2014年2月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2014)01-0141-04

纯银材料的二次电子发射能谱研究

杨 晶,崔万照,胡天存,张 娜

(西安空间无线电技术研究所 空间微波技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要:超高真空测试设备配备的能量分析仪可分析材料表面发射的二次电子能谱,区分真正的二次电子和背散射电子,并通过对能谱积分求得真二次电子系数。本文以纯净银箔材料为例,将电流法测试的二次电子系数(SEY)与能谱分析结果进行对比,误差不超过 6%,验证了电流法测试的正确性,并且分析了误差产生的原因。

关键词:二次电子;二次电子发射;背散射电子;能谱

中图分类号: TN107 文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0141

Research of secondary electron energy spectrum on pure silver material

YANG Jing, CUI Wan-zhao, HU Tian-cun, ZHANG Na

(Science and Technology on Space Microwave Laboratory, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Secondary Electron(SE) spectrum can be measured by energy analyzer which is equipped on a newly-installed Ultra High Vaccum(UHV) measurement facility. True-secondary electrons and backscattered electrons can be distinguished from emitted electrons, and true-secondary electron yield can be measured by integral of SE spectrum. In this paper, an experiment was carried out on pure silver material to compare Secondary Electron Yield(SEY) by different methods(electrical current measurements and SE spectrum analysis). The comparison result shows that the error of the two methods is less than 6%, which validates the electrical current method. The cause of error is also been discussed.

Key words: Secondary Electron; secondary electron emission; backscattered electron; energy spectrum

二次电子发射(也称次级电子发射)是当具有一定能量的电子(或离子)轰击物体表面时,电子(或离子)从物体表 面发射出来的现象^[1]。早在1899年,坎贝尔就发现了二次电子发射现象^[2]。二次电子发射最早应用在电子倍增, 可使非常微弱的电流放大几百万倍^[3];在扫描电子显微镜分析表面图像时,发射出来的二次电子也发挥了重要的 作用^[4]。但在某些情况下,二次电子发射是不希望发生的,如在输出多工器、滤波器、粒子加速器等空间大功率 微波部件中,二次电子发射会引起严重的局部谐振放电,导致信道阻塞,微波部件损坏,甚至使航天器有效载荷 彻底失效^[5]。长期以来,我们一直采用国外典型金属材料的二次电子发射系数作为参考,无法准确获得实际加工 微波部件金属表面的二次电子发射系数(SEY)。本文利用二次电子能谱验证了电流法测试的 SEY 结果准确可靠。

1 二次电子发射

具有一定能量的粒子与材料表面作用时,会有电子从材料表面逸出,入射电子称为初始电子(Primary Electrons, PEs),从材料表面逸出的电子称为二次电子(Secondary Electrons, SEs)。二次电子包括背散射电子 (Backscattered Electrons, BEs)和真正的二次电子(True-Secondary Electrons, TSEs),背散射电子又分为弹性散射 电子(Elastically Backscattered Electrons, EBEs)和非弹性散射电子(Rediffused Electrons, REs)^[6]。

二次电子发射过程如图1所示,一束具有一定能量的初始电子轰击材料表面,一部分电子由于库仑相互作用 被原子电势影响而改变运动方向,从表面逸出成为弹性散射电子,由于原子核的质量远大于电子的质量,弹性散 射电子能量基本保持不变;其余电子打入材料表面,其中一部分电子与材料内原子发生非弹性碰撞,将一部分 能量传递给发生碰撞的原子或分子后逸出表面,成为非弹性散射电子;还有一部分初始电子在材料内部遭到非弹 性散射,引起材料内部大量的电子被激发,这些激发出来的电子如果还具有足以克服表面势垒的能量,则可从表面逸出,成 为真正的二次电子。

这些不同"成分"的电子所带的能量是不同的,能量是各 类电子的特征,也是二次电子发射物理过程的确实反映。图 2 给出了初始电子能量为 200 eV 时测得的纯净银箔表面的二次 电子能量分布的典型曲线,图上的 N(E)代表能量为 E 的二次电 子数目。对大多数物质来说,二次电子能量的分布都是类似的。

由图 2 可以看出,二次电子的能量分布大体上可以分为 3 部分:第1部分是 *E*=*E*_p(*E*_p是初始电子能量)附近出现的"快峰", "快峰"的位置与初始电子能量相关,当*E*_p改变时,它的位置





也相应地改变。十分明显,这些电子实际上是初始电子从发射体表面势垒反射回来的弹性散射电子。第2部分是 在 *E*=0~50 eV 的范围内出现的"慢峰",峰值位置在 *E*=0~10 eV 附近,"慢峰"由初始电子激发产生的真正二次 电子构成,通常占发射电子总数的绝大部分。第3部分介于"快峰"和"慢峰"之间的区域,这里 *N*(*E*)的值较 小,没有明显的峰。说明这部分电子所占比例很小,它是由射入材料表面的电子经过非弹性碰撞后,又从发射体 中再发射出来的电子。

对二次电子的能谱进行分段积分,可以求得真二次电子系数 δ_{ts} 和背散射电子系数 δ_{b} 。以 $E_p=200 \text{ eV}$ 时纯银的二次电子能谱(图 2)为例,计算的 δ_{ts} 、 δ_b (图 3)如式(1)所示。





2 二次电子发射系数测量

为了准确测量实际加工的金属表面的二次电子发射系数,我们搭建了测量 SEY 的超高真空测量系统,系统的结构如图 4 所示^[7],配备了机械泵、分子泵、离子泵、及钛升华泵的多级组合泵,保证测量系统的超高真空气 压在 10⁻⁸ Torr~10⁻¹⁰ Torr 之间;电子枪能发射出能量为 10 eV~5 keV 的电子束;能量分析器最大可达 10 keV,最高分辨率 Δ*E/E* 为 0.05%。利用该测量系统可精确地分析出二次电子的能量分布;另外,在此超高真空系统的基础上外接电流表,可通过电流法直接测试 SEY,测试方法更加简单。由于二次电流十分微弱,在电流法测试 SEY 时,选用的电流表测量精确度为 10 fA,测量范围为 20 fA~20 mA。

电流法测试二次电子发射系数的原理如图 5 所示,如果样品加正偏压 U₊时,发射电子能量小于 U₊的电子将 被束缚到表面。首先在样品上加+500 V 的偏压,入射电子打在样品上激发出的二次电子,只有能量高于 500 eV 的二次电子才能逃离表面,这时通过皮安表测量的电流近似为入射电流 I_p。



Fig.4 Configuration diagram of SEY measuring platform 图 4 二次电子发射系数测量平台的结构示意图

根据上述能谱的分析,真正的二次电子基本在 50 eV 以内。将 U_+ 恰当的选择在真正二次电子与散射电子的 分界处,即 $U_+=50$ V,由皮安表测量样品表面的电流值 I_+ 是入射电 流 I_p 与散射电子电流 I_b 的差值,即 $I_+=I_p-I_b$ 。

当样品加负偏压 U-时,所有的电子均被发射出去,此时由皮安 表测量样品表面的电流值 I-是入射电流 I_p与真正二次电子电流 I_{ts}和 散射电子电流 I_b的差值,即 I₋=I_p-I_{ts}-I_b。

则总的二次电子发射系数为:

$$\delta_{\text{tot}} = \frac{I_{\text{p}} - I_{-}}{I_{\text{p}}} = 1 - \frac{I_{-}}{I_{\text{p}}}$$
(2)

真正的二次电子发射系数:

$$\delta_{\rm ts} = \frac{I_+ - I_-}{I_{\rm p}} \tag{3}$$

真正的二次电子与背散射电子的比例可由式(3)得到:

$$I_{\rm ts}: I_{\rm b} = (I_{+} - I_{-}): (I_{\rm p} - I_{+})$$



图 5 电流法测量 SEY 原理图



本文以纯净的银箔为例,分别使用超高真空测量系统的能量分析器和电流法测试并分析了真正的二次电子与 背散射电子之比随初始电子入射能量的变化,如图6所示。可以看出,2种方法的测试结果趋势一致,随初始电 子入射能量的增大,真二次电子的比例减小,真二次电子占所有二次电子的绝大多数。

采用 2 种方法测试的真二次电子系数 δ_{ts} 和背散射电子系数 δ_{b} 随初始电子入射能量的变化如图 7 所示。电流 法测试的真二次电子系数 δ_{ts} ,比二次电子能谱分析所得的结果略大,这是因为电流法在测总电流时,皮安表加 +500 V 偏压只能收集低于 500 eV 的电子,高于 500 eV 的电子会从材料表面逃逸。因此,入射能量越高,逃逸 的背散射电子就越多,2种方法测得的真二次电子系数相差越大。但是,2种方法的测量误差最大为 5.39%。

4 结论

本文采用能量分析仪分析了纯银材料表面的二次电子能谱,分析了真二次电子与背散射电子随入射能量的变化,分析结果表明,真二次电子占发射电子总数的绝大多数,背散射电子占的比例很小。

此外,使用最新搭建的超高真空测试设备,用电流法分析了真二次电子系数,背散射电子系数和总二次电子 发射系数,与二次电子能谱分析结果比较,最大误差为 5.39%,误差产生的原因为:在入射能量较高(*E*_p>500 eV)时,电流法不能完全收集背散射电子,一部分高能的散射电子会逃离表面。

总之,利用电流法测试二次电子发射系数,测量方法简单,测试结果准确可靠。为仿真过程中设置材料粒子 发射特性提供了依据。

参考文献:

- Sazontov A, Buyanova1 M, Semenov V, et al. Effect of emission velocity spread of secondary electrons in two-sided multipactor[J]. Physics of Plasmas, 2005,12(5):1-8.
- [2] 承欢,江剑平. 阴极电子学[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1986:164-168. (CHENG Huan, JIANG Jianping. Cathode Electronic[M]. Xi'an:Northwest Telecommunication Engineering Institute Press, 1986:164-168.)
- [3] 薛增泉,吴全德. 电子发射与电子能谱[M]. 北京:北京大学出版社, 1993:238-240. (XUE Zengquan,WU Quande. Electron Emission and Electron Spectroscopy[M]. Beijing:Peking University Press, 1993:238-240.)
- [4] Reimer L. Image Formation in Low Voltage Scanning Electron Microscopy[M]. Bellingham:SPIE Press, 1993.
- [5] 张娜,崔万照,胡天存,等. 微放电效应研究进展[J]. 空间电子技术, 2011,8(1):38-43. (ZHANG Na,CUI Wanzhao,HU Tiancun,et al. Advances in Research on Multipactor[J]. Space Electronic Technology, 2011,8(1):38-43.)
- [6] Furman M A,Pivi M T F. Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2002,5(12):1-19.
- [7] 崔万照,杨晶,张娜. 空间金属材料的二次电子发射系数测量研究[J]. 空间电子技术, 2013,10(2):75-78. (CUI Wanzhao, YANG Jing,ZHANG Na. Testing Method of the Secondary Electron Emission Yield of Space Metal Materials[J]. Space Electronic Technology, 2013,10(2):75-78.)

作者简介:



杨 晶(1987-), 女, 西安市人, 在读硕士 研究生, 主要研究方向为空间微波技术.email: yangjing_215@126.com. **崔万照**(1975-),男,山东省高密市人,博士, 高级工程师,主要研究方向为空间微波技术、新 型电磁超介质、智能新型处理等.

胡天存(1983-),男,兰州市人,硕士,工程师,主要研究方向为空间微波技术、电磁超介质.

张 娜(1984-), 女,陕西省汉中市人,硕士, 工程师,研究方向为微放电与无源互调技术.