

DOI: 10.7652/xjtuxb201711017

电子轰击下 MgO 薄膜的二次电子效应的衰减机理

魏强, 吴胜利, 付马龙, 李洁, 胡文波, 张劲涛
(西安交通大学物理电子物理与器件教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 以 MgO 薄膜、MgO/Au 复合薄膜作为二次电子发射材料的研究对象,利用持续电子束轰击薄膜的方式,研究了二次电子效应与时间的变化规律。通过测试样品时间的指数衰减,电导率和介电常数对衰减速率的影响,建立模型假设来研究二次电子发射的机理,提出了潜在电子的概念及平板电容模型;以此模型为基础进行分析推导,建立了二次电子发射过程理论模型,得出了诱导电流和二次电子发射系数实验值的表达式,与实际样品测试结果的趋势一致,二次电子发射材料性能的衰减速率与薄膜电导率正相关,验证了所提理论模型能很好地解释介质薄膜二次电子发射的衰减机理,有助于提高二次电子发射材料的衰减性能,为改进工艺和研发新型介质薄膜材料提供了一定的理论指导。

关键词: MgO 薄膜;二次电子发射;介质薄膜;衰减机理
中图分类号: TN432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0125-05

Attenuation Mechanism of Secondary Electron Effect of MgO Film Under Electron Bombardment

WEI Qiang, WU Shengli, FU Malong, LI Jie, HU Wenbo, ZHANG Jintao
(Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the secondary electron emission coefficient and attenuation characteristic becomes the key to the application technology. Taking MgO film and MgO/Au composite films as the research objects of secondary electron emission materials, the change law of secondary electron effect over time is revealed by continuous electron beam bombardment on the film. The exponential decay of the sample time was tested and the influence of conductivity and dielectric constant on attenuation rate was explored. The mechanism of secondary electron emission was discussed under model hypothesis. The concept of potential electron and tablet capacitance model were put forward, and the theory model of the secondary electron emission process was then established. The expression of experimental value of the induced current and the secondary electron emission coefficient was obtained and coincided with the test result trend of actual sample, namely, the attenuation rate of secondary electron emission material properties was positively correlated to the film conductivity. It is concluded that the proposed theoretical model effectively explains the attenuation mechanism of the dielectric film secondary electron emission, and facilitates improving the attenuation performance of secondary electron emission material.

Keywords: MgO film; secondary electron effect; dielectric film; attenuation mechanism

电子倍增器是一种用来放大入射电子数的真空电子器件,广泛应用于各类精密仪器中。实验发现,在电子束轰击介质薄膜的过程中,二次电子发射特性会随着时间逐渐衰减,从而降低器件的使用寿命^[1-3]。为了提高电子倍增器的性能,需要开发新制备工艺或研发新型的薄膜材料,MgO 薄膜具有二次电子发射系数高以及制备工艺简单等优点,适用于有高能粒子轰击表面的器材^[4-6]。2011 年,Fit-ting 等尝试用自洽电荷输运模型来模拟介质薄膜中的二次电子发射衰减过程^[7-8]。本文以 MgO 薄膜、MgO/Au 复合薄膜为研究对象,根据实验测试和数据分析结果来建立模型,进而描述二次电子发射的衰减过程,并结合实际样品测试结果,对比了衰减模型与实际衰减的变化趋势。

1 实验

1.1 实验原理

本文实验采用小的电子束流 I_p 在高真空下轰击介质薄膜样品,测试原理如图 1 所示。源电子电流由加热热阴极的方式产生,低能量的源电子经过栅极过滤后由阳极加速成为高能电子,最终源电子垂直入射在薄膜样品上。二次电子从表面逸出被收集装置接收,得到大小为 I_s 的二次电子电流,同时薄膜表层会出现电荷积累,与薄膜基底形成电势差,产生诱导电流 I_{ic} ,用测试装置记录二次电子电流与诱导电流随时间变化的数据,二次电子发射系数为

$$\delta = \frac{I_s}{I_p} \quad (1)$$

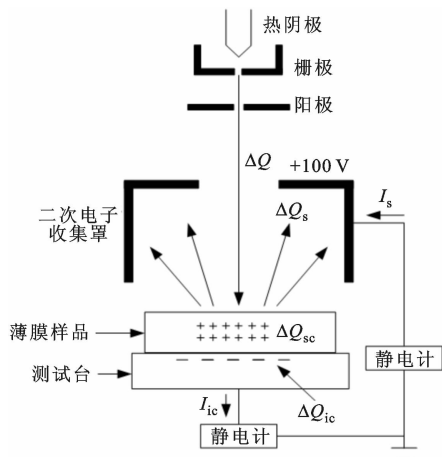


图1 测试原理示意图

由于实验中 I_p 无法直接测量,一般用原电子电流实验值来近似代替,即

$$I_{pT} = I_s - I_{ic} \quad (2)$$

用二次电子发射系数的实验值来近似代替真实值,即

$$\delta_T = \frac{I_s}{I_{pT}} = \frac{I_s}{I_s - I_{ic}} \quad (3)$$

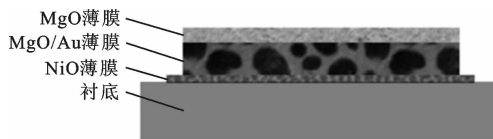
电子源采用热阴极电子枪,进行实验前先对电子枪特性进行测定,当热阴极灯丝电流为 1.5 A 以上时开始出现原电子束电流,灯丝电流为 1.55 A 时原电子束电流达到 4.5~5.5 nA,1.7 A 时原电子束电流达到 70~100 nA。测试时真空度保持在 10^{-3} Pa 以下,用 Keithely 静电计测量二次电子电流和诱导电流,并利用采集程序以 20 s 为一时间段自动记录数据。

1.2 样品介绍

因为 MgO 薄膜和 MgO/Au 复合薄膜具有较优异的二次电子发射特性,制备工艺成熟且重复性好,所以可作为实验使用的介质薄膜样品,其结构如图 2 所示。



(a) 二次电子发射体为单一 MgO 薄膜



(b) 二次电子发射体为 MgO/Au 复合薄膜

图2 介质薄膜样品的结构

MgO 薄膜和 MgO/Au 复合薄膜均采用磁控溅射法制备,先在洁净的不锈钢基片上溅射一层 NiO 基底,NiO 可提高衬底与 MgO 的附着力^[9],之后在一定的含氧氛围中溅射 MgO 层;MgO/Au 复合薄膜是在溅射 MgO 层时共溅射一定的 Au,使导电性增大,最后再额外溅射一层 MgO 作为二次电子发射体。经扫描电镜观察,所制备介质薄膜样品的厚度均为 80~100 nm,二次电子来源深度一般在 5~10 nm^[10],为了进行对照,MgO 薄膜和 MgO/Au 复合薄膜为发射体的部分足够厚且总厚度一致。

2 结果及分析

在持续的二次电子发射过程中, I_s 、 δ 等参数值会随时间不断减小,这是二次电子发射的衰减现象。为了研究二次电子发射的衰减机理,在持续小量的电子束轰击下来观测样品的 I_s 、衬底感应电流 I_{ic} 和

二次电子发射增益 δ_T 随时间 t 的衰减情况,进而对衰减过程进行分析。实验中 I_{pT} 保持在 5 nA 左右,加速电场固定在 200 V,两种样品的测试结果如图 3 所示。

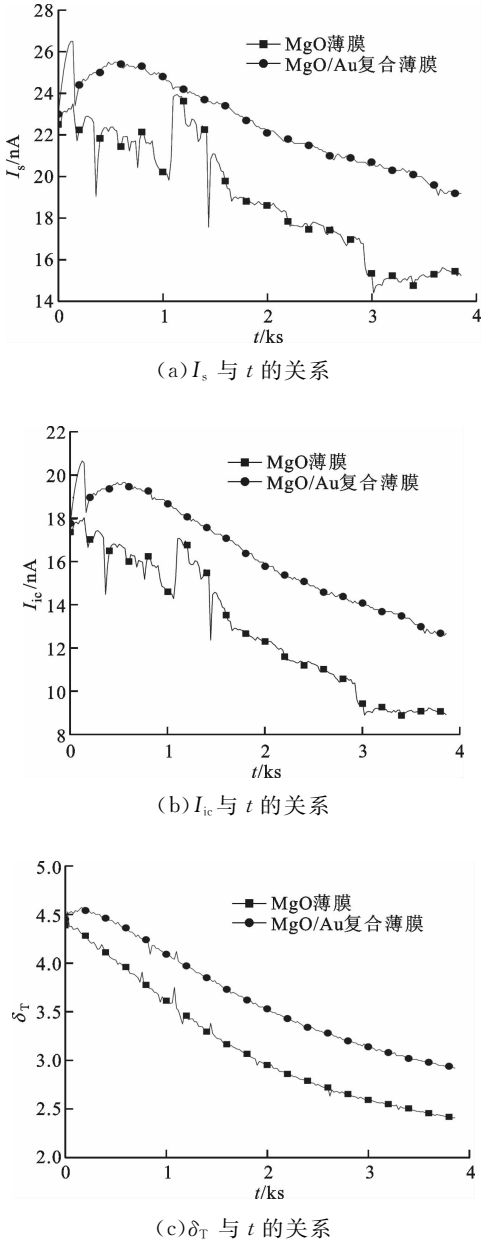


图 3 两种样品的二次电子发射衰减曲线

图 3a、3b 中曲线都有不同程度的抖动,但图 3c 中的曲线比较平滑,这说明 δ 能更好地描述二次电子发射的衰减过程。MgO/Au 复合薄膜与 MgO 薄膜的初始 δ_T 值相同,但前者衰减要慢,说明采用新型复合金属制备工艺改善了 MgO 薄膜的衰减特性。

纯 MgO 薄膜与 Mg/Au 薄膜的特征曲线如图 4 所示,可知 Mg/Au 薄膜具有更好的电导率,从而说明电导率较高可以提高材料二次电子的衰减性能。

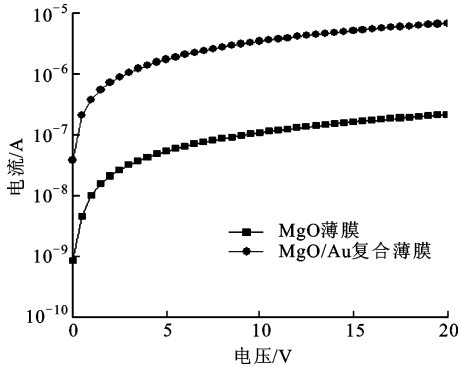


图 4 纯 MgO 薄膜与 Mg/Au 薄膜的特征曲线

二次电子发射过程可简化为 3 个阶段:①具有一定能量的原电子射入介质,有一定的穿透深度,二次电子生成于穿透路径的末端区域;②原电子与介质中某些晶格键发生非弹性作用,将能量传递给晶格键上的电子,使这些电子脱离束缚,成为内二次电子,由潜在电子转化的内二次电子运动到表面并在一定条件下克服表面势逸出,形成可测得的二次电子电流;③在内二次电子生成区出现净的正电荷积累,导致电势升高,与衬底形成电势差,引发诱导电流。

根据指数衰减的特征,建立二次电子的发射理论模型,模拟二次电子效应衰减过程。为了与实验对照,持续稳定原电子束,此时原电子能量不变,轰击介质薄膜,入射原电子在穿透路径的末端区域与总数量为 N 且分布均匀的潜在电子发生非弹性作用,生成内二次电子,同时产生等量带正电的空位,二次电子发射过程的潜在电子模型如图 5 所示。

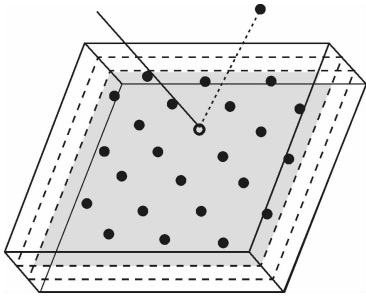


图 5 二次电子发射过程的潜在电子模型

t 时刻生成的内二次电子数等于潜在电子数的减少量,即

$$dN = \delta_i(t) \frac{I_p dt}{q} \tag{4}$$

式中: δ_i 为内二次电子生成系数; q 为单位电荷电量。 δ_i 的物理意义是平均每个原电子生成的内二次电子个数,潜在电子数越多,与原电子发生作用产生内二次电子的几率越大, δ_i 越大。设初始时刻 $t=0$

时内二次电子生成系数为 δ_0 , 则有

$$\delta_i(t) = \delta_0 \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right), \quad t_0 = \frac{Nq}{I_p \delta_0} \quad (5)$$

由此得到了 δ_i 随时间呈指数衰减的规律, 这也是二次电子发射衰减的本质原因, 且 N 越大, 衰减越慢, I_p 或 δ_0 越大, 衰减越快。但是, 并不是所有的内二次电子都能逸出变为可测二次电子, 不能逸出的内二次电子会在表层形成负电荷积累, 二次电子发射过程中薄膜内部的电流、电荷分布如图 6 所示。

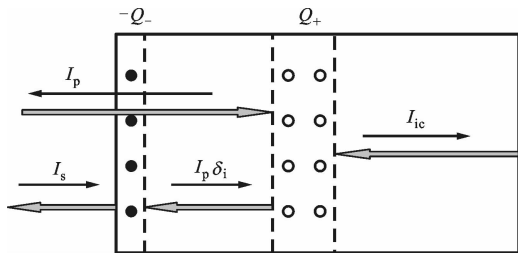


图6 二次电子发射过程中薄膜内部的电流、电荷分布

持续的二次电子发射过程中, 由图 6 可得方程

$$I_s = I_p \delta_i + \frac{dQ_-}{dt} \quad (6)$$

$$I_{ic} = I_p \delta_i + \frac{dQ_+}{dt} - I_p \quad (7)$$

$$I_{pt} = I_s - I_{ic} = I_p + \left(\frac{dQ_+}{dt} - \frac{dQ_-}{dt}\right) \quad (8)$$

式中: Q_+ 为介质层内正电荷量; Q_- 为介质层表面负电荷量。

源电子电流实验值衰减曲线如图 7 所示。通过对不同组实验数据对比发现, 在相同条件下, 对不同样品施加相同大小的入射电子曲线相差不大, 可近似认为 $I_{pt} = I_p$, 根据式(8)可得 $\frac{dQ_+}{dt} = \frac{dQ_-}{dt}$, 这表明一旦有积累正电荷就有等量的内二次电子不能逸出, 或一旦积累正电荷被中和就会有等量的内二次电子逸出, 表明了积累正电荷对内二次电子的束缚作用。因此, 在理想条件下有

$$\delta_T = \frac{I_s}{I_{pt}} = \frac{I_{ic} + I_p}{I_p} \quad (9)$$

诱导电流的变化反映了正电荷积累量 Q_+ 的变化, 类似于平板电容的电荷量与漏电流的关系, 可以建立平板电容模型, 用等效电路来近似计算诱导电流。源电子电流实验值衰减曲线和平板电容模型的等效电路如图 7、8 所示。

设 t 时刻正电荷的积累量为 $Q_+(t)$, 诱导电流的推导过程为

$$I_{ic}(t) = JS = \sigma \frac{Q_+(t)}{\epsilon S} S = \frac{\sigma}{\epsilon} Q_+(t) \quad (10)$$

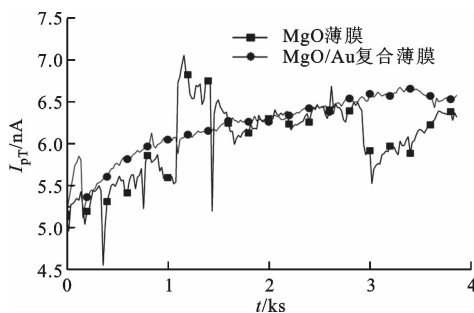


图7 源电子电流实验值衰减曲线

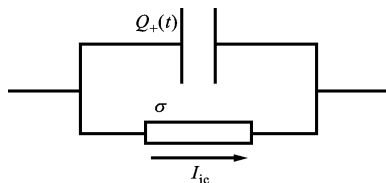


图8 平板电容模型的等效电路

式中: J 为诱导电流密度; S 为电荷积累区的横截面积; σ 为介质薄膜的电导率; ϵ 为介质薄膜的介电常数。诱导电流的变化直接反映了正电荷积累量的变化, 而二次电子的逸出导致了正电荷的积累, 结合式(5)、(10)可得

$$\delta_T = \frac{t_0 \delta_0}{t_0 - t_{ic}} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) + \frac{t_0 - t_{ic} - t_0 \delta_0}{t_0 - t_{ic}} \exp\left(-\frac{t}{t_{ic}}\right) \quad (11)$$

假如材料的电导率无穷大, 即 $\sigma \rightarrow \infty, t_{ic} \rightarrow 0$ 时, 式(11)可变为

$$\delta_T = \delta_0 \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) = \delta_i \quad (12)$$

此时的 $\delta_T = \delta_i$, 这说明内二次电子全部逸出, 没有受到积累正电荷的束缚作用。这是因为电导率无穷大, 不会产生积累正电荷, 因此增大电导率会增大二次电子发射系数, 即降低了二次电子发射的衰减速度。

根据式(6), 对 δ_T 求极值可得

$$t_1 = \frac{t_0 t_{ic}}{t_0 - t_{ic}} \ln \left[\frac{(\delta_0 - 1)(t_0 - t_{ic})}{\delta_0 t_{ic}} + 1 \right] \quad (13)$$

此时 δ_T 存在唯一极大值点 t_1 , 因此曲线会先升高到最大值, 然后再不断衰减, 二次电子发射系数实验值衰减曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 两类样品的二次电子来源层相同, 即 δ_0, t_0 相同, MgO/Au 薄膜中间层的电导率更高, 因此 t_{ic} 更小, 更接近内二次电子生成系数; 相比于 MgO 曲线, MgO/Au 曲线有明显的向上弯曲段, 说明在 t_1 处的曲率大, 这是因为小的 t_{ic} 对应大的二阶导数 δ_T'' , 导致极值点处弯曲明显。

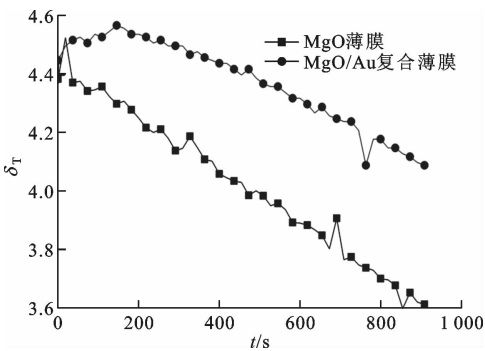


图 9 二次电子发射系数实验值衰减曲线

3 结 论

为了研究介质薄膜二次电子发射的衰减机理,用持续电子束轰击 MgO 薄膜、MgO/Au 复合薄膜,观测二次电子发射的衰减情况。实验证明,在入射电流相同的情况下,介质层二次电子衰减与介质层电导率有关,电导率越大则二次电子发射效应衰减越慢。本文在已有理论研究的基础上,提出了潜在电子的概念及平板电容模型,建立了二次电子发射过程理论模型,以此模型为基础进行分析推导,得出了诱导电流和二次电子发射系数实验值的表达式,与实际样品衰减趋势一致,说明本文所提理论模型能很好地解释介质薄膜二次电子发射的衰减机理。

参考文献:

[1] BELHAJ M, TONDU T, INGUIMBERT V. Effect of the incident electron fluence on the electron emission yield of polycrystalline Al₂O₃ [J]. Applied Physics Letters, 2011, 257(10): 4593-4596.

[2] SCHOLTZ J J, SCHMITZ R W A, HENDRIKS B H W, et al. Description of the influence of charging on the measurement of the secondary electron yield of MgO [J]. Applied Surface Science, 1997, 111(3): 259-264.

[3] CAZAUX J. E-induced secondary electron emission yield of insulators and charging effects [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006, 244(2): 307-322.

[4] HENRICH V E, FANL J C C. Differential sputtering of MgO/Au cermet films and its application to high-yield secondary-electron emitters [J]. Surface Science, 1974, 42(1): 139-156.

[5] RITZ V H, SHIH A, SOBOCINSKI B. Performance of MgO/Au cermet films as secondary electron emission cold cathodes [J]. Surface and Interface Analysis, 1992, 18(7): 514-524.

[6] BLAISE G, PESTY F. The secondary electron emission yield of muscovite mica: charging kinetics and current density effects [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105: 034101.

[7] FITTING H J, TOUZIN M. Secondary electron emission and self-consistent charge transport in semi-insulating samples [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110: 044111.

[8] 李锁斌,陈天宁,奚延辉,等. 新型声子晶体板中低频完全禁带形成机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 51-57.

LI Suobin, CHEN Tianning, XI Yanhui, et al. Forming mechanisms of low frequency complete band gaps in phononic crystal plate [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 51-57.

[9] LI Jie, HU Wenbo, WEI Qiang, et al. Electron-induced secondary electron emission properties of MgO/Au composite thin film Prepared by magnetron sputtering [J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(3): 1466-1475.

[10] 周玉. 材料分析方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 216.

[本刊相关文献链接]

毕成,唐桂华,傅博. 纳米多孔结构单晶硅热电薄膜声子热导率数值研究. 2017, 51(5): 23-30. [doi:10.7652/xjtuxb201705004]

封国宝,崔万照,李军,等. 采用收拢式表面的二次电子发射抑制策略. 2017, 51(4): 128-134. [doi:10.7652/xjtuxb201704020]

巫珏珊,梁小平,王科翔,等. 离子储存电极薄膜性能的影响. 2016, 50(5): 140-145. [doi:10.7652/xjtuxb201605021]

李远洁,江凯,刘子龙. 低温增强型非晶钢镓锌氧薄膜晶体管特性研究. 2015, 49(12): 1-5. [doi:10.7652/xjtuxb201512001]

虞阳烨,曹猛,张海波. 金属二次电子发射能谱的表面吸附势垒模型. 2015, 49(10): 97-102. [doi:10.7652/xjtuxb201510016]

马利娥,梅雪松,李彦锋,等. 薄膜传输系统导向辊的力学特性分析. 2014, 48(11): 86-91. [doi:10.7652/xjtuxb201411015]

张振军,郑晓泉,吴文斌,等. 不同温度下聚酰亚胺真空直流沿面闪络特性. 2014, 48(4): 47-51. [doi:10.7652/xjtuxb201404009]

张振军,苗军,王学强,等. 改性聚酰亚胺的真空直流沿面闪络特性. 2013, 47(4): 51-56. [doi:10.7652/xjtuxb201304010]

(编辑 赵炜)