

# 高性能多功能介质二次电子发射特性研究平台\*

何 璠, 杨 晶, 苗光辉, 张 娜, 崔万照

(中国空间技术研究院(西安分院)空间微波技术重点实验室, 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了一套高性能多功能介质二次电子发射特性研究平台和介质材料二次电子产额脉冲测量方法。该平台配备有三层栅网结构的收集器和 30 eV~30 keV 宽能量范围的电子枪, 可在  $10^{-8}$  Pa 超高真空下测量介质材料的二次电子发射特性, 并具备 XPS 能谱分析、加热和氩离子溅射清洗原位处理分析功能。给出了测得的金和氧化铝材料的二次电子电流脉冲, 通过判断电流脉冲波形随时间以及照射次数的变化, 获得了介质材料带电饱和时间及材料厚度对带电量的影响。

**关键词:** 二次电子; 二次电子产额; 脉冲法; 真空电子与技术

中图分类号: O462.2

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190318

## High-performance multifunctional apparatus for studying secondary electron emission characteristics of dielectric

He Yun, Yang Jing, Miao Guanghui, Zhang Na, Cui Wanzhao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The paper introduces a high-performance multifunctional apparatus for studying secondary electron emission characteristics of dielectric. The apparatus is equipped with a collector containing three grids and a 30 eV–30 keV electron gun, the secondary electron emission characteristics of dielectric can be measured under ultra-high vacuum, and in-situ XPS analysis spectrometer, heating and argon ion sputtering can also be performed. The paper also introduces the measurement of secondary electron yield by pulse method, gives the measured secondary electron current pulse of gold and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , presents the charging saturation time and influence of the thickness of dielectric on the charge amount obtained by judging the change of the current pulse waveform with time and the number of irradiations.

**Key words:** secondary electron; secondary electron yield; pulse method; vacuum electronics and technology

当材料被具有一定能量的电子束轰击时,其表面会有电子发射,发射出的电子称为二次电子<sup>[1]</sup>。材料发射二次电子能力的强弱由二次电子产额表征,其被定义为二次电子数目与入射电子数目的比值。虽然二次电子发射现象是诸如光电倍增管、扫描电子显微镜和微通道板等探测分析设备所依赖的,但是在航天领域却是需要极力抑制和避免的。由于二次电子发射会诱发微放电和使介质带电,严重影响航天器在轨可靠性<sup>[2-4]</sup>,因此在微波部件进行工程设计时必须考虑微放电以及带电等风险因素。随着介质材料逐步被应用于星载微波部件,需要测量并获得介质材料准确的二次电子发射特性,进而为微放电和带电相关的仿真分析提供关键参数,确保部件在轨工作时的安全性与可靠性<sup>[5-10]</sup>。针对这一需求,中国空间技术研究院西安分院空间微波技术重点实验室搭建了一套介质材料二次电子发射特性研究平台。该平台本底真空可达  $6 \times 10^{-8}$  Pa,可测量入射电子能量范围为 30 eV~30 keV、入射角度  $0^\circ \sim 60^\circ$  范围的介质材料二次电子产额。平台还配备了低能电子中和枪和低能离子中和枪,中和电子和中和离子的能量范围分别为 2~100 eV 和 20 eV~1 keV。本文介绍这套二次电子发射特性研究平台和介质材料二次电子产额脉冲电流测试方法,并以氧化铝材料为主要对象研究了厚度和照射次数对二次电子电流脉冲波形的影响,对可能影响二次电子产额测试结果的因素进行了分析和讨论。

\* 收稿日期:2019-08-27; 修订日期:2019-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目和空间微波技术重点实验室基金项目(U1537211, 6142411191104, 6142411191103, 6142411181105, 61701394)

作者简介:何璠(1987—),男,博士,从事微波无源器件特殊效应研究; hawkinsky@163.com。

通信作者:崔万照(1975—),男,博士,研究员,从事空间大功率微波特殊效应研究; cuiwanzhao@126.com。

## 1 平台结构及功能

平台由真空系统、预处理分析系统和二次电子发射特性测试系统组成, 结构示意图见图 1。平台设计有进样室、存储室、预处理室和分析室等 4 个腔室。预处理室和分析室分别配备离子泵和钛升华泵, 本底真空均优于  $6 \times 10^{-8}$  Pa。

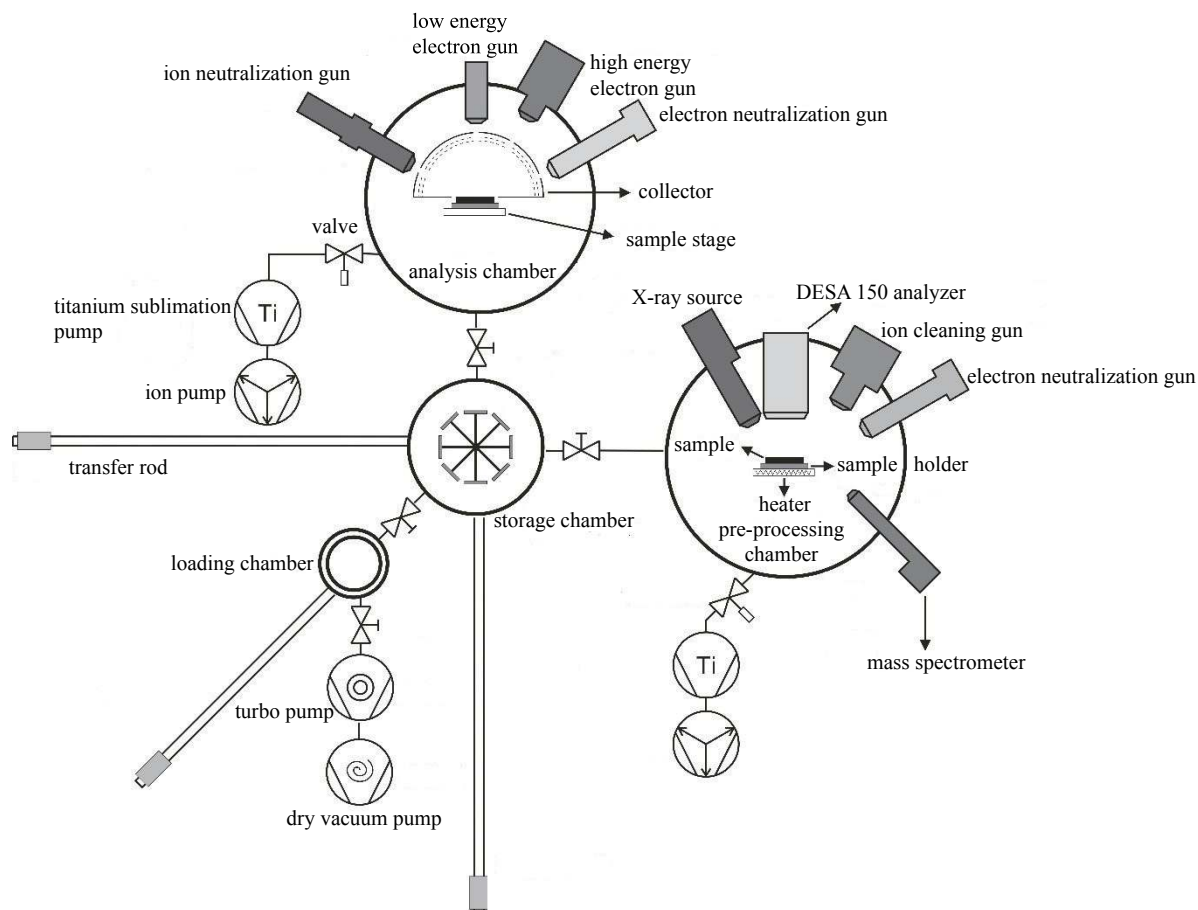


Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus

图 1 介质材料二次电子发射特性研究平台结构示意图

### 1.1 预处理分析系统

预处理室主要对样品进行氩离子溅射清洗、加热、XPS 能谱分析、气体解吸附及气体成份分析, 配备有 XPS 能谱分析装置、氩离子枪、低能电子中和枪和残余气体分析器。XPS 能谱分析装置采用双阳极 X 射线源, 两个金属靶分别是 Al 靶和 Mg 靶, 最大功率可达 300 W。电子能量谱分析由两级筒镜型能量分析器 DESA150 实现, 工作距离可远至 55 mm, 能量分辨率在 100 meV~6 eV 范围连续可调。能量分析器还内置了能量范围为 20 eV~5 keV 的电子枪, 其束流强度为 0.05 nA~50  $\mu$ A, 束斑直径几十  $\mu$ m 到几 mm, 可用于测量导电样品的二次电子产额和能谱。氩离子枪的离子能量在 200~5 000 eV 可调, 离子束流密度 35  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>, 其主要作用是对样品表面进行溅射清洁, 去除材料表面的氧化层和吸附粘污层, 获得洁净的材料表面。低能电子中和枪用于对介质样品进行电荷中和, 其电子能量范围为 2~100 eV。当对介质材料进行 XPS 能谱分析时, 电子被激发出来后会使得样品表面带正电, 需要用低能电子枪进行电中和。残余气体分析器主要用于分析样品加热后解吸附的气体成份, 也可用于真空腔体的检漏。

### 1.2 二次电子发射特性测试系统

分析室配备了高低能电子枪、电子和离子中和枪以及电子收集器, 主要用于测试介质材料的总二次电子产额、背散射二次电子产额以及二次电子能谱。低能电子枪能量范围 30 eV~3 keV, 高能电子枪能量范围 3~30 keV, 高低能电子枪均具备直流和脉冲输出两种模式。电子中和枪的电子能量范围约 100 eV, 离子中和枪的离子能量范围 50~1 000 eV。当介质材料的二次电子产额大于 1 时, 样品表面会带正电荷, 用低能电子枪进行中和, 而当二次电子产额小于 1 时, 样品表面会带负电荷, 此时用低能离子枪进行中和。

平台电子收集器的结构见图2所示,其由3层栅网和收集极组成。材料发射出的二次电子到达收集极时,会产生二代二次电子,二次电子收集的完全程度决定了二次电子产额的测试精度。如果收集极不能够完全将二代二次电子收集,将给二次电子产额测试带来一定的偏差。该平台采用三层栅网加收集极结构收集二次电子和二代二次电子,测试时第一层栅网和样品之间等电位,第二层栅网、第三层栅网和收集极之间等电位,给第二层栅网施加正偏压(相对于第一层栅网),可在不影响低能入射电子的基础上收集二代二次电子,相比于只有单一收集极结构的收集器,该平台的收集器结构可提高二次电子产额的测试精度。此外,在不同栅网和收集极间施加不同的偏压,还可收集背散射二次电子。在第三层栅极上进行电压扫描,可测量二次电子能谱曲线。

对于导电样品,可在直流模式下用收集极法测量二次电子发射特性,由 Keithley 6487E 型皮安表测量入射电流和二次电子电流。而对于不导电的样品,可在脉冲模式下用收集极法测量二次电子发射特性。脉冲模式测量时,由 HAMEG HM8150 型信号发生器输出脉冲信号,触发高能或低能电子枪输出和截止电子束。脉冲电流信号经 DHCPA-100 型电流放大器放大为电压信号后,由 RIGOL DS1054 型示波器接收并显示。图3是脉冲模式下测量二次电子电流脉冲的接线示意图。

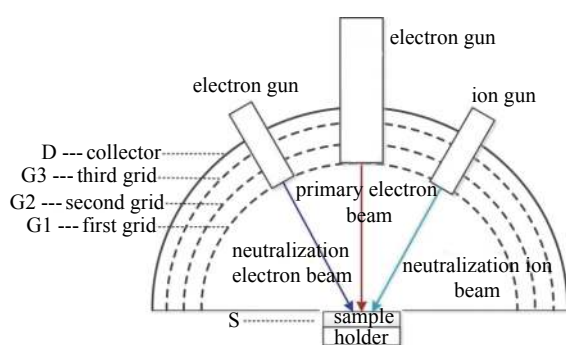


Fig. 2 Schematic diagram of the collector

图2 半球形栅网加收集极结构示意图

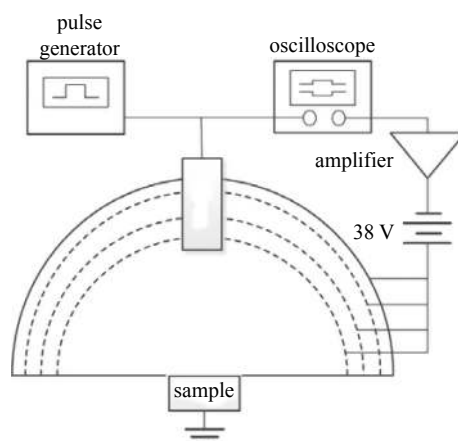


Fig. 3 Schematic diagram of measuring the pulse of secondary electrons

图3 二次电子电流脉冲测试示意图

## 2 介质材料的二次电子产额测试方法

对于导电样品,采用收集极法或偏压电流法,利用皮安表测量电流就可获得二次电子产额。然而介质材料导电性差,在二次电子产额不等于1的情况下会在表面产生电荷积累,影响入射电子的着地能量和二次电子的出射,进而影响二次电子产额的测量。由于介质材料会发生净带电,因此用稳态的电流法(即直流方法)测量的结果是不准确的,通常采用脉冲法测量。用一定脉宽的电子束照射样品,以尽可能地降低带电及其对二次电子产额测试的影响<sup>[10]</sup>。图4为用介质材料二次电子发射特性研究平台测得的金和氧化铝(厚度1 mm)样品的二次电子电流脉冲,入射电子束能量分别为300 eV和1 500 eV,信号发生器产生的信号脉宽为30 μs。从图4可以看出,对于金样品,测得的二次电子电流波形与方波接近。而对于氧化铝样品,二次电子电流首先快速增加到最大值,随后快速减小到平衡值,波形是一个高强度的窄脉冲与方波的叠加,窄脉冲部分的宽度大约为2 μs。在测量二次电子电流时,样品台通过导线与整个接地的金属真空腔体联通,由于金是导电的,即使二次电子产额大于1,金样品也可以从样品台得到电荷(电子)补充,并不会发生净带电,因此发射的二次电子电流并不会随时间变化,呈现出如图4(a)所示的方波特性。而氧化铝是不导电的,在厚度较大的情况下,如果二次电子产额大于1,则无法从样品台获得电荷(电子)补充,自入射电子照射起便带正电,且随着照射时间的增加带电量也增加。样品带电将会影响入射电子的着地能量和二次电子的出射,使得出射的二次电子数目减小,并最终达到平衡值。图4(b)中测量到的二次电子电流曲线也反映了这一变化过程,需要注意的是电子束照射约2 μs后,氧化铝样品的带电以及二次电子发射达到了平衡。正如图4(b)所示,介质材料的二次电子电流脉冲是随时间变化的,采用脉冲法测量可以将带电对二次电子发射的影响过程动态显现出来。根据介质材料二次电子电流脉冲的特点,结合二次电子产额的定义,通常采用 $\sigma = V_{smax}/V_p$ 计算介质材料的二次电子产额<sup>[10]</sup>,其中 $V_{smax}$ 是二次电子电流脉冲的最大值, $V_p$ 是入射电子电流脉冲的幅值。

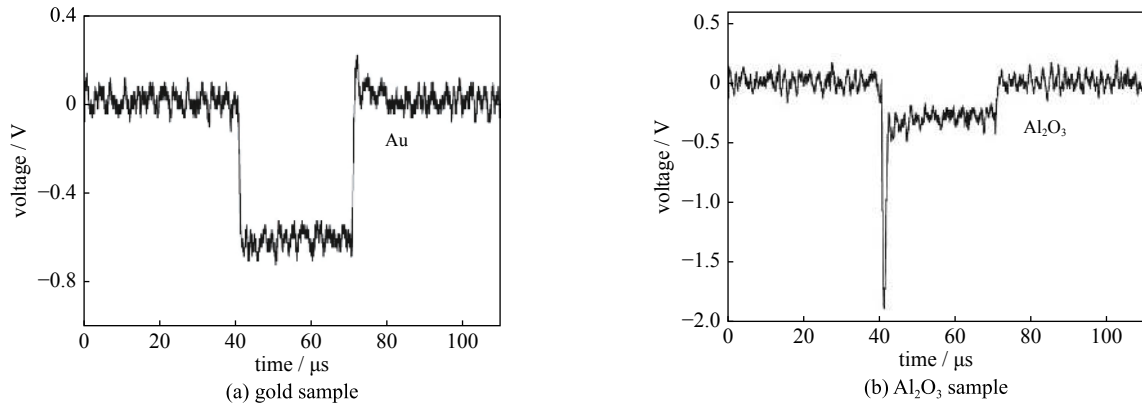


Fig. 4 Measured pulses of secondary electron current

图4 测量到金和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 样品的二次电子电流脉冲

### 3 讨论

介质材料二次电子发射特性的测量结果受噪声、入射电流强度及其脉冲宽度、样品厚度等诸多因素的影响。弱的二次电子电流脉冲需经电流放大器放大后测量,而这会引入强的噪声,进而影响二次电子产额测试结果的精度。选取合适的电流放大增益,获得好的信噪比是降低噪声影响的方法。入射电流的强度及其脉冲宽度不同,介质材料的带电量亦会不同,必然会对二次电子产额有影响。而这只能通过多次测量,获得合适的测量参数,使二次电子产额测量结果稳定。样品的厚度也会对二次电子产额有影响,厚度越厚,越不容易将带的净电荷导走,因此极有可能不同厚度的样品测得的二次电子产额是不同的。

图5为脉冲电子束连续照射氧化铝样品同一位置以及不同脉冲宽度电子束照射氧化铝样品不同位置时测得的二次电子电流,电子束的能量为1500 eV,样品厚度为1 mm。从图5(a)可以看出,第一次照射时测得的二次电子电流脉冲的窄脉冲部分高度最高,而后面4次照射获得的窄脉冲部分高度几乎相同,这表明第一次照射后样品就发生局部带电,带电后再照射同一位置,出射的电子数目由于受到带电的影响而明显减少了。如图5(b)所示,当用脉宽分别为10  $\mu\text{s}$ 和30  $\mu\text{s}$ 的电子束照射不同的位置时,测得的二次电子电流脉冲窄脉冲部分的宽度和高度是相等的,二次电子电流脉冲的平坦部分高度也是一致的(见图中方框部分),这表明即使使用不同脉宽的电子束照射样品,带电的动态过程是一样的,当样品达到带电饱和状态后,出射的二次电子电流不再随时间变化。需要注意的是,如果入射电子束的脉宽小于二次电子电流脉冲窄脉冲部分的脉宽,那么样品带电极有可能未饱和,这时测得的二次电子发射特性可能与带电饱和时的不同。

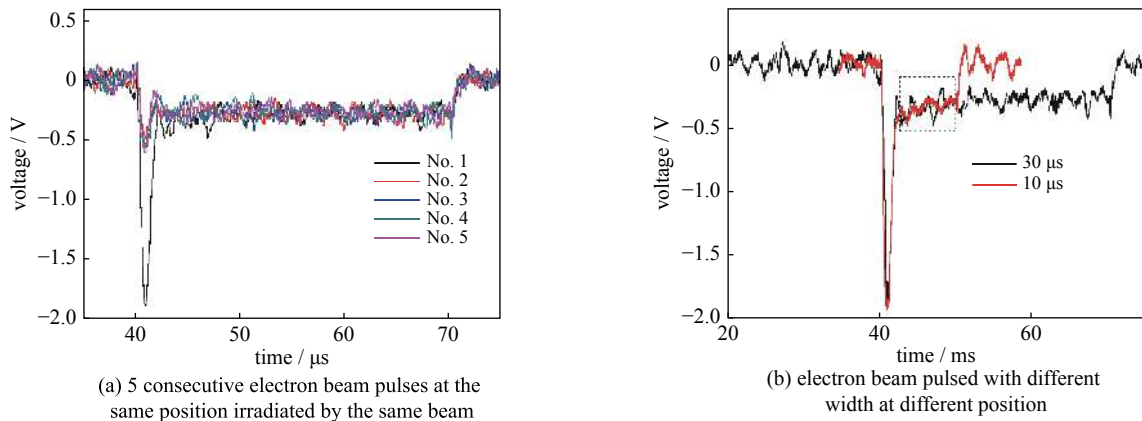
Fig. 5 Measured pulses of secondary electron current of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sample

图5 不同脉冲电子束照射下的氧化铝样品二次电子电流脉冲

除此之外,介质样品的厚度也会影响二次电子发射特性。一方面,如果样品的厚度小于入射电子的作用范围,那么测量到的二次电子除了来自于样品外还有来自于衬底或基底的。另一方面,如果样品较薄,那么当介质带电后电子可以从导电的衬底或基底得到补充,从而导致不同的介质厚度呈现出不同的二次电子发射特性。图6为不同厚度的氧化铝薄膜的二次电子电流脉冲。采用原子层沉积技术在重掺的P型硅片上分别生长了10 nm和

20 nm 厚的氧化铝薄膜。从图中可以看出, 10 nm 和 20 nm 厚氧化铝薄膜样品的二次电子电流波形和入射电子束的波形相似, 都没有窄脉冲部分, 与 1 mm 厚氧化铝样品的二次电子电流波形特征(图 4(b))有很大不同, 这表明氧化铝薄膜没有带电或带电量不足以影响二次电子的出射。

#### 4 结 论

本文对自建的介质材料二次电子发射特性研究平台和二次电子产额测试方法进行了介绍。该平台具有原位溅射清洗、加热、解吸附气体成份分析以及原位电中和功能, 可分别用脉冲和直流方式测量入射电子能量 30 eV~30 k eV、入射角度  $0^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$  的介质材料二次电子发射特性。由 3 层栅网和收集极组成的收集器能有效收集二代二次电子, 提高测试精度。实验结果表明, 材料厚度和带电对介质材料二次电子发射特性具有重要影响, 通过测量二次电子电流的脉冲波形, 可获得带电饱和时间以及带电量, 在后续工作中将系统定量研究这些因素的影响并建立相关物理模型。

#### 参考文献:

- [1] 承欢, 江剑平. 阴极电子学[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986: 164. (Cheng Huan, Jiang Jianping. Cathode electronics[M]. Xi'an: Publishing House of Northwest Telecommunication Engineering Institute, 1986:164)
- [2] Fukunaga K, Okamoto M T. Space charge observation in aramid/epoxy insulations under DC electric field[J]. *IEEE Transaction on Components and Packing Technologies*, 2006, 29(3): 502-507.
- [3] 李盛涛, 李国倡, 闵道敏, 等. 入射电子能量对低密度聚乙烯深层充电特性的影响[J]. *物理学报*, 2013, 62: 059401. (Li Shengtao, Li Guochang, Min Daomin, et al. Influence of radiation electron energy on deep dielectric charging characteristics of low density polyethylene[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 059401)
- [4] Torregrosa G, Coves A, Vicente C, et al. Time evolution of an electron discharge in a parallel-plate dielectric-loaded waveguide[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2006, 27(7): 619-621.
- [5] Li Yun, Wang Dan, Yu Ming, et al. Experimental verification of multipactor discharge dynamics between ferrite dielectric and metal[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(10): 4592-4599.
- [6] Torregrosa-Penalva G, Coves Á, Martínez B, et al. Multipactor susceptibility charts of a parallel-plate dielectric-loaded waveguide[J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2010, 57(5): 1160-1166.
- [7] Coves Á, Torregrosa-Penalva G, Vicente C, et al. Multipactor discharges in parallel-plate dielectric-loaded waveguides including space-charge effects[J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2008, 55(9): 2505-2511.
- [8] Kate I, Mandell M, Jongeward G, et al. The importance of accurate secondary electron yields in modeling spacecraft charging[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(12): 13739-13744.
- [9] 董焱, 董志伟, 杨温渊. 介质单边二次电子倍增的理论分析与数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1917-1924. (Dong Ye, Dong Zhiwei, Yang Wenyuan. Theoretic analysis and numerical simulation of dielectric single-surface multipactor discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1917-1924)
- [10] Song Baipeng, Shen Wenwei, Mu Haibo, et al. Measurements of secondary electron emission from dielectric window materials[J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2013, 41(8): 2117-2122.

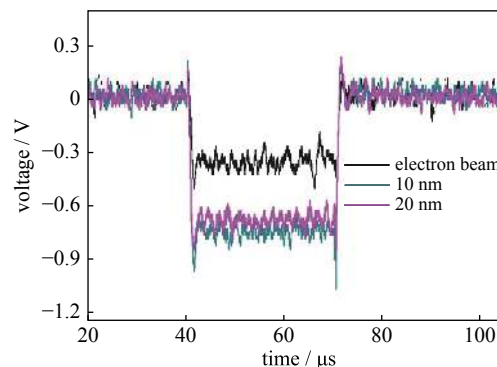


Fig. 6 The measured pulses of secondary electron current of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sample with different thickness

图 6 不同厚度氧化铝样品的二次电子电流脉冲