容易.

3.2 电子弛豫过程

在脉冲间隔期间, 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也可以忽略不计^[21], 因此弛豫过程中的自由电子数密度可由下式求得:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = -\nu_r N_e - \nu_a N_e. \quad (13)$$

求解上式得

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

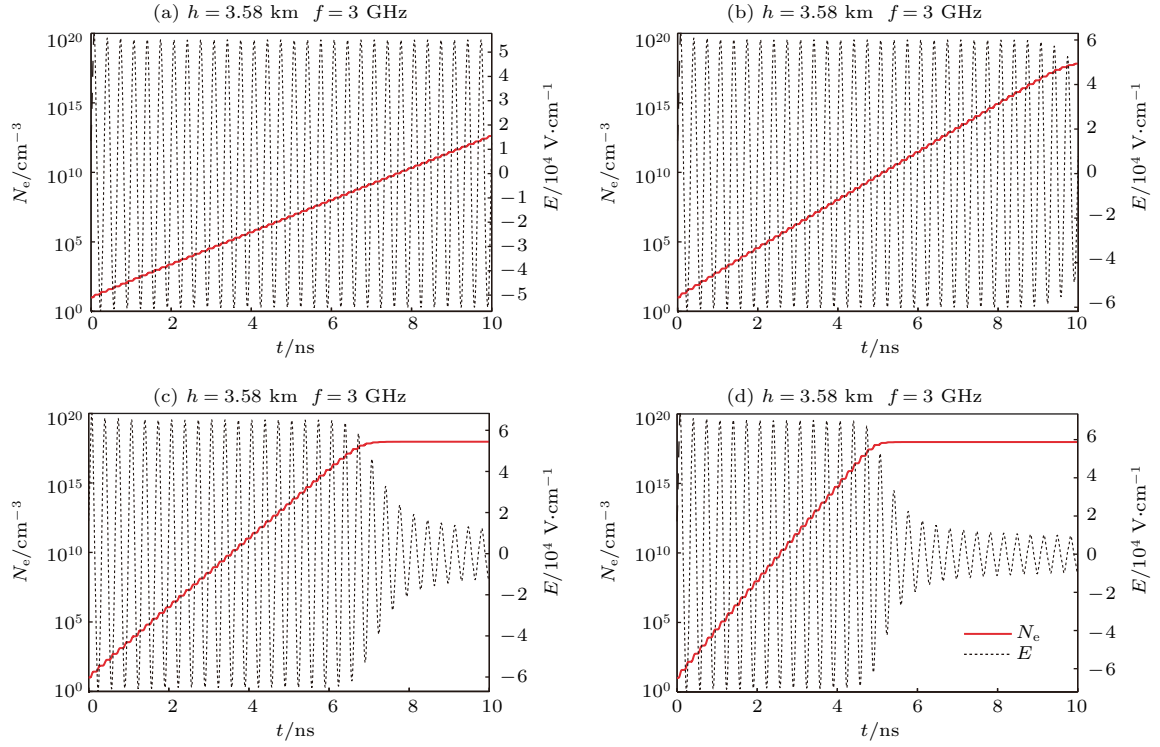


图2 不同场强脉冲作用在同一高度下微波场强与电子数密度随时间的变化 (a) $A_m = 55000$ V/cm; (b) $A_m = 60000$ V/cm; (c) $A_m = 65000$ V/cm; (d) $A_m = 70000$ V/cm

Fig. 2. Relation curves of the electric field intensity and electron number density vs time at different field intensity: (a) $A_m = 55000$ V/cm; (b) $A_m = 60000$ V/cm; (c) $A_m = 65000$ V/cm; (d) $A_m = 70000$ V/cm.

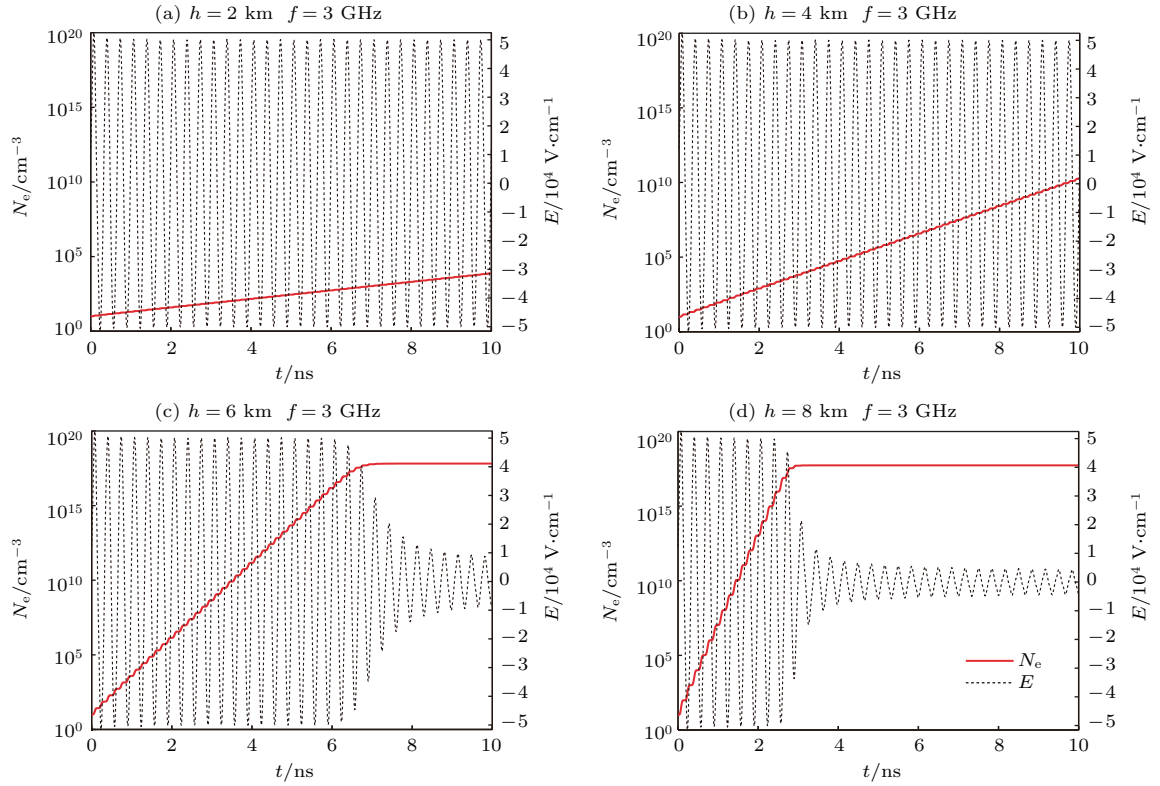


图3 相同脉冲作用在不同高度下微波场强与电子数密度随时间的变化 (a) $h = 2$ km; (b) $h = 4$ km; (c) $h = 6$ km; (d) $h = 8$ km

Fig. 3. Relation curves of the electric field intensity and electron number density vs time at different height: (a) $h = 2$ km; (b) $h = 4$ km; (c) $h = 6$ km; (d) $h = 8$ km.

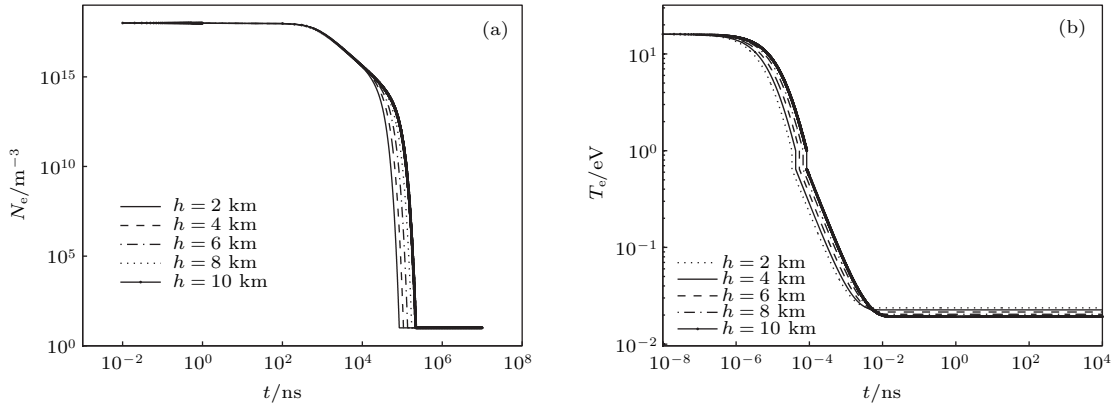


图4 弛豫过程不同高度下电子数密度和电子温度随时间的变化关系 (a) 电子数密度; (b) 电子温度

Fig. 4. Relation curves of the electron temperature and number density vs time at different height in the relaxation process: (a) Number density of electron; (b) electron temperature.

式中 N_{e0} 为脉冲作用刚结束时的电子数密度, 即电子弛豫过程刚开始的初始电子密度数; 电子的复合频率 ν_r 和附着频率 ν_a 和大气压强以及电子温度相关 [22,23]:

$$\nu_r = N_e (4.8 T_e^{-0.39} + 2.1 T_e^{-0.63}) \times 10^{-14}, \quad (15)$$

$$\nu_a = 8.3 \times 10^6 \frac{p}{T_e^{1.5}} \times e^{-6.7/T_e} + 3.98 \frac{p^2}{T_e^{1.5}}, \quad (16)$$

$$T_e = \begin{cases} \frac{T_{e0} - T}{(1 + 0.98 \times 10^{-16} N_n t \sqrt{T_{e0} - T})^2} + T, & T_{e0} > 1 \text{ eV}, \\ \frac{T}{1 + (T/T_{e0} - 1) \exp(-1.96 \times 10^{-16} N_n T t)}, & T_{e0} < 1 \text{ eV}, \end{cases} \quad (17)$$

其中 T_{e0} 为 $t = 0$ 时电子的初始温度, T 为背景大气或中性粒子的温度, N_n 为背景大气中的中性分子数密度. 假设弛豫过程中初始电子数密度为 $N_{e0} = 10^{15} \text{ m}^{-3}$, 初始电子温度 $T_e = 16 \text{ eV}$, 那么 (14)–(17) 式可以得到弛豫过程中电子数密度和电子温度随时间的变化关系, 如图 4 所示.

从图 4 中可以看出, 弛豫过程中, 随着高度的增加, 电子数密度下降的速度也变慢, 需要更长的时间才能从相同的电子数密度下降到大气中的自由电子数密度. 同时随着高度的增加, 电子温度下降到背景大气温度的时间会变长. 但是整体的趋势是一样的, 从高温下降到 1 eV 的速率远远大于从 1 eV 下降到平衡状态即背景大气温度的速率; 高度越高, 大气中分子数密度就会越小, 自由电子与分

子之间的碰撞就越少, 导致电子温度从 16 eV 下降到平衡态所需的时间越长. 对比两幅子图还可以看出电子弛豫过程中, 电子温度的下降时间比电子数密度下降时间短很多, 即电子温度的下降速度比电子数密度的快; 不同高度, 电子的弛豫过程会有所区别, 电子温度的下降速度以及电子数密度的下降速度会随着高度的上升而变慢.

4 数值仿真结果与讨论

如前所述, 可以看出电子数密度的增加可以促进 CFCs 的分解, 且分解主要集中在弛豫过程中. 以下将从两种计算方式定量分析微波作用下 CFCs 的分解量.

从第 2 节中可以看出, 有两种方法可以粗略计算 CFCs 解离附着的分解量: 一是直接利用 (7) 式; 二是利用反应式 (1) 和 (2) 在 CFCs 的分解中起的主要作用来计算变化电子数密度下消耗 CFCs 的量. CFCs 包含的主要物质为 CFC-11 和 CFC-12, 其分子数密度从 CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) 获得. 在 3.58 km 高度处, $[\text{CFC-11}] = 1.03 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $[\text{CFC-12}] = 2.60 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. 取 $\alpha_r = 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 并假设 CFC-11 和 CFC-12 的解离附着系数与电子温度成线性关系, 图 5 和图 6 分别利用两种方式计算了不同场强单脉冲微波作用下 CFCs 的分解效果. 其中, 微波作用高度为 3.58 km, 频率为 3 GHz, 脉宽为 10 ns, 整个计算时间为 1 μs . 两种方式下 CFCs 最终的分解相关数据对比如表 1 所列.

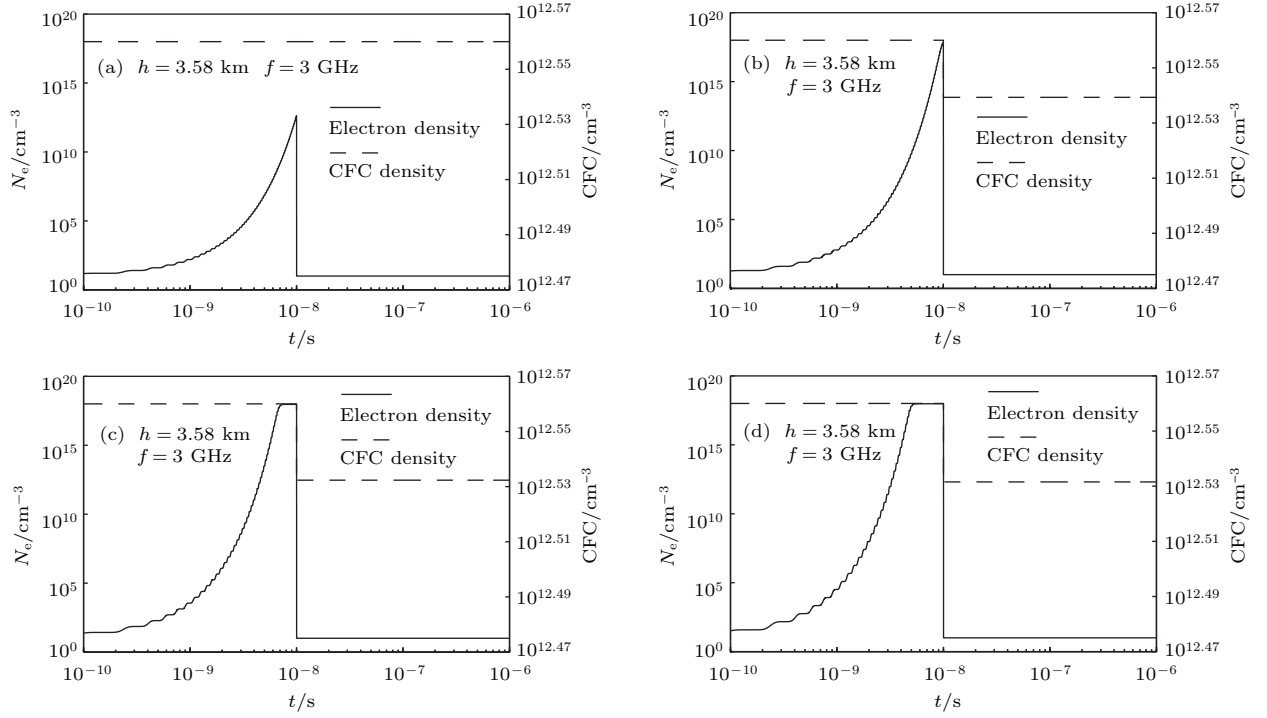


图5 第一种方法: 不同场强单脉冲微波作用下CFC与自由电子随时间的变化 (a) $A_m = 55000$ V/cm; (b) $A_m = 60000$ V/cm; (c) $A_m = 65000$ V/cm; (d) $A_m = 70000$ V/cm

Fig. 5. The first way: CFCs' and electron number density vs time at different electric filed intensity: (a) $A_m = 55000$ V/cm; (b) $A_m = 60000$ V/cm; (c) $A_m = 65000$ V/cm; (d) $A_m = 70000$ V/cm..

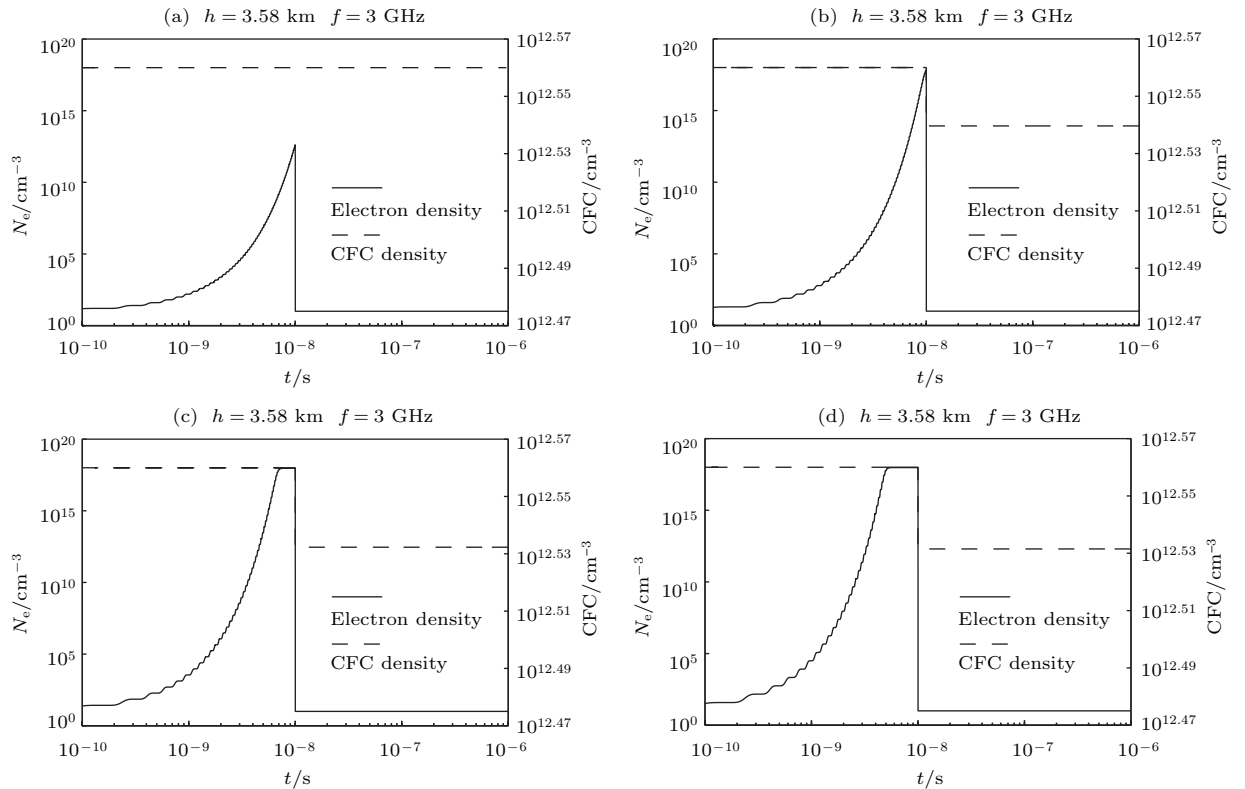


图6 第二种方法: 不同微波场强作用下CFC和自由电子密度数随时间的变化 (a) $A_m = 55000$ V/cm; (b) $A_m = 60000$ V/cm; (c) $A_m = 65000$ V/cm; (d) $A_m = 70000$ V/cm

Fig. 6. The second way: CFCs' and electron number density vs time at different electric filed intensity: (a) $A_m = 55000$ V/cm; (b) $A_m = 60000$ V/cm; (c) $A_m = 65000$ V/cm; (d) $A_m = 70000$ V/cm.

表 1 两种方法对应不同场强下的 CFCs 分解数据

Table 1. Two ways: the data of CFCs at different electric field intensity.

$A_m/\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$	55000		60000		65000		70000	
	方法一	方法二	方法一	方法二	方法一	方法二	方法一	方法二
$N_e(\text{max})/\text{cm}^{-3}$	4.15×10^{12}	4.15×10^{12}	6.67×10^{17}	6.67×10^{17}	9.27×10^{17}	9.27×10^{17}	9.56×10^{17}	9.56×10^{17}
$\Delta_{\text{CFC}}/\text{cm}^{-3}$	1.1154×10^6	1.1154×10^6	1.6635×10^{11}	1.6636×10^{11}	2.2445×10^{11}	2.2446×10^{11}	2.3063×10^{11}	2.3064×10^{11}
η_{CFC}	0	0	4.5816%	4.5818%	6.1816%	6.1812%	6.3518%	6.3521%

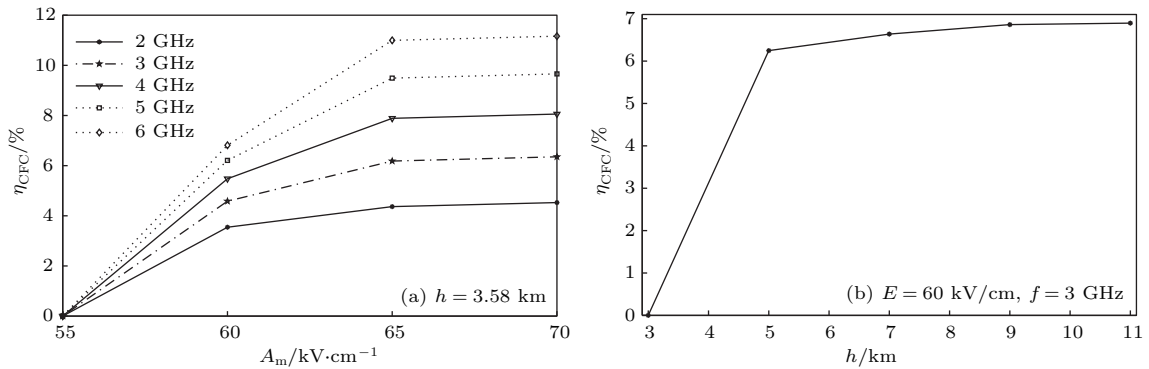


图 7 不同电场强度、不同频率、不同高度的 CFCs 分解效率 (a) 不同场强和不同频率; (b) 不同高度

Fig. 7. the decomposition efficiency of CFCs, at different electric field intensity, frequency and height:

(a) Different electric field intensity and frequency, $h = 3.58 \text{ km}$; (b) different height, $f = 3 \text{ GHz}$.

表 1 中 A_m 为微波电场强度, $N_e(\text{max})$ 为在微波作用最后时刻能够达到的最大电子数密度, Δ_{CFC} 为在 $1 \mu\text{s}$ 的计算时间内总共分解的 CFC 的数密度, η_{CFC} 为 CFC 的分解百分比.

结合图 5、图 6 和表 1, 可以看出两种方式计算结果几乎相同. 第一种方法利用 (7) 式计算电子数密度变化后通过解离附着分解 CFC 的量; 第二种方法, 电子数密度的增多, 促进 (1) 和 (2) 式的正向反应, 导致 CFC 分解量增多; 然而在脉冲作用期间, CFC 几乎没有分解, 是由于在电场作用下的电子温度较高, 反应常数较小, 导致这期间 CFC 分解效率低, 这也是尽管随着场强的增大维持自由电子最大数密度的时间增大, 但是 CFC 分解效果并没有随维持时间的增加而变得明显的原因. 可以看出第一种方法与第二种方法在本质上是相同的, 都是考虑自由电子解离附着 CFCs 作为导致其分解的主要过程, 所以最后仿真结果数据几乎一致. 从表 1 的数据可以看出, 单脉冲作用下的电子数密度能够达到 10^{17} cm^{-3} , 这导致 CFCs 的分解量可以达到 6% 以上. 可以想象, 持续的脉冲作用可以达到有效清除 CFCs 的效果.

图 7 给出了不同电场强度以及不同频率、不同

高度微波脉冲作用下 CFC 的分解效率. 可以看出, 随着微波场强的增大、频率的增加或者高度的增加, CFCs 的分解效率也会增大.

5 结 论

本文建立了高功率微波脉冲作用下自由电子解离附着 CFCs 的分解模型, 得到了不同场强、频率、高度下的 CFCs 分解效率. 微波脉冲作用下, 考虑电子附着解离 CFCs 为主要分解 CFCs 的过程. 仿真结果表明, 高功率微波作用下电子数密度随时间呈指数增长, 最大能达到 10^{17} cm^{-3} , 此时电子温度高, CFCs 的分解效率低, 当单脉冲结束后电子数密度开始衰减, 电子温度降低, 分解效率变高; 同时随场强、频率、高度的增加, CFCs 的分解效率会增加; 以经验公式或反应方程与微波传播模型进行耦合计算得到的 CFCs 分解率几乎一致, 单脉冲作用下的分解率最高能达到 6%. 由于对微波传播模型进行了简化, 没有考虑扩散和输运问题, 分解率偏高. 下一步将开展地面模拟或空间实验以完善现有模型, 并对有效性加以验证.

参考文献

- [1] Askar'yan G A, Batanov G M, Barkhudarov A É, Gritsinin S I, Korchagina E G, Kossyi I A, Silakov V P, Tarasova N M 1992 *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **55** 500
- [2] Askar'yan G A, Batanov G M, Barkhudarov A E, Gritsinin S I, Korchagina E G, Kossyi I A, Tarasova N M 1994 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **27** 1311
- [3] Wong A Y, Sensharma D K, Tang A W, Suchannek R G, Ho D 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3124
- [4] Batanov G M, Kossyi I A, Silakov V P 2002 *Plasma Phys. Rep.* **28** 204
- [5] Kang H C 2002 *J. Ind. Eng. Chem.* **8** 488
- [6] Ricketts C L, Wallis A E, Whitehead J C, Zhang K 2004 *J. Phys. Chem. A* **108** 8341
- [7] Wallis A E, Whitehead J C, Zhang K 2007 *Catal. Lett.* **113** 29
- [8] Zhou Q H, Dong Z W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 205202 (in Chinese) [周前红, 董志伟 2013 物理学报 **62** 205202]
- [9] Jick H Y, Alvarez R A, Mayhall D J, Byrne D P, Degroot J 1986 *Phys. Fluids* **29** 1238
- [10] Cao J K, Zhou D F, Niu Z X, Shao Y, Zou W, Xing Z W 2006 *High Power Laser Part. Beams* **18** 115 (in Chinese) [曹金坤, 周东方, 牛忠霞, 邵颖, 邹伟, 邢召伟 2006 强激光与粒子束 **18** 115]
- [11] Zhou G Y, Zhu H G 1996 *High Power Laser Part. Beams* **8** 485 (in Chinese) [周光镒, 朱红刚 1996 强激光与粒子束 **8** 485]
- [12] Yee K S 1966 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14** 302
- [13] Yuan Z C, Shi J M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 095202 (in Chinese) [袁忠才, 时佳明 2014 物理学报 **63** 095202]
- [14] Tang T, Liao C, Yang D 2010 *Chin. J. Radio.* **25** 122 (in Chinese) [唐涛, 廖成, 杨丹 2010 电波科学学报 **25** 122]
- [15] Zhao P C, Liao C, Tang T, Gao Q M 2010 *J. Chongqing Univ. Posts Telecomm.* **22** 431 (in Chinese) [赵朋程, 廖成, 唐涛, 高清敏 2010 重庆邮电大学学报 (自然科学版) **22** 431]
- [16] Fehsenfeld F C, Crutzen P J, Schmeltekopf A L, Howard C J, Albritton D L, Ferguson E E, Davidson J A, Schiff H I 1976 *J. Geophys. Res. Atmos.* **81** 4454
- [17] Zhang C, Zhou D F, Rao Y P, Chen Y, Hou D T 2009 *High Power Laser Part. Beams* **21** 719 (in Chinese) [张超, 周东方, 饶育萍, 陈勇, 侯德亨 2009 强激光与粒子束 **21** 719]
- [18] Zhu G Q, Boeuf J P, Chaudhury B 2011 *Plasma Sources Sci. Technol.* **20** 35007
- [19] Tang T, Liao C, Gao Q M, Zhao P C 2010 *J. Electro-magn. Anal. Appl.* **2** 543
- [20] Ge D B, Yan Y B 2005 *Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves* (Xi'an: Xidian University Press) p34 (in Chinese) [葛德彪, 闫玉波 2005 电磁波时域有限差分方法 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 34 页]
- [21] Hu T, Zhou D F, Li Q R, Niu Z X 2009 *High Power Laser Part. Beams* **21** 545 (in Chinese) [胡涛, 周东方, 李庆荣, 牛忠霞 2009 强激光与粒子束 **21** 545]
- [22] Gurevich A V (translated by Liu X M) 1986 *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere* (Beijing: Science Press) pp21–42 (in Chinese) [古列维奇 A V 著 (刘选谋 译) 1986 电离层中的非线性现象 (北京: 科学出版社) 第 21—42 页]
- [23] Xiong N L, Tang C C, Li X J 1999 *Ionosphere Physics Phenomena* (Wuhan: Wuhan University Press) pp311–353 (in Chinese) [熊年禄, 唐存琛, 李行健 1999 电离层物理概论 (武汉: 武汉大学出版社) 第 311—353 页]

Effect of high power microwave injection on tropospheric freon*

Ran Mao-Yi Hu Yao-Gai[†] Zhao Zheng-Yu Zhang Yuan-Nong

(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(Received 6 August 2016; revised manuscript received 17 November 2016)

Abstract

High power microwave injection into the troposphere is a feasible approach to the decomposition of chlorofluorocarbon (CFC). However, in existing researches, there are only basic principles which lack quantitative tests. Hence, in this article we introduce the finite-difference time-domain method to quantitatively analyze the decomposition of CFC under high power pulses. We first investigate the principal chemical reactions of CFC decomposition induced by high power microwave injection and find that dissociation attachment is a dominant process of the microwave discharge decomposition of CFC. We use an empirical formula to calculate the decomposition efficiency of CFC. The result shows that 20% of the initial content of CFC molecules will be dissociated over 100 microseconds where we assume the electron number density to be 10^{13} cm^{-3} . Then according to Maxwell's equations and the current density equation, we adopt the finite difference time domain method to simulate the generation process of a large number of free electrons induced by injecting the high power microwaves into the troposphere. The ionized electron generated by the high power microwave in troposphere is in favor of CFC decomposition since the electron affinity of CFC is larger than dissociation energy of CFC molecules. The simulation results indicate that the number density of electrons grows up to 10^{17} cm^{-3} exponentially with the injection time and will grow faster at higher height ($<10 \text{ km}$) or by the larger field intensity. During the pulse, the higher electron energy corresponds to a smaller dissociative attachment coefficient. Thus, most of the CFC molecules are decomposed during the electron-decay phase. During the relaxation period, the electron energy will return to the natural state within 0.01 ns. The number density of electrons decreases slower than the electron energy and it will take 1 ms to reach the natural state. From the results we can also see that the decay rates of the electron energy and number density decrease with the increase of the height. In this paper, two methods of calculating the CFC decomposition rate are utilized. One method is from the chemical reaction and the other method is based on an empirical formula which is mentioned before. It is shown that the results of these two methods present obvious consistency. The simulation results demonstrate that the CFC decomposition rate will increase with larger microwave intensity or higher frequency and can approach up to 6%. In conclusion, this study gives the quantitative analyses of the CFC decomposition induced by high power microwave injection in the troposphere for the first time.

Keywords: high power microwave, freon, free electron, finite difference time domain

PACS: 51.50.+v, 52.40.Db, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.66.045101

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant NO. 41375007) and the Natural Science Foundation of Hubei Province of China (Grant No. 2011CDA099).

[†] Corresponding author. E-mail: yaogaihu@whu.edu.cn