DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.04.008

# 球形收集极结构的二次电子 产额测量装置及测量方法

温凯乐<sup>1,2</sup>,刘术林<sup>1,2</sup>,闫保军<sup>1,2</sup>,王玉漫<sup>1,2</sup>,张斌婷<sup>1,2</sup>,韦雯露<sup>1,2</sup>,彭华兴<sup>1,2</sup> (1.中国科学院高能物理研究所核探测与核电子学国家重点实验室,北京 100049; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了精确测量材料在不同入射电子能量和入射电子角度下的二次电子产额(secondary electron yield,SEY)以及二次电子能谱,研制了收集极为球形结构的 SEY 测量装置。首先介绍了装置的 构成、测量原理及中和方法,并对测得的信号波形进行了分析。随后,测量了 Cu 材料和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜材 料的 SEY 值和二次电子能谱。结果表明:不同入射电子能量下 SEY 值的标准偏差分别小于 0.055 (Cu)和 0.126(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);不同入射电子角度下 SEY 值与理论模型符合的很好,拟合 R<sup>2</sup> 值为0.998 64 (Cu);出射的二次电子能量绝大部分集中在 10 eV(Cu)和 20 eV(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)以下,符合相关理论预期。 关键词:二次电子产额;球形收集极;能谱;表面电荷中和 中图分类号:0462;V43 文献标志码:A 文章编号:1674-7135(2022)04-0064-08

# Measurement system and method for secondary electron yield with spherical collector

WEN Kaile<sup>1,2</sup>, LIU Shulin<sup>1,2</sup>, YAN Baojun<sup>1,2</sup>, WANG Yuman<sup>1,2</sup>, ZHANG Binting<sup>1,2</sup>,

WEI Wenlu<sup>1,2</sup>, PENG Huaxing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics,

Institute of High Energy Physics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to accurately measure the secondary electron yield (SEY) of the material at different incident electron energies and angles, and the energy spectrum of the secondary electrons, a measurement system with a spherical collector is built. First, the structure, measurement principle and neutralization method of the measurement system are introduced, and the obtained signal waveform is analyzed. Subsequently, the SEY and energy spectrum of Cu and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>samples are measured. The measurement results show that the standard deviations of the SEY values measured at different incident energies are less than 0.055 (Cu) and 0.126 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). The measured SEY values at different incident angles are in good agreement with the theoretical model, and the fitted  $R^2$  is 0.998 64 (Cu). Most of the emitted secondary electron energy is concentrated below  $10 \,\text{eV}(\text{Cu})$  and  $20 \,\text{eV}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ , respectively, which is in line with the expectations of theory.

Key words: secondary electron yield; spherical collector; energy spectrum; surface charge neutralization

收稿日期:2022-05-09; 修回日期:2022-07-02

基金项目:国家自然科学基金(编号:11975017,11535014,11675278);核探测与核电子学国家重点实验室项目(编号:SKLPDE-ZZ-202215)

引用格式:温凯乐,刘术林,闫保军,等. 球形收集极结构的二次电子产额测量装置及测量方法[J].空间电子技术,2022,19(4):
 64 - 71. WEN K L,LIU S L, YAN B J, et al. Measurement system and method for secondary electron yield with spherical collector[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(4):64-71.

## 0 引言

具有一定能量的粒子(如离子、光子和缪子等) 轰击材料表面时,从材料表面发射出电子,称为次 级电子发射现象。当入射粒子为电子时,通常,将 这一过程称为二次电子发射现象。

二次电子产额(Secondary electron yield, SEY) 定义为出射的电子数量与入射的电子数量的比值, 不同研究领域对材料的 SEY 值要求不同。空间站 表面的微放电效应、大型粒子加速器真空管道内部 的电子云效应以及大功率微波真空部件的电击穿效 应等,这些领域要求材料的 SEY 值越小越好<sup>[1-4]</sup>;在 基于二次电子发射原理的电子倍增器研究领域,通常 希望材料拥有足够大的 SEY 值<sup>[5-7]</sup>;随着大型中微 子实验对探测器件的要求越来越高,深入研究具有较 高 SEY 值的材料成为热点课题。

为了准确测试评价材料的 SEY 值,国内外很多 单位研制了基于不同结构和测试原理的 SEY 测试 设备。美国犹他大学搭建了可装载 11 个样品具有 半球形结构的测试设备<sup>[8]</sup>,普林斯顿大学等离子物 理实验室研制了样品台和法拉第杯旋转结构的测 试设备<sup>[9]</sup>;中国科学技术大学<sup>[10]</sup>、西安交通大 学<sup>[11]</sup>、中国空间技术研究院西安分院<sup>[12-13]</sup>、中国科 学院大学<sup>[3,5]</sup>、电子科技大学<sup>[14]</sup>等单位均搭建了具 有各自特色的 SEY 测试设备。

本文在借鉴现有 SEY 测试设备优点的基础上, 研制了收集极为球形结构的测量装置。选取球形 结构作为收集极的原因如下:1)球形结构有利于二 次电子的充分收集,并提高测量精度;2)当一次电 子入射角度较大时,球形结构仍可以实现二次电子 的有效收集;3)在球心位置测试样品的二次电子能 谱时,可以改善测试精度。

通常,绝缘材料具有较高的 SEY 值,在测试绝 缘材料过程中材料表面会带有正电荷,导致 SEY 值 迅速减小,最终入射到材料表面的电子数量和从材 料表面出射的电子数量相等,SEY 值为1。为了减 小表面电荷的影响,准确测试 SEY 值,在测量过程 中需要对材料表面进行中和处理。本文采用一把 电子枪,既作为测试用电子枪也作为中和用电子 枪,提出一种新的中和方法<sup>[15]</sup>,可以有效消除绝缘 材料表面积累的正电荷,同时,中和剂量易于控制。

## 1 测量装置的结构

图 1 为本文研制的 SEY 测量装置,包括真空机组,脉冲电子枪,真空腔体,样品台移动旋转控制系统,电子学信号处理系统5部分<sup>[16]</sup>。





## Fig. 1 The developed SEY testsystem

## 1.1 真空机组

在测量 SEY 值时,要求样品所处环境的真空度 优于 5×10<sup>-5</sup> Pa,为了满足测试过程对真空环境的 需求,真空机组采用机械油泵作为前级泵,分子泵 作为主泵,样品所处环境的真空度可以达到10<sup>-6</sup> Pa 量级,极限真空度可以达到 10<sup>-7</sup> Pa 量级。为了解 决机械泵的返油问题,在机械泵和分子泵管道之间 增加了高效分子筛装置。

### 1.2 脉冲电子枪

测量装置采用美国 Kimball Physics 公司生产的 脉冲电子枪,型号为 3101D,出射能量范围从 100 eV ~10 keV,脉冲宽度在 2~200 μs 之间连续可调,控 制频率为 5 kHz。该电子枪具有聚焦和偏转功能,聚 焦功能可以控制电子束斑直径在 2 mm 以内,偏转 功能可以在一定范围内调节束斑位置。

## 1.3 真空腔体

真空腔体包括测试腔体和样品处理腔体。

测试腔体内部含有球壳形状的4层结构,从外 到内分别为信号屏蔽层、信号收集极、外层栅网和 内层栅网,这4层结构球心位置相同。信号屏蔽层 与信号收集极由高电导率的无氧铜材料制作而成, 为了直接观察到测试腔体内部,这两层球壳上半球 中心轴线偏离45°位置处设置观察窗,观察窗表面 中心垂线的延长线经过球心位置,为了不影响球形 内部电场,观察窗上覆盖ITO 导电玻璃。外层栅网 和内层栅网材料为高透过率的铜网,内层栅网接 地,外层栅网施加不同的电压,可以测量二次电子 的出射能量(详见 2.2 节)。脉冲电子枪产生的电 子束和样品台分别通过4层球形结构上方和下方的 窗口进入球形结构内部。

样品处理腔体有一个快开门观察窗,可以手动 放入样品;利用磁流体控制机械爪可以移动样品到 烘烤灯附近,进行烘烤除气处理,烘烤温度为180°C (最高不超过250°C),时间为60min。

## 1.4 样品台移动旋转控制机构

通过高精度中空直线导入器可以控制样品台 上下移动,移动距离为350mm,精度优于1mm;通过 电机驱动直线导入器可以控制样品台旋转,旋转角 度为0°~85°,通过电机模块控制样品台的移动和 旋转,模块通过 R232 串行数据接口连接上位机,可 以通过软件进行自动控制。

## 1.5 电子学信号处理系统

根据跨阻放大器设计原理以及二次电子信号 特点,选取低输入偏置电流、高压摆率、低输入噪声 运放芯片,研制出一款高性能电流电压放大器,其 电流电压增益可达 500 kV/A,测量二次电子脉冲信 号最小宽度为4μs,最小电流范围为10~50 nA。

## **2** SEY 测试原理

通过信号发生器输出一定频率和占空比的脉冲波信号控制脉冲电子枪产生电子束流作为入射 电子,入射电子轰击球心位置上的样品,样品表面 发射出二次电子被内层栅网、外层栅网和球形收集 极收集,获得样品的二次电子脉冲信号,该信号被 跨阻放大器转化为电压信号后被示波器采集,上位 机通过 R232 接口读取示波器波形数据。通常,内 层栅网和样品台接地,在内部产生屏蔽区域,降低 外部电场的干扰;收集极接+50V的电压,保证低 能二次电子被充分收集。

## 2.1 SEY 值计算公式

样品表面产生的二次电子穿过内层栅网和外层栅网后到达收集极,分别测量内层栅网、外层栅 网和收集极上的二次电流信号,这3部分电流之和 为总的二次电子电流,即 $I_{se} = I_{innergrid} + I_{outergrid}$ 

根据电荷守恒原理,脉冲电子枪产生的入射电 流全部被内层栅网、外层栅网、收集极和样品台收 集。因此,脉冲电子枪产生的一次电子电流  $I_{pe} = I_{innergrid} + I_{outergrid} + I_{collector} + I_{sample stage}$ ,可知 SEY 值计算 公式为:

$$\delta = \frac{I_{\text{collector}} + I_{\text{innergrid}} + I_{\text{outergrid}}}{I_{\text{collector}} + I_{\text{innergrid}} + I_{\text{outergrid}} + I_{\text{sample stage}}}$$
(1)

### 2.2 二次电子出射能谱测试分析

内层栅网接地、改变外层栅网上的电压,可以 对待测样品产生的具有不同能量的二次电子进行 筛选。为了提高二次电子能谱测试精度,需要将待 测样品放置在两层栅网之间电场线延长线的交点 位置处,即球形收集极的球心位置。一般,内层栅 网接地,收集极上接+50V,外层栅网电压为U(U< 0V),由可程控精密电压源提供,两层栅网之间的电 场方向沿球形直径方向,出射二次电子能量的径向 分量大于 eU 时才能穿过外层栅网到达收集极,公式 如下:

$$\begin{cases} \delta(E_r) = \frac{I_{\text{collector}}(U)}{I_{\text{collector}}(U) + I_{\text{innergrid}}(U) + I_{\text{outergrid}}(U) + I_{\text{sample stage}}(U) \\ E_r = E(\cos\theta)^2 = eU \end{cases}$$

(2)

E 为二次电子能量, $E_r$  为二次电子能量的径向 分量, $\theta$  为二次电子的运动方向与径向的夹角,  $I_{collector}(U)$ 、 $I_{innergrid}(U)$ 、 $I_{outergrid}(U)$ 、 $I_{sample stage}(U)$ 为外 层栅网上电压为U时,分别在收集极、内层栅网、外 层栅网和样品台上测量的平均电流。 $\delta(E_r)$ 为出射 二次电子能量的径向分量高于 $E_r$ 时的 SEY 值。

由于待测样品位于球心位置,出射的二次电子 运动方向与径向一致,根据式(2)可知,

$$E_{r} = E(\cos 0)^{2} = E$$
  
$$\delta(E) = \frac{I_{\text{collector}}(U)}{I_{\text{collector}}(U) + I_{\text{innergid}}(U) + I_{\text{outergid}}(U) + I_{\text{sample stage}}(U)}$$
(3)

 $\delta(E)$ 为二次电子能量高于 E 时的 SEY 值。

改变外层栅网上的电压,可以计算得到二次电子的积分能谱,将δ(E)值的相邻项求差分,计算出 二次电子出射能谱,即:

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}E} \left( \frac{E_{k+1} - E_k}{2} \right) \approx \frac{\delta(E_{k+1}) - \delta(E_k)}{E_{k+1} - E_k} \tag{4}$$

其中( $E_{k+1} - E_k$ )的值越小,越接近于真实的二次电子出射能谱。

上述分析过程表明,内层栅网、外层栅网和收 集极全部设计成球壳形状,有利于测试二次电子 能谱。

## 2.3 样品表面电荷中和方案

测量绝缘样品的 SEY 值时,由于绝缘样品具有 较高的体电阻率,当其表面发射出电子后,材料体 内的电子来不及补充表面缺失的电子,造成电子发 射区域电位上升呈正电势,将影响 SEY 值的测量。

因此,需要在测试过程中对绝缘样品表面电荷 进行中和,确保入射电子束每次轰击样品表面时, 样品表面电位始终稳定。图2为本文提出的一种表 面电荷中和方案,不锈钢样品台接地,样品台的一 半区域放置待测样品;测试时,脉冲电子枪产生电 子束轰击绝缘样品表面,在轰击位置产生正电荷 区;中和时,通过电子枪的偏转功能,改变电子束方 向,使其轰击在样品附近的样品台空白区域,此处 会产生大量二次电子,这些具有较低能量的二次电 子被样品表面正电荷区电场吸引,与正电荷区发生 电荷中和,使得样品表面电位恢复至原始状态。





#### Fig. 2 Surface charge neutralization method

传统中和方法往往使用低能电子束直接轰击 样品表面正电荷区域进行中和<sup>[17-18]</sup>,可能存在中和 剂量不足导致样品表面残留正电荷或中和过量导 致样品表面带负电荷的问题。本文提出的中和方 法,控制中和剂量的方式比较简单,中和时,当轰击 样品台空白区域的电子束流足够强时,样品表面正 电荷区域被中和后,不会再吸引样品台产生的低能 二次电子,不存在过量中和的问题。

## 3 二次电子脉冲信号分析

## 3.1 二次电子脉冲波形分析

图 3 为 SEY 值大于 1 时测得的二次电子脉冲

波形。跨阻放大器中运放的反相信号输入端接二次电子信号,当二次电子信号为负电流时,测得脉冲波形为正脉冲,此时为电子流入状态。由图3(a),图3(b),图3(c)可知,内层栅网、外层栅网和收集极上脉冲形状均为正脉冲,表明二次电子流入这3层结构中。鉴于内层栅网和外层栅网均为高透过率的网状结构,收集二次电子数量很小,因此,收集极上的脉冲信号幅度最大;另外,内层栅网具有一定的遮挡效应,其上收集的二次电子数量高于外层栅网,所以,外层栅网上的脉冲信号幅度最小。考虑到SEY值大于1,说明样品台产生的二次电子数量大于接收到的一次电子数量,表明样品台为电子流出状态,样品台上的脉冲信号为负脉冲,如图3(d)所示。



#### 图 3 二次电子脉冲波形

## Fig. 3 Typical secondary electron pulse waveform

测试过程中,观察到内层栅网、外层栅网和收 集极上的二次电子脉冲波形均偏离标准脉冲波形。 这是由于内层栅网、外层栅网和收集极三者之间相 互构成电容造成的,当收集极脉冲信号出现时,会 在内层和外层栅网上感应出较强的信号,造成这两 层栅网上脉冲信号的前沿和后沿存在明显的尖峰; 另外,收集极上脉冲波形的前沿和后沿还和 RC 时 间常数有关。感应信号对二次电子脉冲波形的影 响也同跨阻放大器的性能有关,应选取合适的运放 及外围电路。利用电路仿真可以对图 3 中结果进行 验证,图 4 为采用电路仿真模型,在两个放大器输入 端分别流过幅值为 – 1 000 nA 和 – 100 nA 的脉宽为 10 µs,前后沿都为 500 ns 的电流,放大器之间并联 一个 0.3 nF 的电容。



## 图4 电路仿真模型

## Fig. 4 Circuit simulation model

图 5 为仿真和实验测试脉冲波形的对比结果, 通过电路仿真给出了和真实情况接近的脉冲信号 波形。利用电容表对收集极和栅网构成的电容结 构进行测试,其电容值小于 1 nF,和仿真时采用的电 容值一致。



图 5 实验结果与仿真结果对比



#### 3.2 二次电子电流的计算方法



图 6 收集极上的二次电子脉冲波形



图 6 为收集极上的二次电子脉冲波形,将波形 在整个时间轴上进行积分,计算出电荷量 Q,对波形 前 20 μs 的基线部分求平均后再乘以波形时间长 度,可以计算出基线部分的电荷量  $Q_{\text{base}}$ ,总电荷量  $Q_{\text{collector}} = Q - Q_{\text{base}}$ ,已知脉冲电子枪产生电子束宽度 为 t,可以计算出平均电流  $I_{\text{collector}}$ ,同样的方法可以 求出内层栅网、外层栅网和样品台测得的脉冲电流 值,带入式(1),可以计算出 SEY 值。

## 4 SEY 值测试结果分析和讨论

### 4.1 Cu 材料测试结果

图 7 为 Cu 材料的 SEY 值和入射电子能量的关 系,每条数据线是连续测量 3 次后取平均值,其标准 偏差小于 0.055。结果表明,随着入射电子能量的 增加,SEY 值迅速升高到最大值后再逐渐降低,与 理论一致<sup>[19-22]</sup>。其中上方曲线测试 Cu 材料前未 烘烤除气,测得的 SEY 值较高,下方曲线为烘烤除 气一个小时后测得的 SEY 值,测试结果存在明显差 异,说明样品测试前应进行烘烤除气。





# Fig. 7 The relationship between the SEY value of Cu and the energy of incident electrons

不考虑烘烤除气时,将 Cu 材料重复测试 2 次, 在大气中存放 7 天后,再进行第 3 次测试,3 次测试 结果如图 8 所示,3 次测试数据的标准偏差均小于 0.055,说明测试系统的稳定性和可重复性良好。



图 8 Cu 样品 SEY 值 3 次测试结果比较



调节入射电子能量为 300 eV,改变入射电子角 度后测试 Cu 材料的 SEY 值,见图 9,由理论公式  $\delta$ ( $\theta$ ) =  $\delta(0) \cdot e^{c(1-\cos\theta)}$ 进行拟合<sup>[23]</sup>,计算表明理论 值与实验值拟合度很高, $R^2$  = 0.998 64。







固定入射电子能量为 500 eV, Cu 材料的二次电 子能谱如图 10(a)所示,出射二次电子的能量集中 在 10 eV 以内。图 10(b)为对应的积分能谱,当入 射电子能量为 500 eV 时,SEY 值接近零,因此,二次 电子最大能量和入射电子能量一致,同理论 相符<sup>[23-24]</sup>。



图 10 Cu 材料的二次电子能谱测量



利用原子层沉积技术在硅片上分别制备厚度

为4nm、10nm 和12.5nm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜材料。不考虑电荷中和时,测量 10nm 厚度的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜材料 的 SEY 值和入射电子能量的关系,如图 11 所示。 结果表明,测试过程中样品表面已经出现电荷积 累,造成 SEY 值随着测试次数的增加而逐渐降低。





# Fig. 11 Measurement results of insulating samples

#### without neutralization

考虑电荷中和时,测试不同厚度 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜材 料的 SEY 值,如图 12 所示,图中测试数据的标准偏 差均小于 0.126。当入射电子能量小于 300 eV,3 个 样品的测得的 SEY 值重合,表明入射电子穿透深度 小于 4 nm。入射电子能量增大后,电子的穿透深度 也变大,在入射电子能量大于 300 eV 时,3 个样品的 SEY 值不一致,此时,4 nm 厚度样品的 SEY 值小于 10 nm 和 12.5 nm 厚度的样品,而 10 nm 和 12.5 nm 厚度的样品的 SEY 值比较接近,可能和此时的入射 电子穿透深度范围在 4 nm 和 10 nm 之间有关。







在入射电子能量为 125 eV 时,测试了厚度为 16 nm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜材料的二次电子出射能谱,图 13(a)为二次电子能谱图,大部分出射电子能量小于 20 eV,图 13(b)为对应的积分能谱,发现入射电子能量超过 130 eV 时,SEY 值迅速减小为零,根据

理论预期,应该在入射电子能量为125 eV 处 SEY 值 下降至零,导致这一微小偏差的原因可能和给外层 栅网施加偏压的电压源的稳定性以及两层栅网的 加工精度有关。







## 5 结论

为了精确测量金属、半导体和厚度较薄的绝缘 材料的 SEY 值和二次电子能谱,本文研制了一台测 量装置。该装置采用球形结构,具有以下 3 个优点: 1)球形结构可以充分收集二次电子,有利于提高测 试结果的精度;2)在较大入射电子角度下测试样品 的 SEY 值时,球形结构可以充分收集二次电子;3) 测量二次电子出射能谱时,样品位于球心位置处, 可以提高测试精度。

本文针对绝缘样品表面容易出现电荷积累的 问题,提出了一种新的电荷中和方案,既达到了完 全中和绝缘样品表面正电荷的目的,又避免了中和 剂量难以控制的问题。

利用该装置测量了 Cu 材料和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜材料 在不同入射电子能量和角度下的 SEY 值和二次电 子能谱。结果表明,在不同入射电子能量下,测试 两种材料 SEY 值的标准偏差分别小于 0.055 和 0. 126。测量 Cu 样品的 SEY 值与理论模型一致, 拟合 结果的 R<sup>2</sup> 为 0.998 64。Cu 材料的二次电子的出射 能量主要集中在 10 eV 以下, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜材料的二次 电子出射能量主要集中在 20 eV 以下, 出射的二次 电子最大能量和入射电子能量一致, 符合相关理论 预期。

本文未考虑地磁场对低能电子的影响、一次入 射电子束功率密度对 SEY 值的影响以及一次入射 电子进入绝缘样品内部深处造成内部带电的复杂 情况等,这些问题有待于进一步深入研究。

#### 致谢

感谢国家自然科学基金项目(项目批准号: 11975017,11535014,11675278)和核探测与核电子 学国家重点实验室项目(项目批准号:SKLPDE-ZZ-202215)的资助。感谢大连齐维科技发展有限公司 在设备加工等方面给予的支持。感谢赵天池教授 和王佩良研究员在设备研制、调试过程中给予的指 导和帮助。感谢崔万照、吴胜利、翁明、曹猛、刘瑜 东等老师在设备研制过程中给予的帮助。

## 参考文献:

- [1] 魏焕,王新波,胡天存,等. 航天器大功率微波部件微放
   电测试研究进展[J]. 空间电子技术,2021,18(1):
   41-46.
- [2] 张娜,崔万照,王瑞,等. Vaughan 模型二次电子能谱对 空间微波部件微放电效应的影响分析[J].空间电子技 术,2021,18(2):23-26.
- [3] 刘盛画.基于加速器真空室材料的二次电子发射特性 研究[D].北京:中国科学院大学,2018:11-71.
- [4] 王小丽,陈翔,崔万照.空间大功率微波器件无源互调 最新研究进展[J].空间电子技术,2020,17(5):1-10.
- [5] 温凯乐.基于原子层沉积的薄膜材料的二次电子发射 特性研究[D].北京:中国科学院大学,2020:29-90.
- [6] WANG Y M, YAN B J, WEN K L, et al. The design of the emission layer for electron multipliers [J]. Nanoscale Research Letters, 2021, 16(1):151.
- [7] YANG Y Z, YAN B J, LIU S L, et al. MCP performance improvement using alumina thin film [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 868:43-47.

- [8] THOMSON C. Measurements of the secondary electron emission properties of insulators [D]. Logan: Utah State University, 2005: 92-270.
- [9] DUNAEVSKY A, RAITSES Y, FISCH N J. Secondary electron emission from dielectric materials of a Hall thruster with segmented electrodes [J]. Physics of Plasmas, 2003, 10(6):2574-2577.
- [10] 徐延辉. 材料二次电子产额的高精度测试装置设计与 研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016:21-53.
- [11] 翁明,曹猛,赵红娟,等.基于负偏压收集极的绝缘体二次电子发射系数测量[J].真空科学与技术学报,2014, 34(11):1262-1266.
- [12] 张娜,曹猛,崔万照,等.高性能多功能超高真空金属二次电子发射特性测试平台[J].真空科学与技术学报, 2014,34(5):554-558.
- [13] 苗光辉,崔万照,杨晶,等. 二次电子发射特性测量装置 的研究与进展[J]. 空间电子技术,2018,15(1):25-32 +41.
- [14] 吴群. 二次电子发射系数测量装置研究[D]. 成都:电子科技大学,2016:17-52.
- [15] 温凯乐,刘术林,闫保军,等.一种测量介质材料二次电子发射系数的方法:CN110146529A[P].2020-10-09.
- [16] WEN K L, LIU S L, YAN B J, et al. Spherical measuring device of secondary electron emission coefficient based on pulsed electron beam [C]//International conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics. Singapore, 2017:113-116.

- [17] WENG M, CAO M, ZHAO H J, et al. Note: A simple charge neutralization method for measuring the secondary electron yield of insulators [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(3);036108.
- [18] BASS A D, CLOUTIER P, SANCHE L. Measurements of charge accumulation induced by monochromatic low-energy electrons at the surface of insulating samples [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(5):2740-2748.
- [19] DIONNE G F. Effects of secondary electron scattering on secondary emission yield curves [J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(12):5361-5364.
- [20] DIONNE G F. Origin of secondary-electron-emission yieldcurve parameters[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46 (8):3347-3351.
- [21] VAUGHAN J R M. A new formula for secondary emission yield[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1989, 36(9):1963-1967.
- [22] LIN Y H, JOY D C. A new examination of secondary electron yield data [J]. Surface and Interface Analysis, 2005, 37(11):895-900.
- [23] FURMAN M, PIVI M. Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission [J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2002, 5(12):124404.
- [24] CHUNG M S, EVERHART T E. Simple calculation of energy distribution of low-energy secondary electrons emitted from metals under electron bombardment [J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(2):707-709.
- 作者简介:温凯乐(1985-),河南汝州人,博士后。参与国家自然科学基金项目和核探测与核电子学国家重点实验室项目等多 项科研项目。在 Radiation Detection Technology and Methods、Nanoscale Research Letters、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 等国际期刊上发表论文 10 余篇。主要研究方向为粒子探测技术,中微子物理。Email:wenkl@ihep.ac.cn
- 通讯作者:刘术林(1963-),河南光山人,硕士,研究员。主持国家自然科学基金重点项目和核探测与核电子学国家重点实验 室项目等项科研项目。在 Applied Surface Science、Nanoscale Research Letters、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 等国际期刊上发表论文 10 余篇。主要研究方向为真空电子器件, 粒子探测与成像。E-mail:liusl@ ihep. ac. cn

闫保军(1985 -),河北广平人,博士,副研究员。主持国家自然科学基金项目和核探测与核电子学国家重点实验室项目等多项科研项目。在 Applied Surface Science、Nanoscale Research Letters、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 等国际期刊上发表论文 10 余篇。主要研究方向为粒子探测技术。E-mail:yanbj@ihep.ac.cn