



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111487464 A

(43)申请公布日 2020.08.04

(21)申请号 202010354889.9

(22)申请日 2020.04.29

(71)申请人 华南师范大学

地址 528225 广东省佛山市南海区狮山南海软件园华南师范大学软件学院

(72)发明人 杨会平 曾碧卿 焦新涛

(74)专利代理机构 成都行之专利代理事务所 (普通合伙) 51220

代理人 温利平

(51) Int. Cl.

G01R 23/16(2006.01)

G01R 31/12(2006.01)

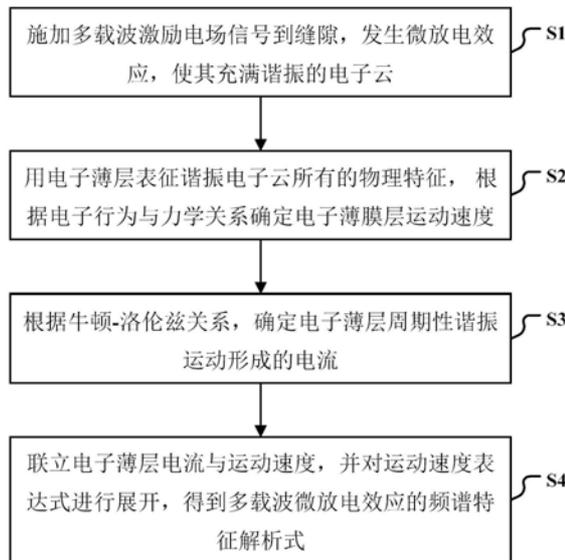
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种多载波微放电效应频谱特征解析方法

(57)摘要

本发明公开了一种多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法,首先通过施加多载波激励电场信号到两平行导体面形成的缝隙两侧,模拟多载波微放电效应;其次,将微放电效应稳态过程所形成的谐振电子云视为电子密度很高的电子薄层,利用其来表征谐振电子云所有的物理特性,确定其运动速度和形成的电流大小;然后对运动速度进行傅里叶级数展开,确定多载波微放电效应的频谱特征解析式,进而得到多载波微放电产生的电子噪声频率成分。这样得到了激励源频率、谐振腔(缝隙)宽度、激励电压等关键影响因素对微放电效应的作用情况,实现二者数值关系的定量描述,同时推导出多载波微放电效应所产生的电子噪声具体频谱成分,使得从本质上抑制其电子噪声干扰成为可能。



1. 一种多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1)、利用射频信号发生器产生多载波激励电场信号  $E(t) = \sum_{l=1}^n E_0 \sin(2\pi f_l t)$ , 并通过耦合器施加到两平行导体面形成的缝隙中(实际中也可微波器件形成的狭小缝隙), 其中, 两平行导体面的间距为  $d$ 、表面积为  $S$ 、多载波激励电场幅值均为  $E_0$ 、载波频率为  $f_l$ 、 $n$  为载波数量、 $l$  为载波序号、 $l=1, 2, \dots, n$ , 缝隙内会发生微放电效应, 达到稳定时, 将充满谐振的电子云;

(2)、视谐振电子云全部集中到缝隙正中间, 形成一电子薄层(电子密度很高), 然后利用电子薄层表征谐振电子云所有的物理特性;

根据电子薄层所受到的电场力、磁场力以及所满足的牛顿-洛伦兹关系, 确定其运动速度  $v(t)$  为:

$$v(t) = \begin{cases} \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) + V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0), t \in (t_0, t_0 + \frac{MT}{2}) \\ \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) - [V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0)], t \in (t_0 + \frac{MT}{2}, t_0 + MT) \end{cases}$$

其中,  $m, e$  为单个电子的质量和电量,  $M$  为多载波微放电的阶数, 取正奇数(即:  $M=1, 3, 5, \dots$ ),  $t_0, V_0$  分别为电子薄层的发射时间和初始运动速度,  $T$  为电子薄层的运动周期;

(3)、周期性谐振运动的电子薄层所形成的电流(电子薄层电流)可以表示为:

$$\vec{I}(z, t) = -n'e \cdot \delta(z - z_e(t)) \cdot S \cdot v(t) \vec{z}$$

其中,  $z$  表示位置变量,  $t$  表示时间变量,  $n'$  为电子薄层的总电子数,  $n'e$  为电子薄层的总电荷,  $z_e(t)$  为  $t$  时刻的电子薄层位置,  $\delta$  为狄拉克函数,  $n'e \cdot \delta(z - z_e(t))$  等价于电子薄层电荷密度, 通过在微放电效应达到稳定状态时插入正极性探针测出,  $S$  为电子薄层面积(即平行导体面的表面积),  $\vec{z}$  为电子薄层的运动方向;

(4)、联立步骤(3)所述的电子薄层电流  $\vec{I}(z, t)$  和步骤(2)确定的电子薄层运动速度  $v(t)$ , 同时, 对电子薄层的运动速度  $v(t)$  进行傅里叶级数展开, 确定多载波微放电效应的频谱特征解析式为:

$$\vec{I}(z, t, f_0) = -n'e \delta(z - z_e(t)) S \left[ \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) + \frac{4 \left[ V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0) \right]}{k_0 \pi} \sum_{k=k_0}^{\infty} \cos \left[ 2\pi \frac{k f_0}{M} (t - t_0) \right] \right] \cdot \vec{z}$$

其中,  $k_0 = 2i - 1$ ,  $i$  为正整数,  $f_0$  为多载波激励信号的中心频率, 且满足  $f_0 \in \text{gcd}(f_1, f_2, \dots, f_n)$ ;

多载波微放电产生的电子噪声频率成分为:  $k_0 f_0 / M$ 。

## 一种多载波微放电效应频谱特征解析方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电子噪声测量技术领域,特别是多载波微放电效应产生的电子噪声抑制技术方面,更为具体地讲,涉及一种多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法。

### 背景技术

[0002] 微放电效应指的是由于二次电子倍增效应所发生的一种电子雪崩现象,研究已证实它是射频噪声、微波器件失谐、无源互调干扰产生的关键原因。特别是新形势下高功率、多载波、多制式微波通信系统的广泛应用,多载波微放电效应由于对微波器件及通信系统潜在的巨大威胁,一直是国内外同行关注的热点和研究的重点,例如:西班牙瓦伦西亚理工大学的S.Anza (2014)在他的博士论文中系统给出了多载波微放电效应的理论框架和预测模型,对多载波微放电效应的SEY方程、多载波阈值特征进行了深入研究;浙江大学宋庆庆博士在他的博士论文《多载波微放电过程的概率分析》中,采用随机漫步和BranchingLevy漫步模型,对多载波微放电过程中二次电子横向扩散所需遵循的概率模型进行了推导。

[0003] 如上所述,现有技术绝大多数都集中于多载波微放电效应的瞬态发生过程,即如何有效地通过各种手段抑制多载波微放电效应的产生。而实际情况是:多载波微放电效应很难得到完全彻底的抑制,那么,如果对多载波微放电的稳态过程进行充分研究,明确其产生的电子噪声频率成分,在通信系统的频带选择时进行有效规避,也能很好地抑制由于多载波微放电效应所导致的射频干扰。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,提出一种多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法,以明确激励源频率、谐振腔(狭窄缝隙)宽度、激励电压等关键影响因子对微放电效应的作用情况,实现二者数值关系的定量描述,同时推导出多载波微放电效应所产生的电子噪声具体频谱成分,使得从本质上抑制其电子噪声干扰成为可能。

[0005] 为实现上述发明目的,本发明多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0006] (1)、利用射频信号发生器产生多载波激励电场信号  $E(t) = \sum_{l=1}^n E_0 \sin(2\pi f_l t)$ ,并通过耦合器施加到两平行导体面形成的缝隙中(实际中也可微波器件形成的狭小缝隙),其中,两平行导体面的间距为d、表面积为S、多载波激励电场信号幅值均为 $E_0$ 、载波频率为 $f_l$ 、n为载波数量、l为载波序号、 $l=1, 2, \dots, n$ ,缝隙内会发生微放电效应,达到稳定时,将充满谐振的电子云;

[0007] (2)、视谐振电子云全部集中到缝隙正中间,形成一电子薄层(电子密度很高),然后利用电子薄层表征谐振电子云所有的物理特性;

[0008] 根据电子薄层所受到的电场力、磁场力以及所满足的牛顿-洛伦兹关系,确定其运动速度 $v(t)$ 为:

$$[0009] \quad v(t) = \begin{cases} \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) + V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0), t \in (t_0, t_0 + \frac{MT}{2}) \\ \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) - [V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0)], t \in (t_0 + \frac{MT}{2}, t_0 + MT) \end{cases}$$

[0010] 其中,  $m, e$  为单个电子的质量和电量,  $M$  为多载波微放电的阶数, 取正奇数 (即:  $M=1, 3, 5, \dots$ ),  $t_0, V_0$  分别为电子薄层的发射时间和初始运动速度,  $T$  为电子薄层的运动周期;

[0011] (3)、周期性谐振运动的电子薄层所形成的电流 (电子薄层电流) 可以表示为:

$$[0012] \quad \vec{I}(z, t) = -n'e \cdot \delta(z - z_e(t)) \cdot S \cdot v(t) \vec{z}$$

[0013] 其中,  $z$  表示位置变量,  $t$  表示时间变量,  $n'$  为电子薄层的总电子数,  $n'e$  为电子薄层的总电荷,  $z_e(t)$  为  $t$  时刻的电子薄层位置,  $\delta$  为狄拉克函数,  $n'e \cdot \delta(z - z_e(t))$  等价于电子薄层电荷密度, 通过在微放电效应达到稳定状态时插入正极性探针测出,  $S$  为电子薄层面积 (即平行导体面的表面积),  $\vec{z}$  为电子薄层的运动方向;

[0014] (4)、联立步骤 (3) 所述的电子薄层电流  $\vec{I}(z, t)$  和步骤 (2) 确定的电子薄层运动速度  $v(t)$ , 同时, 对电子薄层的运动速度  $v(t)$  进行傅里叶级数展开, 确定多载波微放电效应的频谱特征解析式为:

$$[0015] \quad \vec{I}(z, t, f_0) = -n'e \delta(z - z_e(t)) S \left[ \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) + \frac{4 \left[ V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0) \right]}{k_0 \pi} \sum_{k=k_0}^{\infty} \cos \left[ 2\pi \frac{kf_0}{M} (t - t_0) \right] \right] \cdot \vec{z}$$

[0016] 其中,  $k_0 = 2i - 1$ ,  $i$  为正整数,  $f_0$  为多载波激励信号的中心频率, 且满足  $f_0 \in \text{gcd}(f_1, f_2, \dots, f_n)$ ;

[0017] 多载波微放电产生的电子噪声频率成分为:  $k_0 f_0 / M$ 。

[0018] 本发明的目的是这样实现的。

[0019] 本发明多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法, 首先通过施加多载波激励电场信号到两平行导体面形成的缝隙两侧, 模拟多载波微放电效应, 其次, 将微放电效应稳态过程所形成的谐振电子云视为电子密度很高的电子薄层, 利用该电子薄层来表征谐振电子云所有的物理特性, 确定其运动速度和形成的电流大小, 然后对运动速度进行傅里叶级数展开, 确定多载波微放电效应的频谱特征解析式, 进而得到多载波微放电产生的电子噪声频率成分。这样得到了激励源频率、谐振腔 (缝隙) 宽度、激励电压等关键影响因子对微放电效应的作用情况, 实现二者数值关系的定量描述, 同时推导出多载波微放电效应所产生的电子噪声具体频谱成分, 使得从本质上抑制其电子噪声干扰成为可能。

## 附图说明

[0020] 图1是本发明多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法一种具体实施方式流程图;

[0021] 图2是本发明中多载波微放电效应稳态分析模型;

[0022] 图3是本发明中多载波微放电效应电子噪声时域仿真图;

[0023] 图4是本发明中多载波微放电效应电子噪声频域仿真图。

### 具体实施方式

[0024] 下面结合附图对本发明的具体实施方式进行描述,以便本领域的技术人员更好地理解本发明。需要特别提醒注意的是,在以下的描述中,当已知功能和设计的详细描述也许会淡化本发明的主要内容时,这些描述在这里将被忽略。

[0025] 图1是本发明多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法一种具体实施方式流程图。

[0026] 在本实施例中,如图1所示,本发明多载波微放电噪声效应的频谱特征解析方法,包括以下步骤:

[0027] 步骤S1:施加多载波激励电场信号到缝隙,发生微放电效应,使其充满谐振的电子云。

[0028] 利用射频信号发生器产生多载波激励电场信号  $E(t) = \sum_{l=1}^n E_0 \sin(2\pi f_l t)$ ,并通过耦合器施加到两平行导体面形成的缝隙中(实际中也可微波器件形成的狭小缝隙),其中,两平行导体面的间距为d、表面积为S、多载波激励电场幅值均为 $E_0$ 、载波频率为 $f_l$ 、n为载波数、l为载波序号、 $l=1, 2, \dots, n$ ,缝隙内会发生微放电效应,达到稳定时,将充满谐振的电子云。该谐振电子云的周期性运动是产生电子噪声的本质原因。

[0029] 步骤S2:用电子薄层表征谐振电子云所有的物理特征,根据电子行为与力学关系确定电子薄膜层运动速度。

[0030] 在本发明中,视谐振电子云全部集中到缝隙正中间,形成一电子薄层(电子密度很高),然后利用电子薄层表征谐振电子云所有的物理特性。

[0031] 本发明首先根据谐振电子云的运动情况,建立一种平行板导体面的多载波微放电效应稳态分析模型,如图2所示。其中,图2(a)为多载波微放电效应达到稳态时,两平行板导体面内充满周期运动的谐振电子云。可将此谐振电子云的全部电子等效至缝隙正中间处(d/2),简化为一电子密度极高、厚度极薄的电子薄层,如图2(b)所示。那么,能够利用此电子薄层完全表征出谐振电子云的所有物理特性。

[0032] 忽略电子薄层的运动方向,那么对电子薄层电流  $\vec{I}(z, t)$  的影响量,仅仅与电子薄层运动速度  $v(t)$  有关,根据电子薄层所受到的电场力、磁场力以及所满足的牛顿-洛伦兹关系,电子薄层的洛伦兹力表达式为:

$$[0033] \quad \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} + q\vec{E} \quad (1)$$

[0034] 其中,q为电子电荷量, $\vec{v}$ 为电子薄层运动速度, $\vec{B}$ 为磁力场, $\vec{E}$ 为电力场,忽略磁力场的影响,根据Newton第二定律,电子薄层的瞬时速度可以表示为:

$$[0035] \quad v(t) = \frac{e}{md} \int_{t_0}^t E(t) dt \quad (2)$$

[0036] 其中,m为电子质量, $t_0$ 为电子薄层的起始时间,对公式(2)进行积分结果为:

$$[0037] \quad v(t) = \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) + \left[ V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0) \right] \quad (3)$$

[0038] 式中,  $V_0$  为电子薄层的初始运动速度, 当电子薄层谐振时, 会在两平行导体面之间往复运动, 撞击平行导体面前和平行导体面后的电子薄膜层初始运动速度会反向, 那么在一个运动周期内, 可将式 (3) 改写, 即确定电子薄层运动速度  $v(t)$  为:

$$[0039] \quad v(t) = \begin{cases} \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) + V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0), t \in (t_0, t_0 + \frac{MT}{2}) \\ \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) - [V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0)], t \in (t_0 + \frac{MT}{2}, t_0 + MT) \end{cases} \quad (4)$$

[0040] 其中,  $m, e$  为单个电子的质量和电量,  $M$  为多载波微放电的阶数, 为了满足微放电效应电子的渡越时间为电场半周期的奇数倍这个条件,  $M$  取正奇数 (即:  $M=1, 3, 5, \dots$ );  $t_0, V_0$  分别为电子薄层的发射时间和初始运动速度,  $T$  为电子薄层的运动周期。初始运动速度  $V_0$  根据平行导体所用的材料以及加载的多载波激励电场幅值  $E_0$  确定, 具体可以查询平行导体所用材料的电场幅值-初始运动速度关系表确定。

[0041] 由式 (4) 可知, 电子薄层运动速度可以改写为两部分组成, 即:  $v(t) = v_{osc}(t) + v_{con}(t)$ ,  $v_{osc}(t)$  为式 (4) 中黑色实线部分, 是速度  $v(t)$  的连续分量, 它不会产生新的频率分量;  $v_{con}(t)$  为式 (4) 中黑色虚线部分, 是以  $MT$  为周期跳变的常数分量, 它会产生新的频率成分。因此, 影响多载波微放电效应电子噪声的关键在于其速度  $v(t)$  的常数分量部分  $v_{con}(t)$ 。因此, 对分量  $v_{con}(t)$  进行傅里叶级数展开为:

$$[0042] \quad v(f) = \left[ \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) + \frac{4 \left[ V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_l} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0) \right]}{k_0 \pi} \sum_{k=k_0}^{\infty} \cos \left[ 2\pi \frac{kf_0}{M} (t - t_0) \right] \right] \quad (5)$$

[0043] 步骤S3: 根据牛顿-洛伦兹关系, 确定电子薄层周期性谐振运动形成的电流。

[0044] 如图2所示, 上板为A, 下板为B, 电子薄层的面积与平行板导体面积均为  $S$ , 运动速度为  $v(t)$ , 且运动方向为  $z$  轴的正方向, 那么周期性谐振运动的电子薄层所形成的电流 (电子薄层电流) 可以表示为:

$$[0045] \quad \vec{I}(z, t) = -n'e \cdot \delta(z - z_e(t)) \cdot S \cdot v(t) \vec{z} \quad (6)$$

[0046] 其中,  $z$  表示位置变量,  $t$  表示时间变量,  $n'$  为电子薄层的总电子数,  $e$  为单个电子电量,  $n'e$  为电子薄层的总电荷,  $z_e(t)$  为  $t$  时刻的电子位置,  $\delta$  为狄拉克函数。由于狄拉克函数可以表示一个物理量在空间或时间中分布的密度, 所以,  $n'e \cdot \delta(z - z_e(t))$  可以等价为面电荷密度, 可以通过在微放电效应达到稳定状态时插入正极性探针测出,  $S$  为电子薄层面积 (即平行导体面的表面积),  $\vec{z}$  为电子薄层的运动方向。

[0047] 步骤S4: 联立步骤S3所述的电子薄层电流  $\vec{I}(z, t)$  和步骤S2确定的电子薄层运动速度  $v(t)$ , 同时, 对电子薄层的运动速度  $v(t)$  进行傅里叶级数展开, 即将公式 (5) 代入公式 (6)

中,可以确定多载波微放电效应的频谱特征解析式为:

$$\begin{aligned}
 \bar{I}(z,t,f_0) = & -n'e\delta(z-z_e(t))S \left[ \frac{E_0 e}{md2\pi f_i} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t) \right. \\
 [0048] \quad & \left. + \frac{4 \left[ V_0 - \frac{E_0 e}{md2\pi f_i} \sum_{l=1}^n \cos(2\pi f_l t_0) \right]}{k_0 \pi} \sum_{k=k_0}^{\infty} \cos \left[ 2\pi \frac{kf_0}{M} (t-t_0) \right] \right] \cdot \bar{z} \quad (7)
 \end{aligned}$$

[0049] 其中,  $k_0=2i-1$ ,  $i$  为正整数,  $f_0$  为多载波激励信号的中心频率, 且满足  $f_0 \in \text{gcd}(f_1, f_2, \dots, f_n)$ 。

[0050] 分析所述的多载波微放电效应频谱特征表达式可以发现: 多载波微放电效应产生的电子噪声频率成分为:  $k_0 f_0 / M$ , 它与多载波微放电的阶数  $M$  以及中心频率  $f_0$  有关。例如: 在发生一阶微放电时 ( $M=1$ ), 其产生的谐波频率为:  $k_0 f_0$ , 当发生高阶微放电效应时 ( $M \geq 3$ ), 其产生的次谐波频率为:  $k_0 f_0 / M$ 。

[0051] 仿真

[0052] 现以最简单多载波微放电情形  $n=2$  为例进一步说明, 同时, 为便于计算忽略单位量级, 取:

$$[0053] \quad \frac{E_0 e}{dm2\pi} = 1, \quad t_0 = 0$$

[0054] 那么, 当发生一阶双载波微放电时 ( $M=1$ ), 其频谱特征表达式可简化为:

$$\begin{aligned}
 I(f_0) = & -n'e\delta(z-z_e(t))S \left[ \frac{1}{f_1} \cos(2\pi f_1 t) + \right. \\
 [0055] \quad & \left. \frac{1}{f_2} \cos(2\pi f_2 t) + \frac{4 \left[ V_0 - \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \right]}{k_0 \pi} \sum_{k=k_0}^{\infty} \cos(2\pi k f_0 t) \right] \quad (8)
 \end{aligned}$$

[0056] 由式 (8) 易知: 当发生双载波一阶微放电时 ( $M=1$ ), 将出现  $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0 \dots$  等新的中心频率  $f_0$  奇数倍的干扰分量。利用 PIC-FDTD 程序, 且设置:  $f_1=1.5\text{GHz}$ ,  $f_2=2.0\text{GHz}$ , 其仿真结果如图 3、4 所示。仿真结果与分析式 (8) 有较好的一致性, 由分析式 (8) 和仿真结果图 4 可以知道: 干扰频率越高, 其幅值越小, 故衰减越大, 所以主要干扰为接近载波频率  $f_1$  和  $f_2$  的几个较低阶谐波与次谐波干扰分量, 最严重的为一阶、三阶和五阶干扰分量 (即:  $f_0, 3f_0, 5f_0$ , 其中,  $3f_0$  与载波频率  $f_1$  相同, 使得频率为  $f_1$  的载波幅值略高于频率为  $f_2$  的载波幅值, 如图 4 所示), 已被较多实验检测证实。

[0057] 尽管上面对本发明说明性的具体实施方式进行了描述, 以便于本技术领域的技术人员理解本发明, 但应该清楚, 本发明不限于具体实施方式的范围, 对本技术领域的普通技术人员来讲, 只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内, 这些变化是显而易见的, 一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

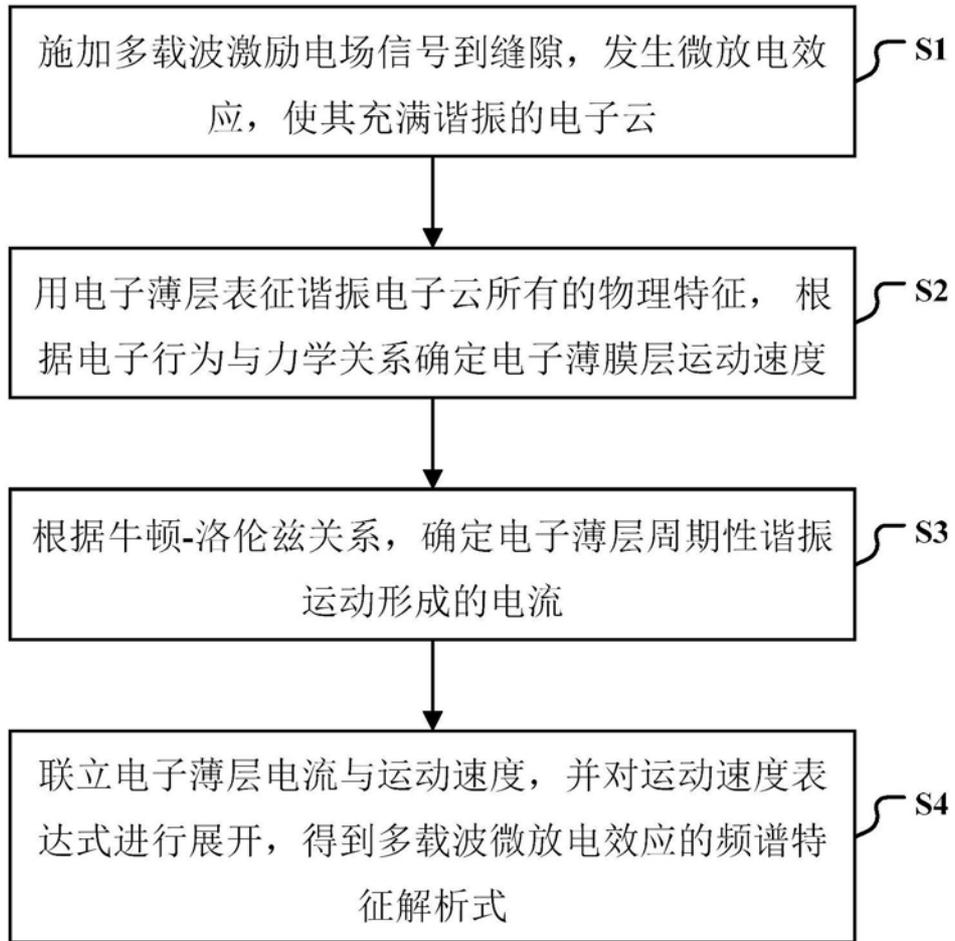


图1

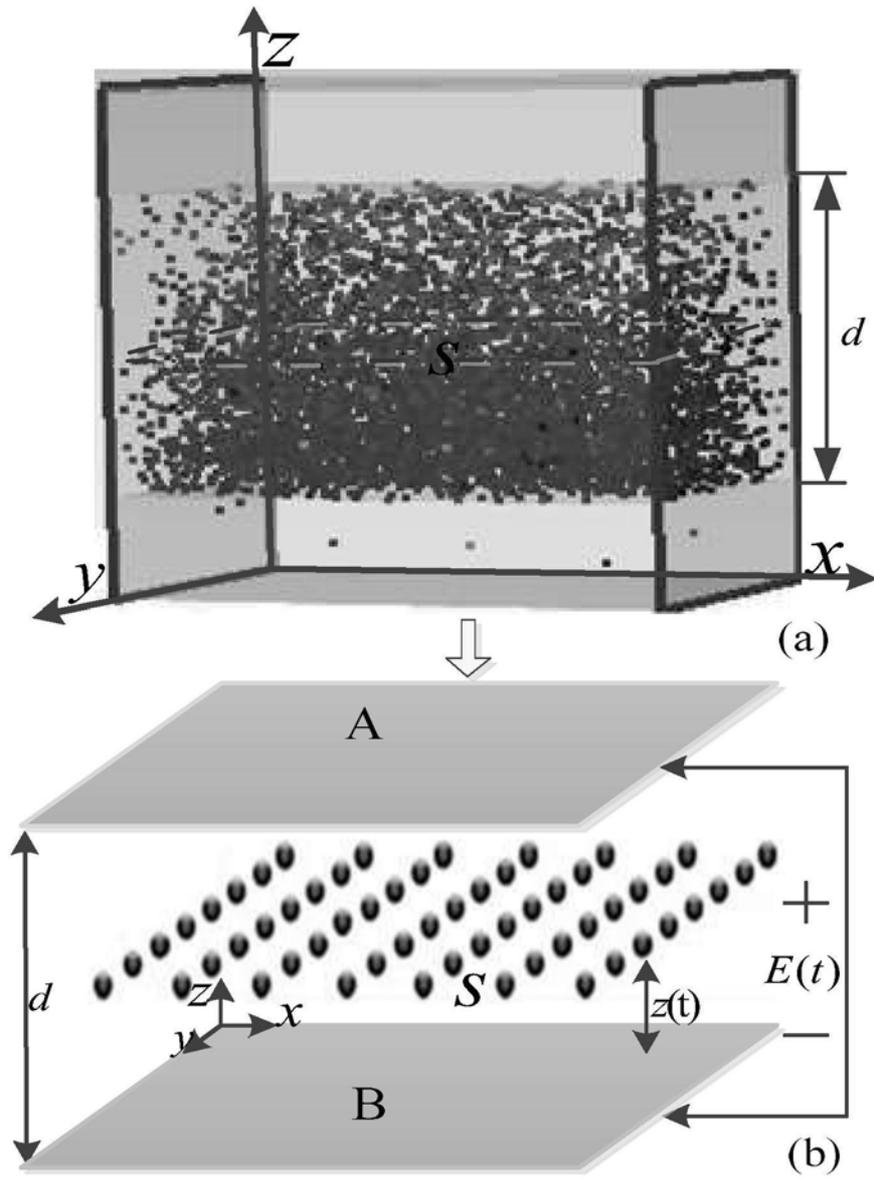


图2

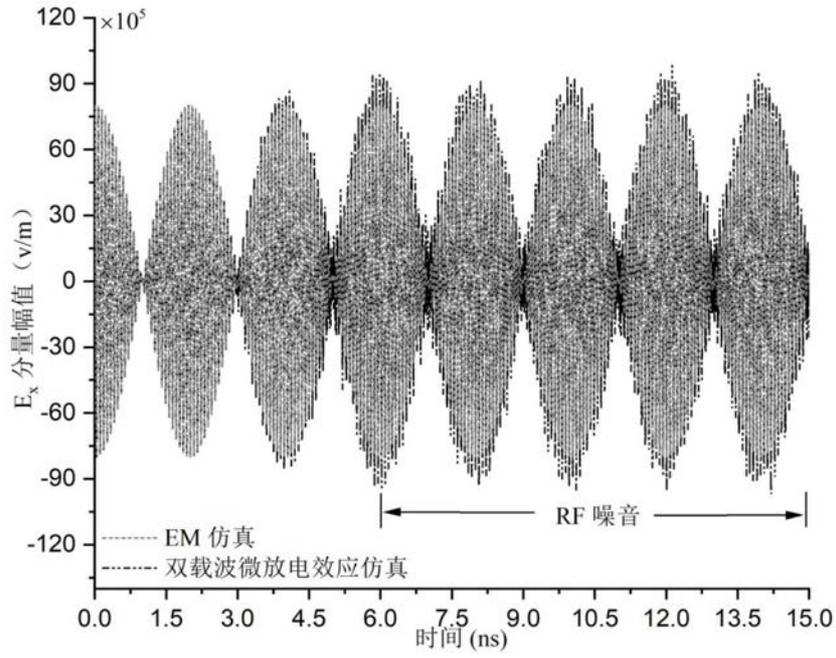


图3

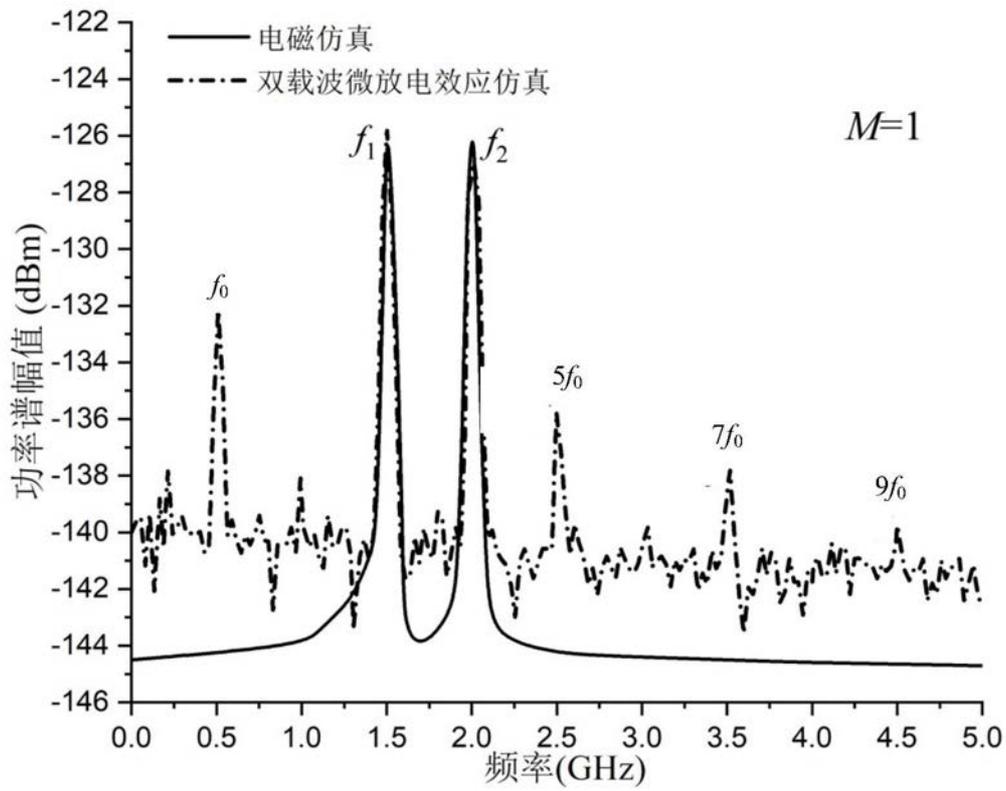


图4