



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106596112 B

(45)授权公告日 2018.08.14

(21)申请号 201611169259.4

(22)申请日 2016.12.16

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106596112 A

(43)申请公布日 2017.04.26

(73)专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150000 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

(72)发明人 魏立秋 丁永杰 李文博 于达仁

(74)专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569

代理人 王加贵

(51)Int.Cl.

G01M 15/00(2006.01)

G01M 15/02(2006.01)

(56)对比文件

CN 105574883 A, 2016.05.11, 全文.

US 2012/0217876 A1, 2012.08.30, 全文.

CN 1209036 A, 1999.02.24, 全文.

CN 104483132 A, 2015.04.01, 全文.

CN 105067274 A, 2015.11.18, 全文.

白德宇.真空环境对霍尔推力器性能影响的理论和实验研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2011,(第S1期),第29、47-58页.

鄂鹏等.真空背压对霍尔推力器放电特性影响的实验研究.《物理学报》.2010,第59卷(第12期),第8676-8684页.

审查员 唐松柏

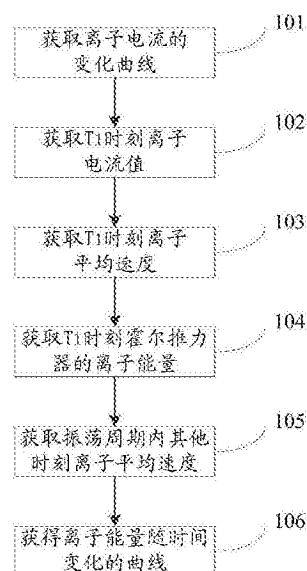
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统

(57)摘要

本发明公开一种霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统。该方法通过测量多栅探针不同制止电压下的离子电流随时间变化曲线,获取同一时刻不同制止电压对应的电流值,得到该时刻电流与电压函数关系,然后求得该时刻的离子平均速度,求得该时刻离子能量;以设定时间间隔获取振荡周期内其它时刻的离子能量,将不同时刻的离子能量按照时间顺序拟合,得到低频振荡周期内离子能量分布随时间的变化曲线。本发明实现了测量羽流区离子能量分布的动态特性,获得羽流区离子能量分布在低频振荡周期内的变化曲线,解决了现有的测量方法无法获得几十微秒量级羽流区离子能量分布随时间动态变化的难题,为研究霍尔推力器羽流区离子能量分布变化提供有效技术途径。



1. 一种霍尔推力器离子能量分布测量方法,其特征在于,所述方法包括:

获取多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$;所述多栅探针位于霍尔推力器通道上,所述多栅探针中心轴线上与所述通道中心轴线重合;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_1 为所述多栅探针制止电压为 U_1 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_2 为所述多栅探针制止电压为 U_2 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_3 为所述多栅探针制止电压为 U_3 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_n 为所述多栅探针制止电压为 U_n 时得到的曲线;

根据离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$,分别获取振荡周期内时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$;

根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,获取时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$;

根据所述时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$,获得时刻 T_1 所述霍尔推力器的离子能量;

以设定时间间隔分别获取所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量;

根据所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量,获得振荡周期内所述霍尔推力器的离子能量分布曲线。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,获取时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$,具体包括:

根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 得到时刻 T_1 电流值与电压值的函数关系;

根据时刻 T_1 所述电压值与电流值的函数关系获得时刻 T_1 的离子速度分布函数 $g(v(t_1))$;

$$\text{利用公式 } \langle v(t_1) \rangle = \frac{\int_0^{\infty} v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1)}{\int_0^{\infty} g(v(t_1)) dv(t_1)} \text{ 获得 } T_1 \text{ 时刻的离子平均速度 } \langle v(t_1) \rangle, \text{ 其中 } v(t_1) \text{ 为 } T_1 \text{ 时刻的离子速度。}$$

(t_1) 为 T_1 时刻的离子速度。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据所述时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$,获得时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量,具体包括:

利用公式 $E_1 = \frac{1}{2} m \langle v(t_1) \rangle^2$ 计算时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量 E_1 ,其中 m 为离子质量, $\langle v(t_1) \rangle$ 为离子平均速度。

4. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述根据时刻 T_1 所述电压值与电流值的函数关系获得时刻 T_1 的离子速度分布函数 $g(v(t_1))$,具体包括:

获取所述电流值与所述离子速度分布函数的关系表达式为:

$$I(t_1) = es \int_{\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}}^{\infty} v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1), \text{ 其中 } e \text{ 为单位电荷电量, } s \text{ 为多栅探头接受面积, } m \text{ 为}$$

离子质量, $I(t_1)$ 表示 T_1 时刻电压为 $U(t_1)$ 时的离子电流值;

设定时刻 T_1 电压值与电流值的函数关系 $I(t_1) = h(U(t_1))$, 将所述电流值与所述离子速度分布函数的关系表达式变形, 获得变形后表达式为:

$$h'(U(t_1)) = \frac{dI(t_1)}{dU(t_1)} = -\frac{e^2 s}{m} g\left(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}\right), \text{ 即 } g\left(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}\right) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right);$$

根据离子速度与电压值关系表达式 $v(t_1) = \sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}$ 获取时刻 T_1 的离子速度分布函数 $g(v(t_1))$ 为:

$$g(v(t_1)) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1)) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right).$$

5. 一种霍尔推力器离子能量分布测量系统, 其特征在于, 所述系统包括:

曲线获取模块, 用于获取多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$; 所述多栅探针位于霍尔推力器通道上, 所述多栅探针中心轴线上与所述通道中心轴线重合; 所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_1 为所述多栅探针制止电压为 U_1 时得到的曲线; 所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_2 为所述多栅探针制止电压为 U_2 时得到的曲线; 所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_3 为所述多栅探针制止电压为 U_3 时得到的曲线; 所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_n 为所述多栅探针制止电压为 U_n 时得到的曲线;

电流获取模块, 用于根据离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$, 分别获取振荡周期内时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$;

平均速度获取模块, 用于根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, 获取时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$;

离子能量获取模块, 用于根据所述时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$, 获得时刻 T_1 的霍尔推力器的离子能量, 还用于以设定时间间隔分别获取所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量; 所述离子能量获取模块具体包括:

离子能量获取单元, 用于利用公式 $E_1 = \frac{1}{2} m \langle v(t_1) \rangle^2$ 计算时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量 E_1 , 其中 m 为离子质量, $\langle v(t_1) \rangle$ 为离子平均速度;

离子能量分布曲线获取模块, 用于根据所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量, 获得振荡周期内所述霍尔推力器的离子能量分布曲线。

6. 根据权利要求5所述的系统, 其特征在于, 所述平均速度获取模块具体包括:

函数关系获取单元, 用于根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 得到时刻 T_1 电流值与电压值的函数关系;

速度分布函数获取单元, 用于根据时刻 T_1 所述电压值与电流值的函数关系获得时刻 T_1 的离子速度分布函数 $g(v(t_1))$;

平均速度获取单元, 用于利用公式 $\langle v(t_1) \rangle = \frac{\int_0^\infty v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1)}{\int_0^\infty g(v(t_1)) dv(t_1)}$ 获得 T_1 时刻的离子平

均速度 $\langle v(t_1) \rangle$, 其中 $v(t_1)$ 为 T_1 时刻的离子速度。

7. 根据权利要求6所述的系统,其特征在于,所述速度分布函数获取单元具体包括:

电流值与速度分布函数获取子单元,用于获取所述电流值与所述离子速度分布函数的关系表达式为: $I(t_1) = es \int_{\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}}^{\infty} v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1)$, 其中e为单位电荷电量,s为多栅探头接受面积,m为离子质量,I(t₁)表示T₁时刻电压为U(t₁)时的电流值;

函数关系表达式变形子单元,用于根据设定的时刻T₁电压值与电流值的函数关系I(t₁)=h(U(t₁)),将所述电流值与所述离子速度分布函数的关系表达式变形,获得变形后的表达式为: $h'(U(t_1)) = \frac{dI(t_1)}{dU(t_1)} = -\frac{e^2 s}{m} g(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}})$, 即 $g(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1)) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)} \right)$;

速度函数获取子单元,用于根据离子速度与电压值关系表达式 $v(t_1) = \sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}$ 获得:

$$g(v(t_1)) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1)) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)} \right)。$$

一种霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及离子体推进领域,特别是涉及一种霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统。

背景技术

[0002] 霍尔推力器自1970年成功研制以来,因其具有高效率、高比冲及高可靠性等优点,被广泛应用于卫星位置保持和轨道转移等空间推进任务。霍尔推力器羽流一般由电子、高能离子电荷交换产生的低能离子以及中性原子组成。其中高能离子与航天器表面碰撞使其产生溅射和侵蚀,溅射的物质会对航天器上的太阳能帆板等敏感表面产生污染,进而使其性能下降或失效。同时高能离子直接与敏感表面碰撞,使敏感表面被破坏而性能降级或失效,从而导致航天器无法完成预定任务。

[0003] 霍尔推力器的羽流离子能量分布和通道内的电离过程是一一对应的,因此可以通过离子能量分布分析推力器中性原子的电离机制以及磁场和电势的分布情况,进而可以分析通道内离子束流的加速特性,也被用来评价推力器对飞行器表面相互作用的一个重要参数。因此对霍尔推力器羽流离子能量分布的评估测量是霍尔推力器及航天器总体设计研究的重要内容之一。

[0004] 霍尔推力器的低频振荡特性会使羽流区离子能量分布发生变化,目前的测量方法只能测量推力器在稳态条件下的羽流离子能量分布,没有实际应用价值,而在低频振荡周期内(通常为几十个微秒),很难获得羽流中离子能量分布的动态特性。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统,通过霍尔推力器低频振荡的调制作用,获得霍尔推力器的离子能量随低频振荡周期的动态变化特性曲线,为研究放电振荡与羽流区离子能量分布的关系了有效的技术途径。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0007] 一种霍尔推力器离子能量分布测量方法,所述方法包括:

[0008] 获取多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$;所述多栅探针位于霍尔推力器通道上,所述多栅探针中心轴线上与所述通道中心轴线重合;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_1 为所述多栅探针制止电压为 U_1 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_2 为所述多栅探针制止电压为 U_2 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_3 为所述多栅探针制止电压为 U_3 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_n 为所述多栅探针制止电压为 U_n 时得到的曲线;

[0009] 根据离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$,分别获取振荡周期内时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$;

[0010] 根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,获取时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$;

[0011] 根据所述时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$, 获得时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量;

[0012] 以设定时间间隔分别获取所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量;

[0013] 根据所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量, 获得振荡周期内所述霍尔推力器的离子能量分布曲线。

[0014] 可选的, 所述根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, 获取时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$, 具体包括:

[0015] 根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 得到时刻 T_1 电流值与电压值的函数关系;

[0016] 根据时刻 T_1 所述电压值与电流值的函数关系获得时刻 T_1 的离子速度分布函数 $g(v(t_1))$;

[0017] 利用公式 $\langle v(t_1) \rangle = \frac{\int_0^{\infty} v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1)}{\int_0^{\infty} g(v(t_1)) dv(t_1)}$ 获得 T_1 时刻的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$ 。

[0018] 可选的, 所述根据所述时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$, 获得时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量, 具体包括:

[0019] 利用公式 $E_1 = \frac{1}{2} m \langle v(t_1) \rangle^2$ 计算时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量 E_1 , 其中 m 为离子质量, $\langle v(t_1) \rangle$ 为离子平均速度。

[0020] 可选的, 所述根据时刻 T_1 所述电压值与电流值的函数关系获得时刻 T_1 的离子速度分布函数 $g(v(t_1))$, 具体包括:

[0021] 获取所述电流值与所述离子速度分布函数的关系表达式为:

$$I(t_1) = es \int_0^{\infty} \frac{v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1)}{\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}}, \text{ 其中 } e \text{ 为单位电荷电量, } s \text{ 为多栅探头接受面积, } m \text{ 为离子}$$

质量, $I(t_1)$ 表示 T_1 时刻电压为 $U(t_1)$ 时的电流值;

[0022] 设定时刻 T_1 电压值与电流值的函数关系 $I(t_1) = h(U(t_1))$, 将所述电流值与所述离子速度分布函数的关系表达式变形, 获得变形后表达式为:

$$h'(U(t_1)) = \frac{dI(t_1)}{dU(t_1)} = -\frac{e^2 s}{m} g\left(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}\right), \text{ 即 } g\left(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}\right) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right);$$

[0023] 根据离子速度与电压值关系表达式 $v(t_1) = \sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}$ 获取时刻 T_1 的离子速度分布

$$\text{函数 } g(v(t_1)) \text{ 为: } g(v(t_1)) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1)) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right)。$$

[0024] 一种霍尔推力器离子能量分布测量系统, 所述系统包括:

[0025] 曲线获取模块,用于获取多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$;所述多栅探针位于霍尔推力器通道上,所述多栅探针中心轴线上与所述通道中心轴线重合;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_1 为所述多栅探针制止电压为 U_1 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_2 为所述多栅探针制止电压为 U_2 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_3 为所述多栅探针制止电压为 U_3 时得到的曲线;所述离子电流随振荡周期变化的曲线 L_n 为所述多栅探针制止电压为 U_n 时得到的曲线;

[0026] 电流获取模块,用于根据离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$,分别获取振荡周期内时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$;

[0027] 平均速度获取模块,用于根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,获取时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$;

[0028] 离子能量获取模块,用于根据所述时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$,获得时刻 T_1 的霍尔推力器的离子能量,还用于以设定时间间隔分别获取所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量;

[0029] 离子能量分布曲线获取模块,用于根据所述振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的所述霍尔推力器的离子能量,获得振荡周期内所述霍尔推力器的离子能量分布曲线。

[0030] 可选的,所述平均速度获取模块具体包括:

[0031] 函数关系获取单元,用于根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 得到时刻 T_1 电流值与电压值的函数关系;

[0032] 速度分布函数获取单元,用于根据时刻 T_1 所述电压值与电流值的函数关系获得时刻 T_1 的离子速度分布函数 $g(v(t_1))$;

[0033] 平均速度获取单元,用于利用公式 $\langle v(t_1) \rangle = \frac{\int_0^{\infty} v(t_1)g(v(t_1))dv(t_1)}{\int_0^{\infty} g(v(t_1))dv(t_1)}$ 获得 T_1 时刻的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$ 。

[0034] 可选的,所述离子能量获取模块具体包括:

[0035] 离子能量获取单元,用于利用公式 $E_1 = \frac{1}{2}m\langle v(t_1) \rangle^2$ 计算时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量 E_1 ,其中 m 为离子质量, $\langle v(t_1) \rangle$ 为离子平均速度。

[0036] 可选的,所述速度分布函数获取单元具体包括:

[0037] 电流值与速度分布函数获取子单元,用于获取所述电流值与所述离子速度分布函

数的关系表达式为: $I(t_1) = es \frac{\int_0^{\infty} v(t_1)g(v(t_1))dv(t_1)}{\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}}$,其中 e 为单位电荷电量, s 为多栅探头

接受面积, m 为离子质量, $I(t_1)$ 表示 T_1 时刻电压为 $U(t_1)$ 时的电流值;

[0038] 函数关系表达式变形子单元,用于根据设定的时刻 T_1 电压值与电流值的函数关系 $I(t_1) = h(U(t_1))$,将所述电流值与所述离子速度分布函数的关系表达式变形,获得变形后

的表达式为： $h'(U(t_1)) = \frac{dI(t_1)}{dU(t_1)} = -\frac{e^2 s}{m} g(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}})$ ，即 $g(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1)) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right)$ ；

[0039] 速度函数获取子单元，用于根据离子速度与电压值关系表达式 $v(t_1) = \sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}$ 获

得： $g(v(t_1)) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1)) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right)$ 。

[0040] 根据本发明提供的具体实施例，本发明公开了以下技术效果：

[0041] 通过霍尔推力器低频振荡的调制作用，获得霍尔推力器的离子能量随低频振荡周期的动态变化特性曲线，实现了测量羽流区离子能量分布的动态特性，解决了现有的测量方法无法获得几十微秒量级羽流区离子能量分布随时间动态变化的难题，为研究霍尔推力器羽流区离子能量分布变化提供有效技术途径。

附图说明

[0042] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0043] 图1为本发明霍尔推力器离子能量分布测量方法流程图；

[0044] 图2为本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统结构图；

[0045] 图3为本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统安装装置图；

[0046] 图4为本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统多栅探针测量电路图；

[0047] 图5为本发明霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统实施例1的多栅探针制止电压下的放电电流曲线和所接受到的离子电流曲线；

[0048] 图6为本发明霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统实施例1的离子能量分布曲线。

具体实施方式

[0049] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0050] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0051] 图1为本发明霍尔推力器离子能量分布测量方法流程图。如图1所示，所述方法包括：

[0052] 步骤101：获取离子电流的变化曲线。具体是指获取多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ ；曲线 L_1 为多栅探针制止电压为 U_1 时得到的曲线，用函数 $I_1(t) = f(U_1(t))$ 表示；曲线 L_2 为多栅探针制止电压为 U_2 时得到的曲线，用函数 $I_2(t) = f$

($U_2(t)$)表示;曲线 L_3 为多栅探针制止电压为 U_3 时得到的曲线,用函数 $I_3(t) = f(U_3(t))$ 表示;曲线 L_n 为多栅探针制止电压为 U_n 时得到的曲线,用函数 $I_n(t) = f(U_n(t))$ 表示。

[0053] 步骤102:获取 T_1 时刻离子电流值,具体是根据步骤101得到的离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$,分别获取振荡周期内同一时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 。

[0054] 步骤103:获取 T_1 时刻离子平均速度,具体是根据步骤102获得的同一时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 和对应的离子电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,得到时刻 T_1 的电流值与电压值函数关系表达式 $I(t_1) = h(U(t_1))$;将电流值与离子速度分布函数的关系表达式

$$I(t_1) = es \int_{\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}}^{\infty} v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1) \text{ 变形, 获得变形后表达式为: } h'(U(t_1)) = \frac{dI(t_1)}{dU(t_1)} = -\frac{e^2 s}{m} g\left(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}\right),$$

$$\text{即 } g\left(\sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}}\right) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right); \text{ 其中 } e \text{ 为单位电荷电量, } s \text{ 为多栅探头接受面积, } m \text{ 为}$$

离子质量, $I(t_1)$ 表示 T_1 时刻电压为 $U(t_1)$ 时的电流值;根据离子速度与电压值关系表达式

$$v(t_1) = \sqrt{\frac{2eU(t_1)}{m}} \text{ 获取时刻 } T_1 \text{ 的离子速度分布函数 } g(v(t_1)) \text{ 为:}$$

$$g(v(t_1)) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1)) = \frac{m}{e^2 s} \cdot \left(-\frac{dI(t_1)}{dU(t_1)}\right); \text{ 利用 } \langle v(t_1) \rangle = \frac{\int_0^{\infty} v(t_1) g(v(t_1)) dv(t_1)}{\int_0^{\infty} g(v(t_1)) dv(t_1)} \text{ 公式获得 } T_1$$

时刻的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$,将 $g(v(t_1)) = -\frac{m}{e^2 s} \cdot h'(U(t_1))$ 代入后,得到

$$\langle v(t_1) \rangle = \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{\int_0^{\infty} h'(U(t_1)) dU(t_1)}{\int_0^{\infty} h'(U(t_1)) U(t_1)^{\frac{1}{2}} dU(t_1)}.$$

[0055] 步骤104:获取 T_1 时刻的霍尔推力器的离子能量。具体为利用公式

$$E_1 = \frac{1}{2} m \langle v(t_1) \rangle^2 \text{ 计算时刻 } T_1 \text{ 霍尔推力器的离子能量 } E_1, \text{ 其中 } m \text{ 为离子质量, } \langle v(t_1) \rangle \text{ 为离子平均速度。}$$

[0056] 步骤105:获取振荡周期内其他时刻的霍尔推力器的离子能量。具体为按照设定时间间隔(例如,时间间隔为2微秒)分别获取振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 对应的电流值,得到 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 时刻的电压值与电流值函数关系表达式,参照步骤103、104依次得到 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 时刻的霍尔推力器的离子能量。

[0057] 步骤106:获取离子能量分布曲线。具体为根据步骤105中得到的 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 时刻的霍尔推力器的离子能量,生成离子能量与时间的关系分布曲线。

[0058] 图2为本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统结构图。如图2所示,系统包括:曲线获取模块201,用于获取多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2,$

$L_3, \dots, L_n$;

[0059] 电流获取模块202,用于根据离子电流随振荡周期变化的曲线 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$,分别获取振荡周期内时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 对应的电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$;

[0060] 平均速度获取模块203,用于根据时刻 T_1 的电压值 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 与对应的电流值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,获取时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$;

[0061] 离子能量获取模块205,用于根据所述时刻 T_1 的离子平均速度 $\langle v(t_1) \rangle$,获得时刻 T_1 的霍尔推力器的离子能量,还用于以设定时间间隔分别获取振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的霍尔推力器的离子能量;

[0062] 离子能量分布曲线获取模块206,用于根据振荡周期内时刻 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 的霍尔推力器的离子能量,确定离子能量随振荡周期变化的关系分布曲线。

[0063] 图3为本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统安装装置图。如图3所示,包括多栅探针301,霍尔推力器302,羽流区303,通道中心轴线304,真空罐305。进行霍尔推力器离子能量测量时,将多栅探针301放置在通道上,多栅探针301中心轴线与通道中心轴线304重合,高度与霍尔推力器通道中心平齐,距离通道出口截面有一定距离,例如距离可以为75cm。

[0064] 图4为本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统多栅探针测量电路图。如图4所示,401表示多栅探针接收到的离子电流,402表示多栅探针的制止电压。

[0065] 本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统及方法实施例1:

[0066] 将多栅探针放置在通道中心轴线上,距离通道出口截面75cm,高度与推力器通道中心平齐。

[0067] 调整多栅探针制止电压为 U_1 时,测得多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 L_1 和放电电流曲线;调整多栅探针制止电压为 U_2 时,测得多栅探针接收的离子电流随振荡周期变化的曲线 L_2 和放电电流曲线,直至将所选的 n 个多栅探针制止电压下的离子电流随振荡周期变化的曲线和放电电流曲线测量完毕。由于低频振荡周期几乎不变,在每个多栅探针制止电压下获得的放电电流的波动曲线相似,因此设为 n 个多栅探针制止电压下的放电电流曲线相同,设为 L_d ,如图5所示。

[0068] 在 L_d 曲线上选择一个振荡周期,在该振荡周期选择一个时刻,依次获得曲线 $L_1, L_2, \dots, L_n$ 上该时刻的电流值,根据该时刻不同曲线获得的电流值与电压值生成该时刻的电流与电压关系函数,该时刻的电流与电压关系函数计算出该时刻的羽流区离子平均速度,进而利用公式 $E_1 = \frac{1}{2} m \langle v(t_1) \rangle^2$ 计算时刻 T_1 霍尔推力器的离子能量 E_1 ,其中 m 为离子质量, $\langle v(t_1) \rangle$ 为离子平均速度。

[0069] 再在 L_d 曲线上每隔2微秒取一个时刻,并进行与上述一样的离子能量获得方法,直至取完这一个振荡周期内的所有时刻,便可得到 i 个时刻的霍尔推力器的离子能量,将得到的 i 个离子能量值根据时间拟合,便可以得到在振荡周期内离子能量的分布曲线。如图6所示,图6为本发明霍尔推力器离子能量分布测量方法及系统实施例1的离子能量分布曲线。

[0070] 本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统及方法实施例2:该实施例与实施例1不同的地方是:在放电电流曲线 L_d 上以0.15微秒为间隔选取一个时刻值,其他的测量过程与

实施例1相同。

[0071] 本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统及方法实施例3:该实施例与实施例1不同的地方是:多栅探针距离通道出口截面50cm,其他的测量过程与实施例1相同。

[0072] 本发明霍尔推力器离子能量分布测量系统及方法实施例4:该实施例与实施例1不同的地方是:多栅探针距离通道出口截面100cm,其他的测量过程与实施例1相同。

[0073] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。

[0074] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

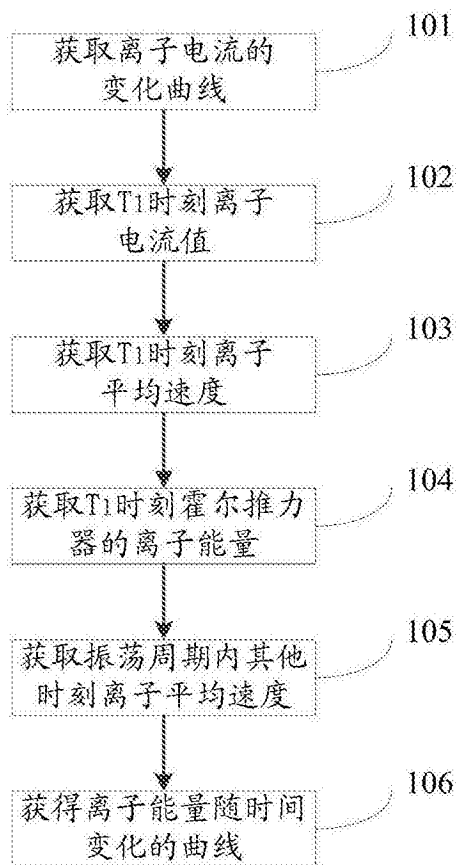


图1

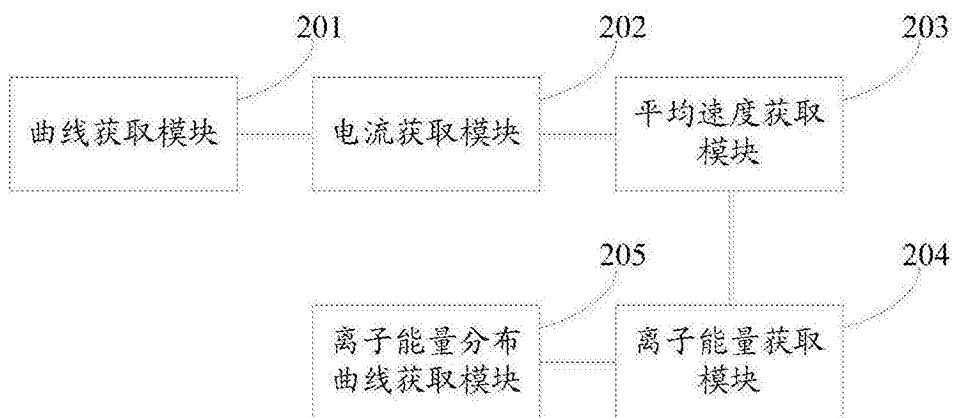


图2

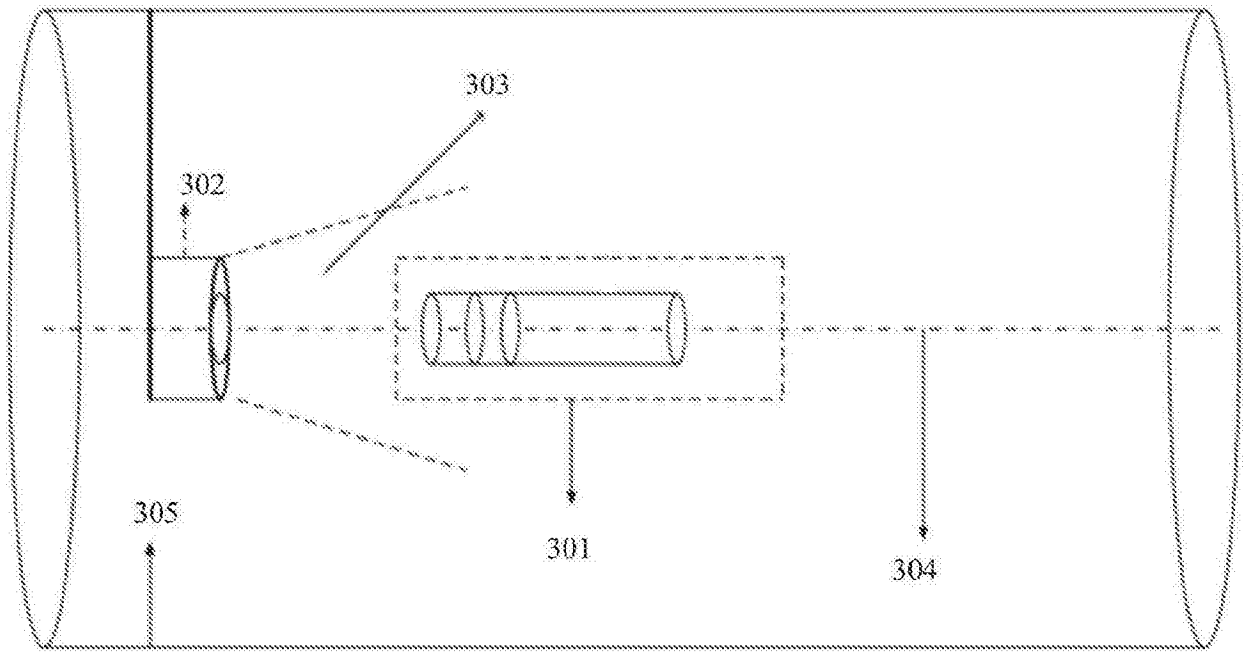


图3

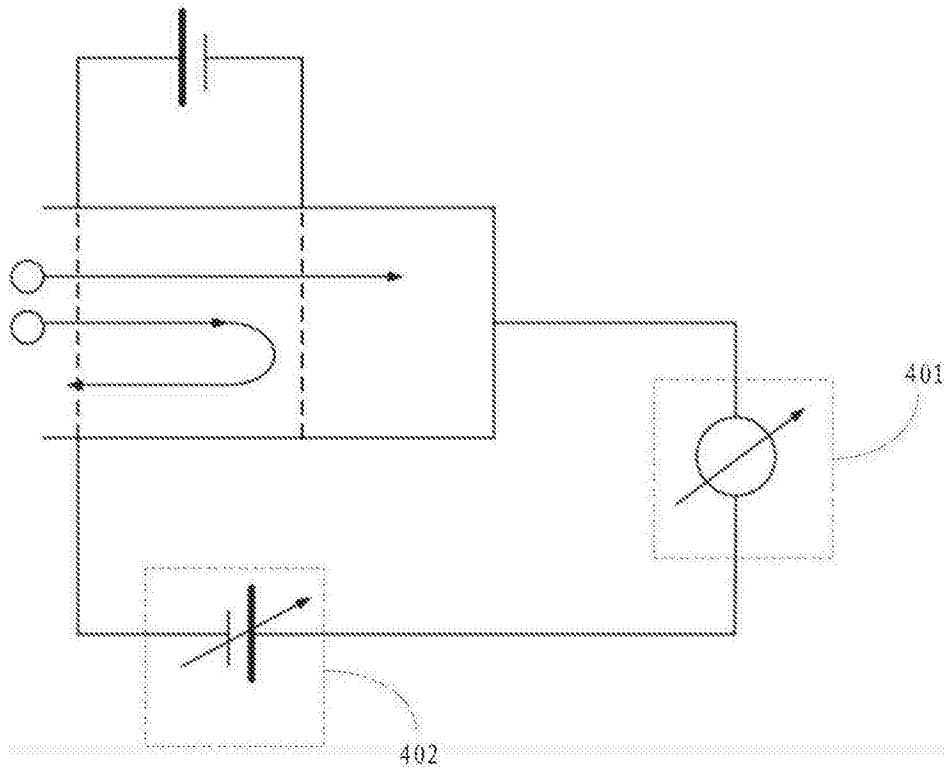


图4

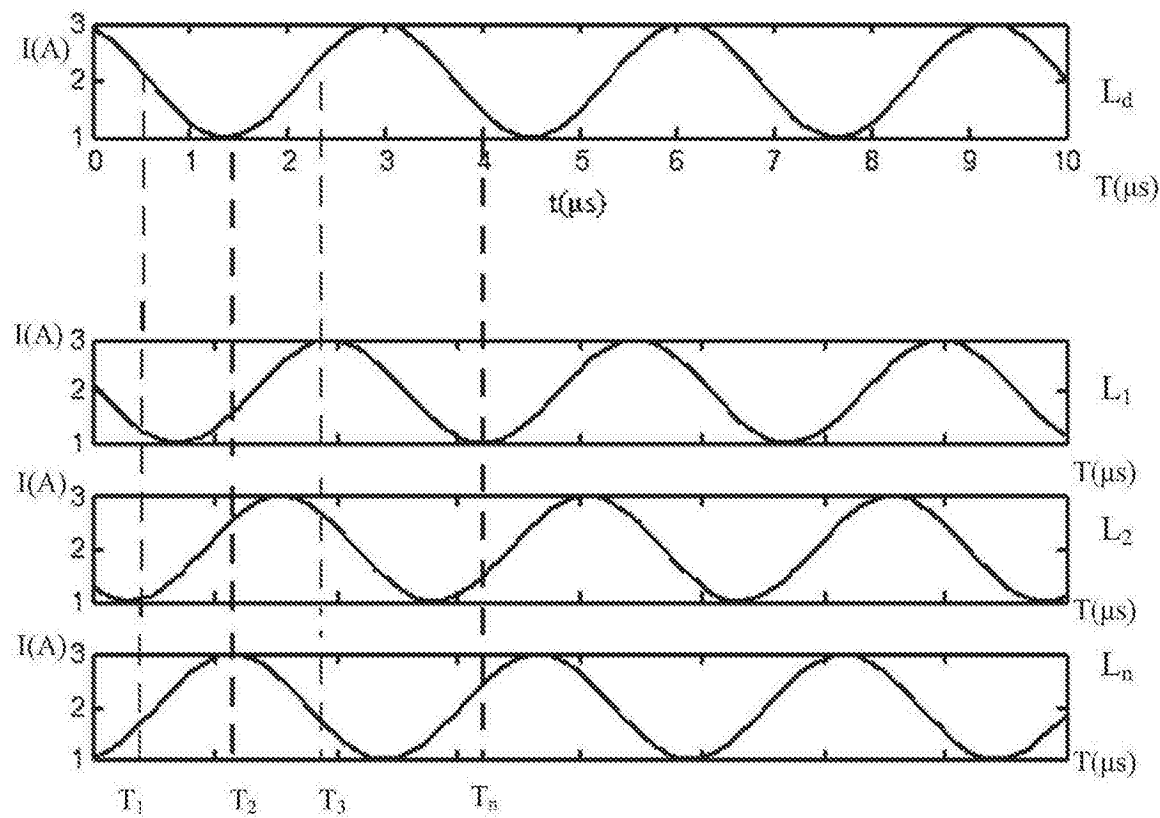


图5

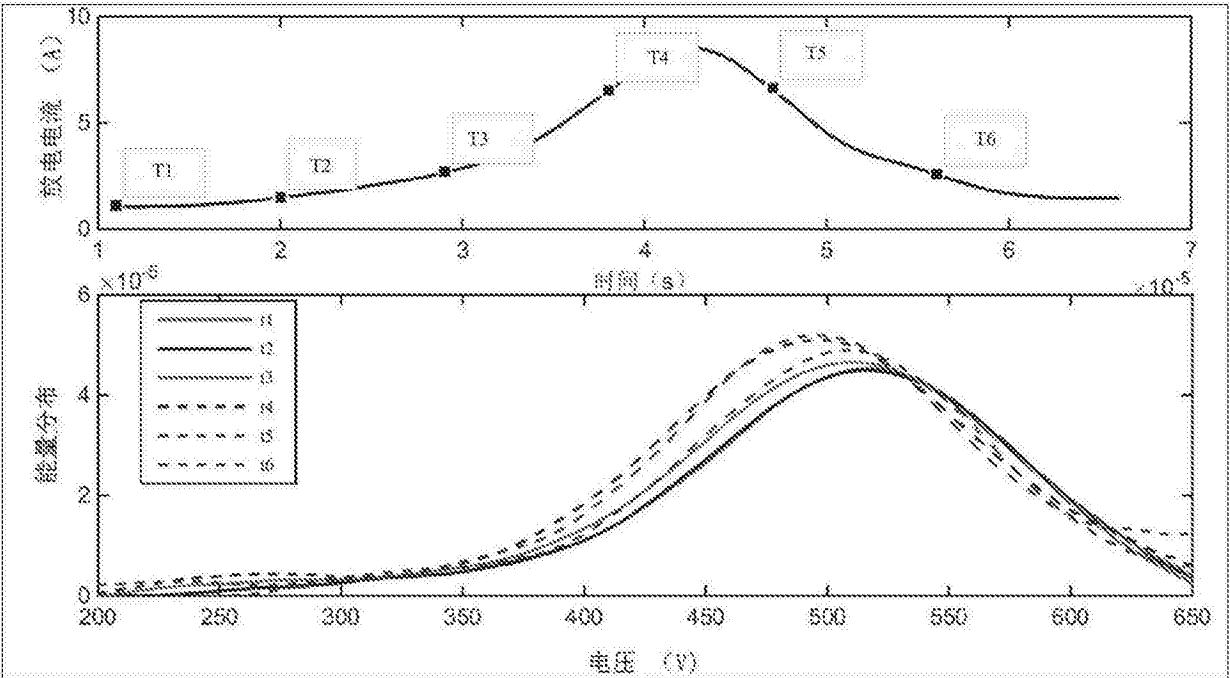


图6