

文章编号: 1001-4322(2007)01-0134-05

绝缘体二次电子发射系数测量装置的研制*

谢爱根¹, 郭胜利¹, 李传起¹, 裴元吉²

(1. 南京信息工程大学 物理系, 南京 210044; 2. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘 要: 成功研制了测量绝缘体二次电子发射系数的测量装置, 该装置主要由栅控电子枪系统、真空系统和电子采集系统组成, 测量装置产生的原电子流的能量范围为 0.8~60 keV。采用单脉冲电子枪法, 测量了原电子能量范围为 0.8~45 keV 的多晶 MgO 的二次电子发射系数。测量中, 收集极(偏置盒)离材料表面设置为约 35 mm, 偏置电压设置为 45 V。测量得到: 用磁控溅射法制备的 MgO 的二次电子发射系数最大值约为 2.83, 处于 2~26 范围内, 其对应的原电子能量约为 980 eV。这表明该装置测量的绝缘体二次电子发射系数是可信的, 但用磁控溅射法制备的 MgO 的二次电子发射系数较低, 这可能是制备 MgO 时引入了过多的杂质在 MgO 二次电子发射体里面所引起的。

关键词: 测量装置; 绝缘体; 二次电子发射系数; 氧化镁

中图分类号: O462.2 **文献标识码:** A

在二次电子发射过程中, 二次电子的数目与原电子数目的比值称为二次电子发射系数, 常用 δ 来表示。 δ 与原电子能量 E_p 的关系是二次电子发射最基本的特性, 因此, 人们研究材料的二次电子发射现象时, 通常要测量材料的 δ 值和研制测量该系数的装置。绝缘体的二次电子发射性质基本上与金属的二次电子发射没有太大区别, 然而研究绝缘体的二次电子发射的方法是比较复杂的, 因为绝缘体的导电性差^[1], 当受到原电子轰击时, 表面将积累电荷, 若 $\delta > 1$ 则积累正电荷, 若 $\delta < 1$ 则积累负电荷。电荷的积累引起表面电势的变化, 这种变化又导致轰击表面的原电子能量的变化, 它造成 δ 的变化, 从而引起表面电势进一步的变化。因此研制绝缘体 δ 值的测量装置比研制金属 δ 值的测量装置^[2]要难得多。

1 测量装置的研制

1.1 装置结构

根据实验的条件和要求, 我们对文献[2]报道的金属的二次电子发射系数的测量装置进行了如下改装:

(1) 真空室接地。

(2) 设计并制造了一个高为 60 mm、直径为 118 mm 的圆筒, 该圆筒罩着靶头, 且圆筒的横截面平行于靶头平面。我们在圆筒的一个横截面(朝电子枪的面)上开了一个高为 33 mm(即垂直方向为 33 mm)、宽为 20 mm 的方孔以便电子枪发射出来的电子束能轰击在靶头上, 该圆筒作为偏置盒(既可正偏置 45 V 也可负偏置 45 V), 偏置盒与真空室壁和靶头都是绝缘的(真空室壁与靶头也是绝缘的)。

(3) 用一根无氧铜导线把偏置盒和小电极相连并把偏置电池也与小电极相连。

这样我们就研制出了绝缘体二次电子发射系数的测量装置, 该装置的测量原理是单脉冲电子枪法。与金属的二次电子发射系数测量装置不同, 绝缘体二次电子发射系数的测量装置的收集极既能正偏置又能负偏置, 该测量装置能测量出原电子能量 E_p 高达 45 keV 时的绝缘体的 δ 值。该测量装置大致分为三个部分: 栅控电子枪系统、真空系统和电子采集系统, 其结构如图 1 所示。

图 1 中的电子枪是脉冲电子枪, 在脉冲间隔期间, 由于电子枪的栅极与阴极之间加有一个负的电势(称该电势为“栅偏压”, 实验时, 通常把栅偏压调节在 $-50 \sim -80$ V, 使原电子束截止, 不能打到靶面。信号发生器能产生脉宽 0.5 μ s、重复频率为 0.1 Hz(或更低)的 +10 V 的矩形脉冲, 功率放大器把该 +10 V 的矩形脉冲通过光电转换变成触发信号, 该光信号触发电子枪并控制处在高压电位上的脉冲信号发生器, 产生脉宽约 2 μ s、重复频率为 0.1 Hz 或更低的电压幅度为 160 V 的栅控电压, 使电子枪发射矩形脉冲电子束(脉宽约 2 μ s、

* 收稿日期: 2006-07-18; 修订日期: 2006-11-10

基金项目: 南京信息工程大学科研基金资助课题(QD65)

作者简介: 谢爱根(1971—), 男, 安徽芜湖人, 博士, 讲师, 研究方向为二次电子发射材料; xagth@126.com。

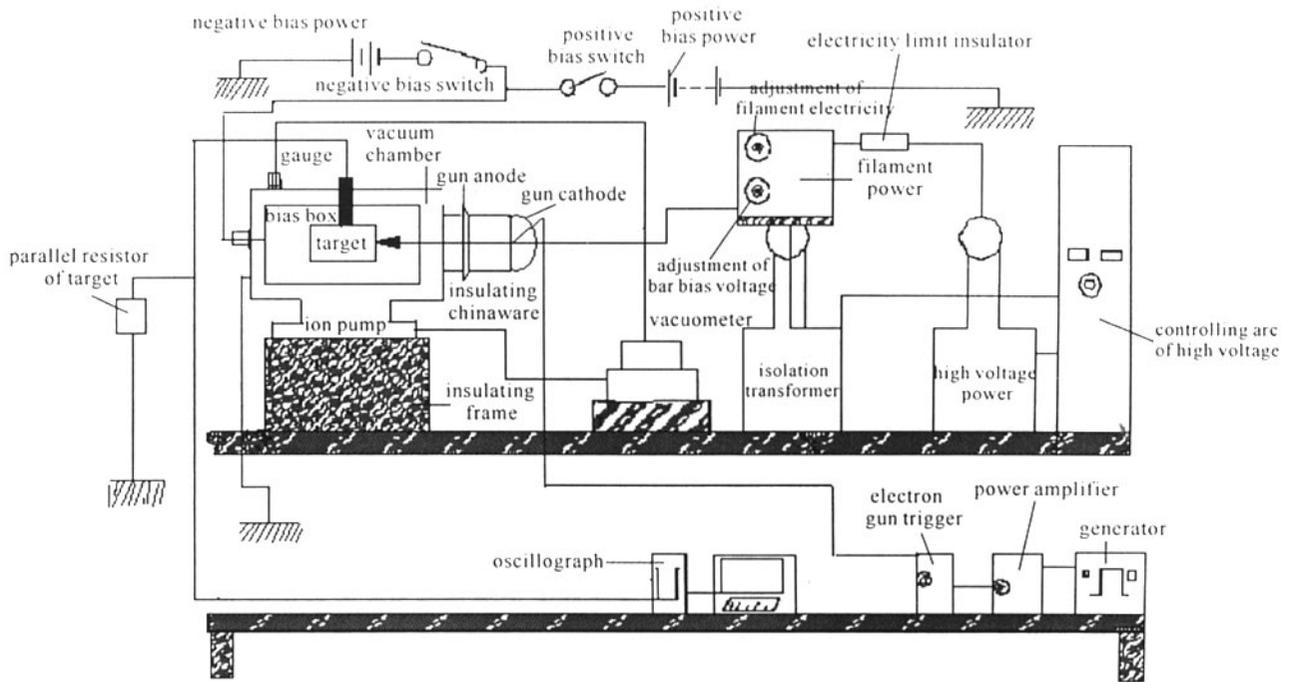


Fig. 1 Diagram of yield measuring device of secondary electron emission from insulator

图 1 绝缘体二次电子发射系数的测量装置示意图

重复频率为 0.1 Hz 或更低)打在靶上,产生二次电子发射。原电子的能量可由高压电源控制柜来调节。为了使电子枪能正常工作和基本不影响绝缘体材料的二次电子发射系数大小,整个测量过程中真空度需要达到 10^{-6} Pa 以上。

1.2 测量原理和方法

(1) 打开真空室,把已制备的绝缘体材料装在靶头上,调节靶台使电子枪发射的电子束轰击在材料中心。

(2) 封装好真空室,并检漏以确保真空室漏气率小于 10^{-9} Pa · L/s。

(3) 拆除电子枪的某些部件如脉冲发生器板等,以防烘烤时烘坏,然后用分子泵初抽真空并开始烘烤,离子泵烘烤到 250 °C,电子枪接口烘烤到 200 °C,电子枪陶瓷烘烤到 150 °C,真空室的其它部分烘烤到 220 °C,烘烤时间为 48 h。

(4) 停止烘烤并起离子泵,5~8 h 后,建立真空(达到 10^{-7} Pa)。

(5) 电子枪的相关部件安装完毕后,把电子枪的栅偏压升到 50~80 V,开始增加电子枪灯丝电流,每隔 30 min 增加 0.1 A,直到 1.5 A。

(6) 电子枪灯丝电流稳定在 1.5 A 约 1 h 后,调节高压电源控制柜使电子枪阴阳极间的电压差为 30~40 keV。

(7) 先打开信号发生器,使其能产生脉宽 1 μ s、重复频率 50 Hz 的 +10 V 的矩形脉冲电压;然后分别打开功率放大器和电子枪触发器,这样电子枪就可以发射电子束了,此时真空室的真空度会立刻降到 10^{-5} Pa 左右,之后真空度会逐渐升高。

(8) 把电子枪阴阳两极间的电压差降为零,关闭电子枪触发器,这样电子枪就不再发射电子束。重新调节信号发生器使其产生脉宽 0.5 μ s、重复频率 0.1 Hz(或更低)的 +10 V 的矩形脉冲,把电子枪灯丝电流适当调低(通常为 1 A 左右),使电子枪发射的脉冲电子流约为 100 μ A 并保持 1 h,电子枪发射的脉冲电子流大小按第(10)和(11)步骤测量。

(9) 升高栅偏压(通常为 157 V 左右),使电子枪发射的脉冲电子流为 μ A 量级,电子枪发射的脉冲电子流大小按第(10)和(11)步骤测量。

(10) 断开正偏置开关和负偏置开关,靶、偏置盒和真空室壁都是绝缘的,偏置盒作为测量装置的收集极,靶头为发射极。为了便于了解测量步骤和测量原理,图 2 给出测量装置的等效电路。

(11) 把负偏置开关合上并把原电子能量调节为能量 E_{p1} ,开电子枪触发器让电子枪产生的矩形脉冲原电

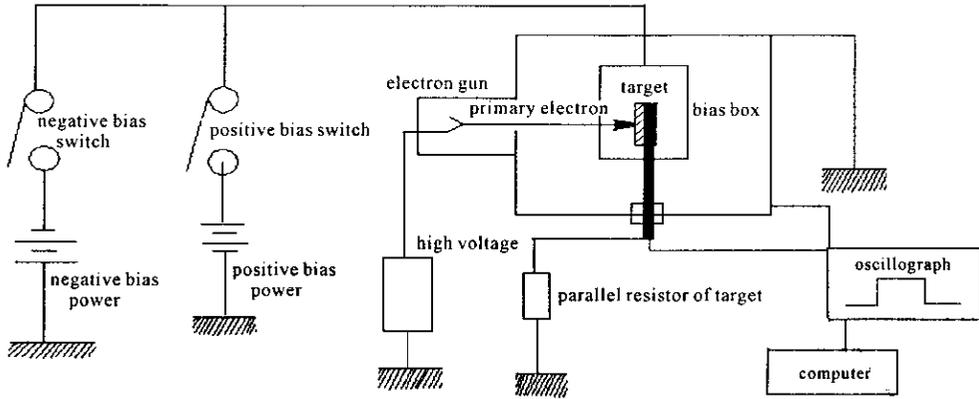


Fig. 2 Circuit of yield measuring device of secondary electron emission from insulator

图 2 绝缘体二次电子发射系数的测量装置的等效电路图。

子流 I_{p1} 轰击在靶头上, (在电子枪发射第一个脉冲时就采集数据并立刻关闭电子枪触发器, 约 10 min 后再开电子枪触发器, 这样就实现了单脉冲电子枪法测量绝缘体的二次电子发射系数)。由于收集极电势比靶面电势低得多, 在强排斥场作用下, 二次电子不能达到收集极, 这时原电子流基本从靶并联电阻 R_b 流入大地 (靶并联电阻比示波器电阻小很多, 通常是数 $k\Omega$), 则靶头上得到的脉冲电流 I_{c11} 就是原电子流 I_{p1} , 靶头上得到的脉冲电流 I_{c11} 在靶并联电阻 R_b 上产生的电压积分值 $SI_{c11} = SI_{p1} = \tau \times R_b \times I_{p1} = \tau \times R_b \times I_{c11}$ 。

由于电子采集系统中有等效电容, 示波器测量出的原电子流波形不是方波, 且脉冲波形受到干扰。为了准确地测量靶并联电阻电压的积分值, 用装有 Wavestar 软件的计算机处理示波器上所采集到的脉冲电压波形, 并用 Origen 软件积分算出靶并联电阻两端脉冲电压的积分值 SI_{c11} , 脉冲原电子流的大小表示为

$$I_{p1} = \frac{|SI_{p1}|}{\tau \times R_b} \quad (1)$$

(12) 断开负偏置开关后, 合上正偏置开关, 这时收集极电势比靶面电势高, 二次电子能被收集极全部收集。把原电子能量仍调节为能量 E_{p1} , 打开电子枪触发器让电子枪产生原电子流轰击在靶上 (在电子枪发射第一个脉冲时就采集数据并立刻关闭电子枪触发器, 约 10 min 后, 再打开电子枪触发器), 测量并计算出靶并联电阻两端脉冲电压的积分值 SI_{c1} 。根据二次电子发射的概念和电子在靶头上的综合效应可知, 原电子流轰击在靶头上发射的二次电子流的大小

$$I_{s1} = \frac{|SI_{p1} - SI_{c1}|}{\tau \times R_b} \quad (2)$$

(13) 根据二次电子发射系数的概念可知, 当原电子能量为 E_{p1} 时, 绝缘体材料的二次电子发射系数为

$$\delta_1 = \frac{I_{s1}}{I_{p1}} = \frac{|SI_{p1} - SI_{s1}|}{|SI_{p1}|} \quad (3)$$

根据 (3) 式, 我们可以计算出原电子能量为 E_{p1} 时的绝缘体材料的二次电子发射系数。

(14) 把原电子能量调节在某个能量 E_{p2} 并重复上面的实验步骤, 可以测量出原电子能量为 E_{p2} 时的绝缘体材料的二次电子发射系数。这样我们就可以测量出不同原电子能量的绝缘体材料的二次电子发射系数。

2 MgO 二次电子发射系数的测量

利用所研制的装置, 我们测量了多晶 MgO (通过磁控溅射的方法制备)^[2] 原电子能量较低和较高时的二次电子发射系数, 如图 3 和图 4 所示。

3 测量结果的分析与讨论

上文叙述的是测量方案 B 的装置结构、测量步骤、测量原理和测量结果, 与此同时我们还设计了测量方案 A^[2]。方案 A 和方案 B 的测量步骤和测量原理基本一样, 但结构有区别, 主要是: (1) 方案 B 的偏置盒作为二次电子的收集极, 正偏置电压和负偏置电压接在偏置盒上; (2) 方案 A 没有偏置盒, 真空室壁作为二次电子的收集极, 正偏置电压和负偏置电压接在收集极上。装置结构的不同导致测量结果也不同, 作为比较, 我们给出方案 A 的测量结果。

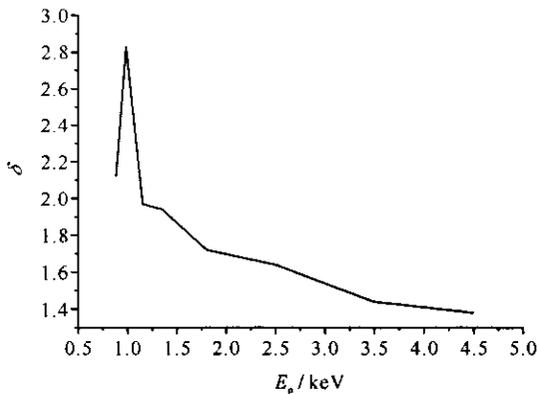


Fig. 3 Secondary electron emission yield of MgO with low primary electron energy

图 3 MgO 的二次电子发射系数(原电子能量较低)

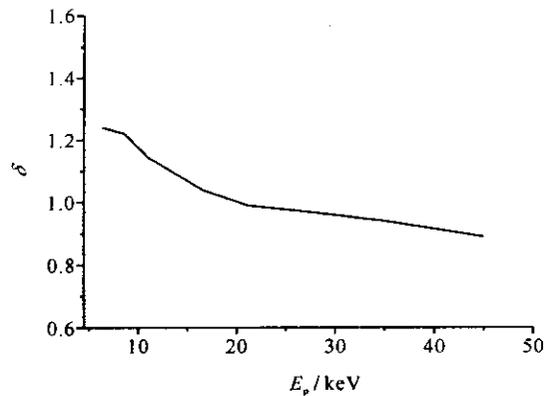


Fig. 4 Secondary electron emission yield of MgO with high primary electron energy

图 4 MgO 的二次电子发射系数(原电子能量较高)

3.1 方案 A 的测量结果

图 5、图 6 分别是用方案 A 测量的多晶 MgO(与方案 B 所测量的 MgO 是同一块)的二次电子发射系数和蓝宝石(晶面为(001),厚度为 0.5 mm,表面经过抛光,合肥科晶公司制备)^[2]的二次电子发射系数。

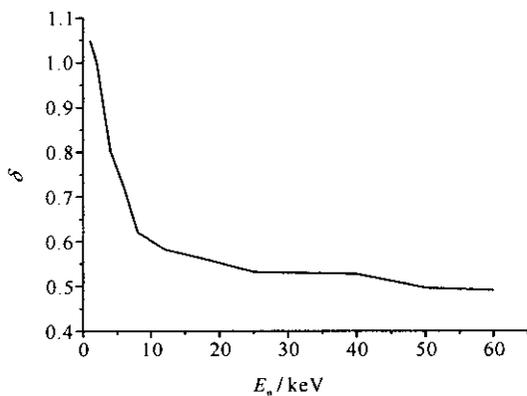


Fig. 5 Secondary electron emission yield of MgO

图 5 MgO 的二次电子发射系数

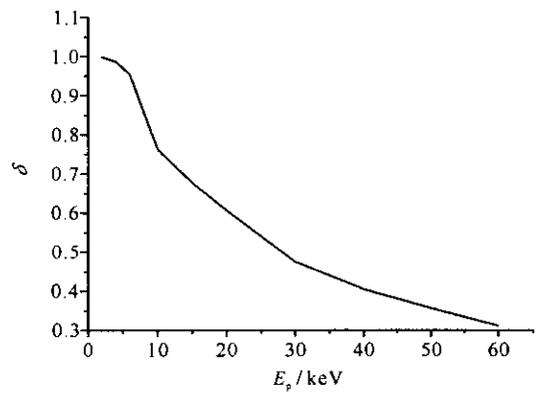


Fig. 6 Secondary electron emission yield of sapphire

图 6 蓝宝石的二次电子发射系数

3.2 分析讨论

MgO 二次电子发射体的制备方法很多,可以使用细粒的 MgO 喷涂在金属基板上,也可以用镁在氧气中燃烧,或用 $MgCO_3$ 分解,以及氧化基金属上的镁层等办法。涂层厚度为 0.1~10 μm 。MgO 薄层的二次电子发射系数,不同学者测量的结果相差很大,以至最大值 δ_{max} 从 2 到 26^[3], δ_{max} 所对应的原电子能量 $E_{p, \text{max}}$ 范围也很宽,从 400 eV 到 1 500 eV^[1]。认为 δ_{max} 的大小与制备方法有关,也与真空条件有关。从方案 B 的测量结果可知:用磁控溅射法制备的 δ_{max} 约为 2.83(在 2~26 范围里, δ_{max} 所对应的原电子能量 $E_{p, \text{max}}$ 约为 980 eV。测量结果表明我们用磁控溅射法制备的 MgO 的二次电子发射系数较低,可能是由磁控溅射法制备 MgO 时掺入了过多的杂质所引起的。

从方案 A 所测量的结果可知:当原电子的能量在 1~60 keV 范围内时,蓝宝石的二次电子发射系数都不大于 1,当原电子的能量为 2 keV 时,蓝宝石的二次电子发射系数最大值约为 1。从方案 A 所测量的结果还可知:当原电子的能量在 1~60 keV 范围内时,用磁控溅射法制备的 MgO 的二次电子发射系数都不大于 1.05,当原电子的能量为 1 keV 时,用磁控溅射法制备的 MgO 的二次电子发射系数最大值约为 1.05,该值不在 2~26 范围内。

对于同一块 MgO,用方案 A 所测量的二次电子发射系数明显小于方案 B 所测量的结果,且方案 A 所测量的 δ_{max} 不在 2~26 范围内。这是因为:通常的绝缘体二次电子发射系数的测量装置^[4]的收集极离材料表面为 30~40 mm,偏置电压为 40~50 V,但是在方案 A 中,测量装置的收集极离材料表面太远(收集极离材料表面约 200 mm,偏置电压只有 45 V)以至部分二次电子不能离开材料表面,因此该方案测量的二次电子发射系数明显偏低。

在方案 B 中,测量装置的收集极离材料表面约 35 mm,偏置电压 45 V,方案 B 的测量装置的收集极离材料表面的距离和偏置电压大小符合通常的绝缘体二次电子发射系数的测量装置的设计要求,而且我们用方案 B 所测的 δ_{\max} 在 2~26 范围内,因此方案 B 所测的 MgO 的二次电子发射系数是可信的。

4 结 论

在研制绝缘体二次电子发射系数测量过程中,我们首先设计出测量方案 A,由于该方案装置的二次电子收集极是真空室壁,装置的收集极(真空室壁)离材料表面太远以至部分二次电子不能离开材料表面,因此用方案 A 测量装置所测量的 MgO 的二次电子发射系数明显偏低。然后,我们把方案 A 装置改成方案 B 装置。在方案 B 中,测量装置的收集极(偏置盒)离材料表面约 35 mm,偏置电压 45 V。通常的绝缘体二次电子发射系数的测量装置^[4]的收集极离材料表面为 30~40 mm,偏置电压为 40~50 V。采用方案 B 所测的 δ_{\max} 在以前的学者所测的 δ_{\max} 的范围内,因此方案 B 所测的 MgO 的二次电子发射系数是可信的,这表明我们成功地研制了能测量绝缘体的二次电子发射系数的测量装置。

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, 1986:168-171. (Cheng H, Jiang J P. Cathode electronics. Xi'an: Publishing House of Northwest Telecommunication Engineering Institute, 1986:168-171)
- [2] 谢爱根. 二次电子发射的研究和二次电子发射系数的测量[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2005:88-94. (Xie A G. Study and measurement of yield. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005:88-94)
- [3] 刘学恂. 阴极电子学[M]. 北京:科学出版社, 1980:449. (Liu X Q. Cathode electronics. Beijing: Science Press, 1980:449)
- [4] Whetten N R. Cleavage in high vacuums of alkali halide single crystals-secondary electron emission[J]. *J Appl Phys*, 1964, **35**:3279-3282.

Device for measuring secondary electron emission yield of insulator

XIE Ai-gen¹, GUO Sheng-li¹, LI Chuan-qi¹, PEI Yuan-ji²

(1. Physical Department, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: A device for measuring secondary electron emission yield of insulator was set up successfully, which was made up of electron gun system, vacuum system and electrical system, the energy band of primary current produced by the device was 0.8~60 keV. By the single-pulse electron gun method, the secondary electron emission yield of polycrystal MgO yield was measured when the primary electron energy band was 0.8~45 keV. In the experimental measurement, the distance from material surface to secondary electron collector was 35 mm, the bias voltage was 45 V. The maximum measured yield of MgO produced by the method of magnetron sputtering was 2.83, which was in the range of 2 to 26, and the corresponding primary electron energy was 980 eV. These results proved that the secondary electron emission yield of insulator measured with the device is credible, but the yield of MgO is smaller than the normal yield of MgO. The reason might be that when the MgO is produced by the method of magnetron sputtering, too much impurity is set in the MgO, this condition results in the decrease of the yield of MgO.

Key words: Measuring devices; Insulator; Secondary electron emission yield