



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111947881 B

(45) 授权公告日 2021.05.18

(21) 申请号 202010715225.0

G01M 9/04 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.23

H05H 1/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111947881 A

(56) 对比文件

CN 110095248 A, 2019.08.06

CN 110557876 A, 2019.12.10

(43) 申请公布日 2020.11.17

CN 110677968 A, 2020.01.10

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

CN 109640501 A, 2019.04.16

审查员 何昱康

(72) 发明人 林鑫 王传胜 李飞 张仕忠  
余西龙

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390

代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.

G01M 9/06 (2006.01)

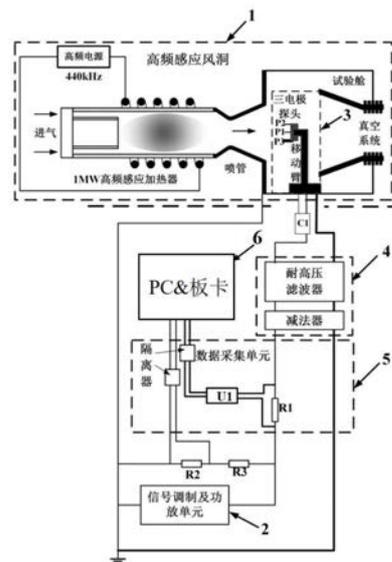
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统

(57) 摘要

本发明公开一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统。所述MW级高频感应风洞产生等离子体来流,信号调制及功放单元根据风洞工作状态输出相应频率的扫描电压给探针单元收集带电粒子的电压源,通过独特的三电极探针结合噪声抑制电路将等离子体中的高频噪声及工信干扰噪声消除,所述电流采集单元采集到去噪后的电流信号经过隔离器H1与地线隔离,同扫描电压信号同时被数据处理单元记录并处理得到电子温度和电子密度。本发明消除了MW极高频感应风洞流场中强烈的电磁干扰,同时提出利用可高频扫描的优点,结合移动臂的方法实现MW极高频感应风洞流场中电子温度和电子密度径向分布的诊断。



1. 一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于,包含MW级高频感应风洞(1)、信号调制及功放单元(2)、探针单元(3)、噪声抑制单元(4)、电流采集单元(5)和数据处理单元(6),所述MW级高频感应风洞(1)产生等离子体来流,信号调制及功放单元(2)根据风洞工作状态输出相应频率的扫描电压给探针单元(3),探针单元(3)收集带电粒子,探针单元(3)的信号噪声通过噪声抑制单元(4)进行消除,所述电流采集单元(5)采集到去噪后的电流信号经过隔离器H1与地线隔离,与扫描电压信号同时被数据处理单元(6)记录并处理得到电子温度和电子密度;

所述探针单元(3)设置有三电极探头和移动臂,三电极探头安装在移动臂顶端,移动臂沿MW级高频感应风洞(1)的喷管径向水平移动;

所述三电极探头设置有探针极P1、参考极P2和补偿极P3,探针极P1和参考极P2均设置为长径比大于20的钨丝;参考极P2为噪声抑制单元(4)的减法器提供消除工频噪声干扰的输入电流源;补偿极P3设置为面积大于探针极P1十倍左右的金属板,通过隔直电容C1与探针极P1相连,通过补偿极P3补偿探针极P1周围的等离子体电势振动。

2. 根据权利要求1所述的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于:所述MW级高频感应风洞(1)设置有MW级高频等离子发生器、喷管、试验段、扩压段、冷却器和真空机组。

3. 根据权利要求1所述的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于:所述信号调制及功放单元(2)产生正弦波形、频率100Hz~10kHz、振幅30V~80V扫描电压信号,为探针收集带电粒子提供电压源,其置于铝质金属屏蔽盒内。

4. 根据权利要求1所述的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于:所述噪声抑制单元(4)抑制探针电流噪声,包括滤波器和减法器,噪声抑制单元(4)置于铝质金属屏蔽盒内。

5. 根据权利要求4所述的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于:所述滤波器抑制高频噪声,其设置耐压200V,频率抑制范围0.4MHz到50MHz;所述减法器结合参考极P2提供的输入电流源主动消除工频噪声干扰。

6. 根据权利要求1所述的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于:所述电流采集单元(5)包括取样电阻R1、运算放大器U1和隔离器H1,运算放大器U1获得取样电阻R1两端的共模电压信号,该共模电压信号经隔离器H1隔离地线噪声和扫描电压串联噪声;电流采集单元(5)置于铝质金属屏蔽盒内。

7. 根据权利要求1所述的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于:所述数据处理单元(6)包括板卡和PC,通过板卡将电压和电流信号采集并存储在PC内,通过PC将采集到的电流和电压信号处理,获得电子密度和电子温度数据。

8. 根据权利要求1-7任一所述的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,其特征在于:采用集成电路搭建电子学电路组成的电子学系统,实现多路并联且不存在互相干扰,该电子学系统置于MW级高频感应风洞(1)的外部。

## 一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于飞行器地面气动热防护试验研究技术领域,具体涉及一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统。

### 背景技术

[0002] 大功率高频感应等离子体加热风洞采用高频感应-电磁耦合的方式加热气体,不存在传统电弧风洞加热方式产生的电极烧蚀污染来流的问题,能够提供化学纯净的高温等离子体流场,不仅可用于高超声速飞行器热防护系统气动热防护试验,还可用于高温真实气体效应、材料壁面催化复合特性等基础问题研究。由于其高频感应-电磁耦合的加热方式以及低气压流场环境,导致其流场具有强烈的热力学非平衡特征(例如其转动温度、振动温度、电子温度具有显著区别且各自由度温度弛豫过程差别极大),对其气动热环境模拟能力评估已经不能采用以往的基于热化学平衡假设总焓、总温、总压等宏观表征方法,因此实验研究是评估风洞能力的有效手段。所以能否实现对等离子体电子密度和电子温度的准确测量,关系到对高频感应风洞气动模拟能力评估的准确与否,是判断风洞性能的关键数据。

[0003] 静电探针因其结构简单,诊断数据多样而被广泛的应用于等离子体电子密度和电子温度诊断研究领域,探针诊断的关键一步是获得高信噪比的伏-安特性曲线,但针对MW量级高频感应等离子体加热风洞而言,大功率放电电源频率会与等离子体耦合,产生与电源同频及电源倍频的强烈电磁干扰,若不对这些噪声进行处理,伏-安特性曲线信噪比极差,无法得到电子温度和电子密度数据。正是由于高频感应风洞流场复杂的电磁特性,目前基于静电探针技术对MW级大功率高频感应风洞的电子密度和电子温度诊断的研究未见有公开报道。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术中存在的问题,本发明的目的在于提供一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,具体涉及一种MW量级高频感应等离子体风洞流场电子密度及电子温度探针诊断系统,使用包含探针极、补偿极和参考极的三电极探针,结合噪声抑制电路实现高频补偿和工频消除,解决了使用探针技术诊断MW级高频感应风洞等离子体电子温度和电子密度的问题。其中补偿极结合耐高压滤波器实现宽频滤波消除高频噪声,参考极结合减法器消除工频噪声,最终获得高信噪比伏-安特性曲线,实现使用单探针对MW级高频感应风洞电子密度和电子温度的诊断。

[0005] 本发明采取的技术方案为:

[0006] 一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,包含MW级高频感应风洞、信号调制及功放单元、探针单元、噪声抑制单元、电流采集单元和数据处理单元,所述MW级高频感应风洞产生等离子体来流,信号调制及功放单元根据风洞工作状态输出相应频率的扫描电压给探针单元,探针单元中三电极探头的探针极作为收集带电粒子的电压源,探针单元的信号噪声通过噪声抑制单元进行消除,具体是,利用噪声抑制单元的滤波器和减

法器结合参考极和补偿极信号实现对探针极信号噪声的消除,所述电流采集单元采集到去噪后的电流信号经过隔离器H1与地线隔离,同扫描电压信号同时被数据处理单元记录并处理得到电子温度和电子密度。

[0007] 进一步的,所述MW级高频感应风洞设置有MW级高频等离子发生器、喷管、试验段、扩压段、冷却器和真空机组。该风洞利用高频感应耦合加热气体,不存在传统电弧风洞电极烧蚀问题,可提供长时间、化学纯的高焓流场。

[0008] 进一步的,所述信号调制及功放单元产生正弦波形、频率100Hz~10kHz、振幅30V~80V扫描电压信号,为探针收集带电粒子提供电压源,其置于铝质金属屏蔽盒内,用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。

[0009] 进一步的,所述探针单元设置有三电极探头和移动臂,三电极探头安装在移动臂顶端,移动臂沿MW级高频感应风洞的喷管径向水平移动。移动臂与高频扫描结合实现高频感应风洞流场电子温度和电子密度径向分布诊断。

[0010] 更进一步的,所述三电极探头设置有探针极P1、参考极P2和补偿极P3,探针极P1设置为长径比大于20的圆柱形钨丝;参考极P2的尺寸和材料与探针极P1完全相同,参考极P2为噪声抑制单元的减法器提供消除工频噪声干扰的输入电流源;补偿极P3设置为面积大于探针极P1十倍左右的不锈钢板,通过隔直电容C1与探针极P1相连,通过补偿极P3补偿探针极P1周围的等离子体电势振动。

[0011] 进一步的,所述噪声抑制单元包括耐高压无源滤波器和高性能电子学减法器。噪声抑制单元置于铝质金属屏蔽盒内,用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。

[0012] 更进一步的,所述耐高压无源滤波器设置最高承受200V峰值电压,通过耐高压无源滤波器抑制高频噪声;所述高性能电子学减法器结合参考极P2提供的输入电流源主动消除工频噪声干扰。

[0013] 进一步的,所述电流采集单元包括高性能取样电阻R1、运算放大器U1和隔离器H1,运算放大器U1获得取样电阻R1两端的共模电压信号,该共模电压信号经隔离器H1隔离地线噪声和扫描电压串联噪声;电流采集单元置于铝质金属屏蔽盒内,用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。

[0014] 进一步的,所述数据处理单元包括板卡和PC,通过板卡将电压和电流信号采集并存储在PC内,通过PC将采集到的电流和电压信号处理,获得电子密度和电子温度数据。

[0015] 进一步的,采用集成电路搭建电子学电路组成的电子学系统,实现多路并联且不存在互相干扰,该电子学系统置于MW级高频感应风洞的外部。

[0016] 本发明的有益效果为:

[0017] 本发明提出一种使用探针极、补偿极和参考级的三电极探针结合耐高压滤波器和减法器的降噪方法,消除了MW级高频感应风洞流场中强烈的电磁干扰,获得了高质量的电子温度和电子密度数据。同时提出利用本发明可高频扫描的优点,结合移动臂的方法实现对MW级高频感应风洞流场中电子温度和电子密度径向分布的诊断。

[0018] (1) 本发明包含探针极P1、参考极P2和补偿极P3的三电极探头,补偿极P3实现对探针极P1位置空间电势振动的补偿,参考极P2给出探针极P1位置的工频噪声信号,为工频噪声主动抑制提供信号源。

[0019] (2) 本发明包括的高性能减法器结合参考极P2信号源,实现对工频噪声的主动消

除。

[0020] (3) 本发明包括耐压200V,频率抑制范围0.4MHz到50MHz的滤波器,并设计440kHz和13.56MHz频率点抑制最佳,滤波器耐高压特性极大减少了前级处理电路,实现了对MW级高频感应风洞等离子体的诊断,并提高系统可靠性。

[0021] (4) 发明使用集成电路技术搭建电子学电路,可实现多路并联且不存在互相干扰问题,电子学系统置于风洞外部,无需冷却系统。

[0022] (5) 本发明可实现100Hz~10kHz扫描信号输出,扫描电压范围 $\pm 30\sim\pm 80V$ ;高频扫描与移动臂结合,首次实现了对高频感应风洞流场电子温度和电子密度径向分布的诊断。

## 附图说明

[0023] 图1为一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统示意图;

[0024] 图2为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统的探针单元的三电极探头剖面结构示意图;

[0025] 图3为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统的探针单元的三电极探头整体结构示意图;

[0026] 图4为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统的探针单元的移动臂与风洞流场相对位置示意图——侧视图;

[0027] 图5为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统的探针单元的移动臂与风洞流场相对位置示意图——俯视图;

[0028] 图6为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统的探针单元的移动臂剖面图;

[0029] 图7为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统中的伏-安特性曲线;

[0030] 图8为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统实施例的a) 电子密度;

[0031] 图9为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统实施例的b) 电子温度;

[0032] 其中,1、MW级高频感应风洞;2、信号调制及功放单元;3、探针单元;4、噪声抑制单元;5、电流采集单元;6、数据处理单元。

## 具体实施方式

[0033] 为表明本发明的技术优势和目的性描述更加清楚,下面结合附图以及实例进行分析。实例所用具体器件及参数只为阐述本发明的优势,并不对本发明产生限制。

[0034] 本发明为一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统,用于诊断高频感应风洞流场的电子密度、电子温度,本发明克服了高频电源放电系统含有严重的放电电源本征频率及其倍频和三倍频产生的严重干扰,以及工频电源产生的低频干扰,获得高信噪比的探针伏安特性曲线,最终得到电子温度和电子密度数据。

[0035] 在本发明的实例中,如图1-图5所示,一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子

温度诊断系统,包含:MW级高频感应风洞1、信号调制及功放单元2、探针单元3、噪声抑制单元4、电流采集单元5和数据处理单元6。

[0036] 信号调制及功放单元2并联在电阻R2和电阻R3两端,输出电压加载在探针单元3中三电极探头的探针极,隔直电容C1与探针极P1相连,用以补偿探针极位置的空间电势振动,采集电路的运算放大器U1与取样电阻R1并联,用以采集R1两端的电压,采集到的数据信号经过隔离器H1进入数据处理单元。

[0037] 工作时MW级高频感应风洞1提供高焓非平衡等离子体来流,信号调制及功放单元2根据风洞工作状态输出相应频率的扫描电压给探针单元3中三电极探头的探针极P1作为收集带电粒子的电压源,具体的是,输出100Hz~10kHz的扫描电压,该电压加载在探针单元中三电极探头的探针极P1,三电极探头的补偿极P3为探针极提供与等离子体来流同频率的电压信号,用于补偿等离子体空间电势扰动,三电极探头的参考极P2为噪声抑制单元提供用于抑制工频噪声的输入信号;利用噪声抑制单元4的滤波器和减法器结合参考极P2和补偿极P3信号实现探针极信号噪声的消除,电流采集单元5采集到的去噪后的电流信号后经过隔离器H1与地线和扫描电压信号隔离后,与扫描电压信号同时被数据处理单元6记录并处理得到电子温度和电子密度。

[0038] 如图1所示,本发明实例中所述高频感应风洞1功率为1MW。MW级高频感应风洞1包括MW量级高频等离子发生器、喷管、试验段、扩压段、冷却器和真空机组。该风洞利用高频感应耦合加热气体,不存在传统电弧风洞电极烧蚀问题,可提供长时间、化学纯的高焓流场。

[0039] 如图1所示,本发明实例中所述信号调制及功放单元2。由运放OPA445和OPA541大功率运算放大器组成,带宽0~1MHz,可增益40dB,供电电压最高±45V;高线性直流电源为ZF-3002D,扫描频率为500Hz。

[0040] 信号调制及功放单元2用于产生正弦波形、频率100Hz~10kHz、振幅30V~80V扫描电压信号,为探针收集带电粒子提供电压源,该单元置于铝质金属屏蔽盒内,用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。

[0041] 如图2、图3所示,本发明实例中所述探针单元3包括三电极探头和移动臂,三电极探头用于固定探针极P1、参考极P2和补偿极P3,探针极P1和参考极P2分别接噪声抑制单元,补偿极P3接隔直电容C1,其中探针极P1和参考极P2尺寸为 $\phi 0.5 \times 10\text{mm}$ 的圆柱形钨丝,参考极P2为所述噪声抑制单元4的高性能减法器提供用于消除工频干扰的输入电流源;补偿极P3使用 $4 \times 8\text{mm}$ 的不锈钢薄片;通过隔直电容C1与探针极相连以补偿探针极周围的等离子体电势振动,三电极探头安装在移动臂顶端,移动臂为竖直放置在一维平移台上直径60mm高度可调的不锈钢支撑件,移动臂可沿MW级高频感应风洞1的喷管径向水平移动(如图4、图5所示),如图6所示,移动臂包括外套管和内管,外套管的内径和内管的外径相互适配,内管套设在外套管内,内管上设置有限位阀,通过限位阀调节内管相对于外套管的位置。

[0042] 本发明实例中所述噪声抑制单元4包括:耐高压巴特沃斯无源滤波器,滤波器可承受最高承受200V峰值电压,具有0.4MHz截止频率,通带纹波小于1dB,1MHz以后衰减65dB以上,阻带截止频率大于120MHz,用于抑制高频噪声;高性能电子学减法器结合参考极P2提供的电流源消除工频噪声干扰,该单元置于铝质金属屏蔽盒内,用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。

[0043] 本发明实例中所述电流采集单元5包括:高性能取样电阻 $R1 = 1\text{k}\Omega$  (0.1%误差),

运算放大器U1采集电阻两端共模信号,运算放大器U1使用AD810AN,带宽1MHz,电流20mA。采集到的共模信号经隔离器H1隔离地线噪声和扫描电压串联噪声后进入数据处理单元6,光电隔离器H1使用HCNR201,线性度0.01%,带宽1MHz,电流20mA。电流采集单元5置于铝质金属屏蔽盒内,用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。如6所示,为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统中的伏-安特性曲线。

[0044] 本发明实例中所述数据处理单元6包括:研华工控机(PC)和NI板卡。

[0045] NI板卡将电压和电流信号采集并存储在研华工控机(PC)内,研华工控机(PC)将采集到的电流和电压信号处理后,获得电子密度和电子温度数据。如图8、图9所示,为根据本发明实施例中的一种高频感应等离子体风洞电子密度及电子温度诊断系统实施例的a)电子密度;b)电子温度。

[0046] 本发明设计包含探针极P1、参考极P2和补偿极P3的三电极探头,研发耐高压宽频补偿滤波器,并设计440kHz和13.56MHz阻抗最大,耐压200V,参考极P2提供的电流源结合电子学减法器消除工频干扰,采集到的探针电流使用隔离器H1隔离扫描电压和地线干扰,电路放置于铝质接地屏蔽盒内屏蔽空间电磁干扰。解决了MW级风洞探针诊断伏安特性曲线信噪比差的问题,最终得到高精度的电子密度和电子温度。

[0047] 以上所述并非是对本发明的限制,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实质范围的前提下,还可以做出若干变化、改型、添加或替换,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

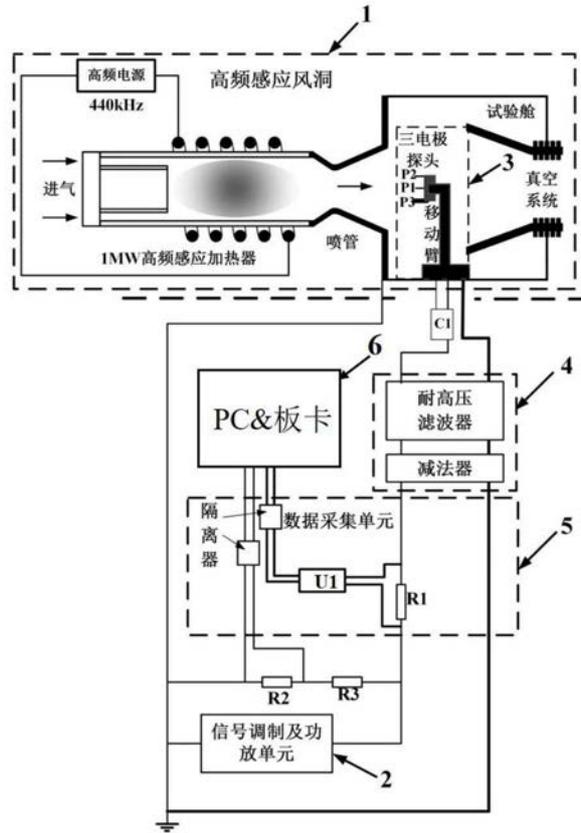


图1

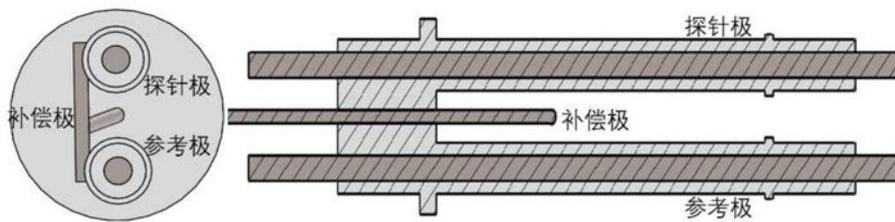


图2

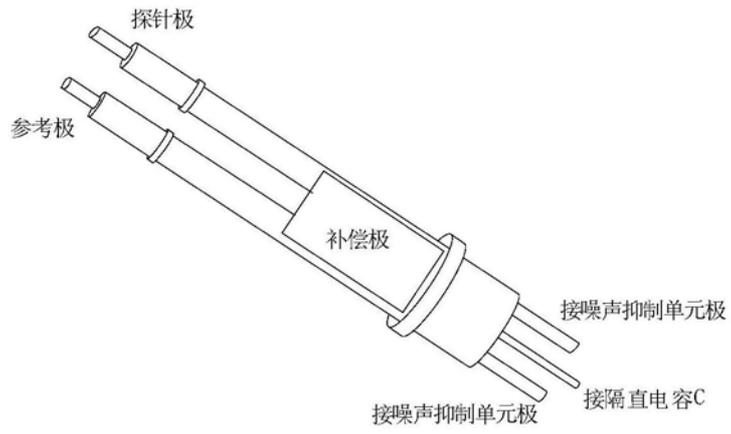


图3

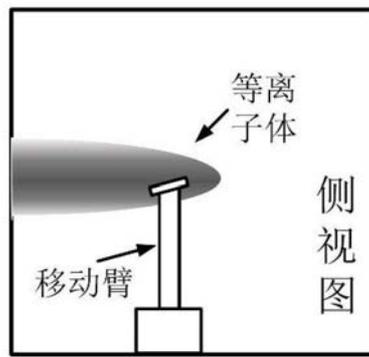


图4

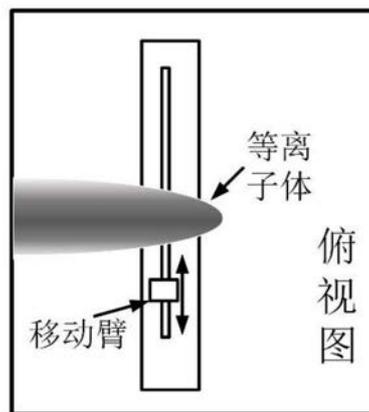


图5

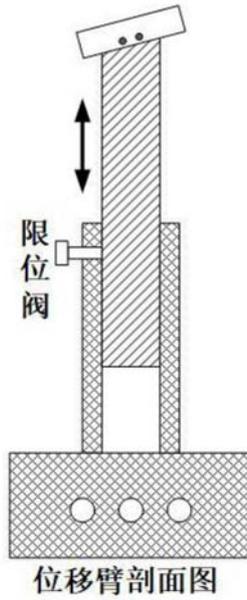


图6

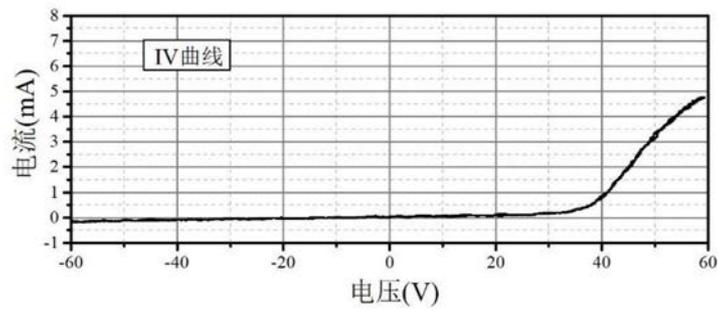


图7

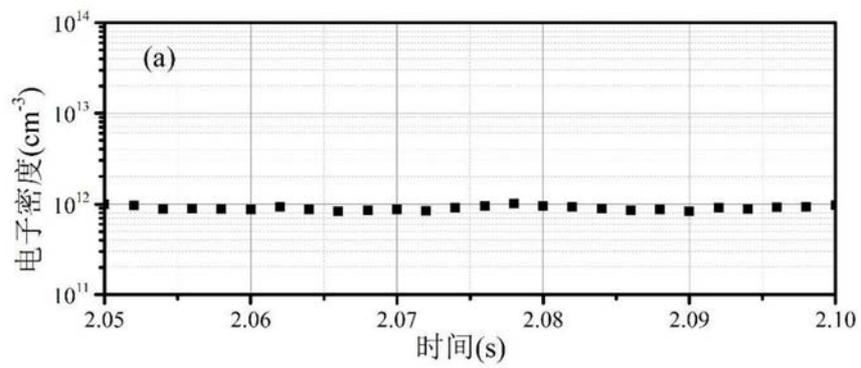


图8

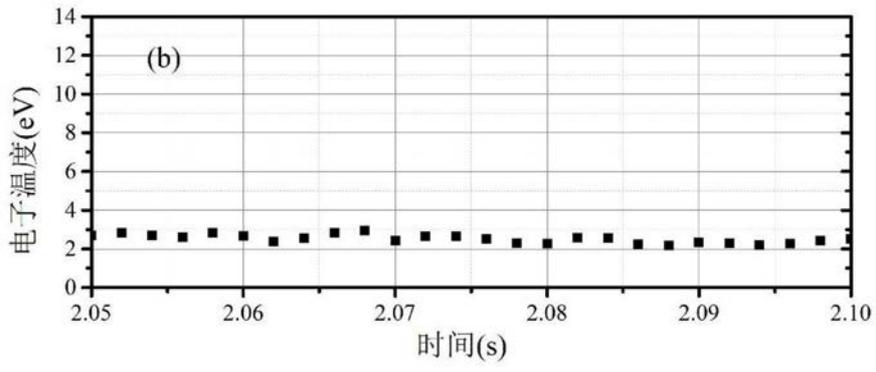


图9