

# 基于微陷阱结构的金属二次电子发射系数抑制研究\*

叶鸣<sup>1)</sup> 贺永宁<sup>1)†</sup> 王瑞<sup>2)</sup> 胡天存<sup>2)</sup> 张娜<sup>2)</sup>  
杨晶<sup>2)</sup> 崔万照<sup>2)</sup> 张忠兵<sup>3)</sup>

1)(西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

2)(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100)

3)(西北核技术研究所辐射探测科学研究中心, 西安 710024)

(2014年1月11日收到; 2014年3月27日收到修改稿)

近年来, 金属二次电子发射系数的抑制研究在加速器、大功率微波器件等领域得到了广泛关注. 为评估表面形貌对抑制效果的影响, 利用唯象概率模型计算方法对三角形沟槽、矩形沟槽、方孔及圆孔4种不同形状微陷阱结构的二次电子发射系数进行了研究, 分析了微陷阱结构的形状、尺寸对二次电子发射系数抑制特性的影响规律. 理论研究结果表明: 陷阱结构的深宽比、孔隙率越大, 则其二次电子发射系数抑制特性越明显; 方孔形和圆孔形微陷阱结构的二次电子发射系数抑制效果优于三角形沟槽和矩形沟槽; 具有大孔隙率的微陷阱结构表面的二次电子发射系数对入射角度的依赖显著弱于平滑表面. 制备了具有不同表面形貌的金属样片并进行二次电子发射系数测试, 所得实验规律与理论模拟规律符合较好.

**关键词:** 二次电子发射系数抑制, 微陷阱结构, 唯象概率模型

**PACS:** 79.20.Hx, 73.43.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.63.147901

## 1 引言

当具有一定能量的电子入射到固体表面时, 会从固体表面激发出一定数量的电子, 这种现象称为二次电子发射. 入射电子称为初始电子, 激发出的电子称为二次电子. 二次电子发射系数 (secondary electron yield, SEY) 定义为二次电子个数与初始电子个数之比, 即每个入射电子在平均意义上所激发出的二次电子个数. SEY与初始电子的入射能量及入射角度有关<sup>[1,2]</sup>, 通常所说的某材料SEY是指垂直入射条件下SEY随能量变化的最大值. 对于不同材料或试样而言, SEY主要取决于材料的本征特性 (例如原子序数、晶体结构) 以及表面状态 (包括表面形貌、吸附等). 由于二次电子发射现象的普遍性, 使得其在诸多研究领域备受关

注, 例如: 空间飞行器的表面带电效应<sup>[3]</sup>、大功率微波器件的微放电效应<sup>[4-7]</sup>、粒子加速器的电子云效应<sup>[8,9]</sup>等.

近年来, 通过改变金属材料的表面形貌来实现SEY的抑制研究得到了广泛关注, 例如应用于行波管收集极的等离子体刻蚀法<sup>[10]</sup>、CuO纳米线的热氧化法<sup>[11]</sup>、应用于加速器的机械加工法<sup>[12]</sup>、化学腐蚀法<sup>[13,14]</sup>. 这类通过人为引入粗糙起伏结构实现SEY抑制的基本原理是: 二次电子被出射点附近的表面多次阻挡, 束缚了其从表面发射的能力, 从而整体上表现为二次电子被“限制”住了. 考虑到这种效应与半导体中的陷阱效应类似, 我们将这种表面结构称之为二次电子的陷阱结构, 而微陷阱结构是指尺度在微米量级的陷阱结构. 由于微波器件的插入损耗随表面起伏加剧而增加, 与机加工获得

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11275154) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn

的毫米级粗糙结构表面<sup>[12]</sup>相比,微陷阱结构<sup>[13,14]</sup>更适用于微放电效应的抑制研究.

本文基于陷阱结构中电子匀速直线运动和陷阱壁二次电子发射的唯象概率模型对三角形沟槽、矩形沟槽、方孔及圆孔4种陷阱结构中的二次电子运动轨迹进行模拟,从而对出射陷阱结构的表面SEY进行统计,从理论上得到了陷阱结构的几何形状及尺寸参数对SEY的影响规律,并进行了实验验证.

## 2 微陷阱结构的SEY模拟

### 2.1 四种微陷阱结构几何模型

本文针对以下4种理想形状的陷阱结构模型进行分析:三角形沟槽阵列结构、矩形沟槽阵列结

构、方孔阵列结构及圆孔阵列结构,如图1(a)所示.图1(b)为相应的阵列结构单元示意图,其中三角形和矩形沟槽结构等效为二维平面上的三角形和矩形.对于图1(b)所示的4种陷阱结构模型,相应的几何特征参数为:三角形结构——张角 $\alpha$ ,矩形结构——高 $H$ ,宽 $W$ ;方孔结构——长 $a$ ,宽 $b$ ,高 $c$ ,圆孔结构——半径 $R$ ,高 $H$ .需要说明的是,由于本文模拟的陷阱结构尺寸在微米量级,细微结构所致的二次电子发射边缘效应<sup>[1]</sup>对模拟结果的影响可以忽略,所以三角形的腰长 $L$ 对SEY没有影响,故不作为描述三角沟槽结构的特征参数.反映阵列单元分布密度的孔隙率 $P$ 定义为所有阵列单元的总面积占表面总面积的比例.深宽比 $A_s$ 定义为阵列单元的纵向尺度与横向尺度之比.

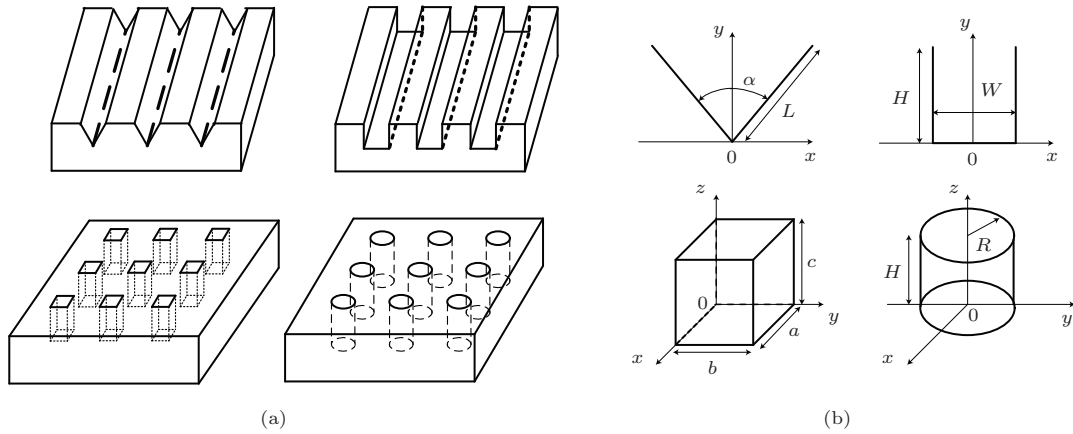


图1 四种微陷阱结构几何模型示意图 (a) 三维示意图; (b) 阵列单元示意图

### 2.2 微陷阱结构SEY的唯象概率模型计算方法

由于二次电子发射过程在微观本质上具有随机性,因此蒙特卡罗方法在二次电子发射的理论模拟研究中被广泛采用<sup>[13,15,16]</sup>.对于图1(a)所示的微陷阱结构表面,可将其SEY $\delta_e$ 按初始电子入射位置分为两部分<sup>[13]</sup>:平滑表面部分的SEY $\delta_f$ 以及陷阱结构部分的SEY $\delta_h$ .陷阱结构表面的SEY模拟过程就是分别对这两部分的SEY进行模拟求解,然后依据孔隙率 $P$ 进行加权平均:

$$\delta_e = P\delta_h + (1 - P)\delta_f. \quad (1)$$

对于平滑表面部分的SEY  $\delta_f$ ,主要有两种计算模拟方法:一种是基于求解电子在固体内的级联散射过程的蒙特卡罗模拟方法<sup>[15]</sup>,另一种则是不考虑具体的电子运动过程,而是基于从数学角度建立

的二次电子发射唯象概率模型的计算方法<sup>[8,17]</sup>.本文采用文献<sup>[17]</sup>中的二次电子发射唯象概率模型进行计算.在该模型中,二次电子实际上包含三种类型:真二次电子、非弹性背散射电子以及弹性背散射电子.因此,本文所计算的SEY实际上包含了这三种类型的二次电子,这时SEY也称为全二次电子发射系数或总二次电子发射系数.

对于陷阱结构部分的SEY $\delta_h$ ,其求解方法为<sup>[13]</sup>:初始电子进入陷阱结构内部后,按匀速直线运动求解电子运动轨迹,进一步求解出其与陷阱壁的碰撞位置、碰撞角度、碰撞能量,然后按电子入射平滑表面的情形(入射参数需根据实际碰撞参数确定)计算二次电子的产生,包括二次电子的出射个数、方向、能量;之后,将这些新产生的二次电子视为初始电子继续按上述方法求解,所不同的是需要依据具体的陷阱结构边界判断电子是再

次在陷阱结构内部发生碰撞, 还是逃逸了陷阱结构; 该计算过程一直持续到陷阱结构内不再有电子存在 (被吸收或逃逸); 最后, 统计所有逃逸出陷阱结构的电子个数, 从而得到陷阱结构部分的SEY. 图2所示为微陷阱结构SEY唯象概率模型计算流程图. 其中, “唯象概率计算模块”的功能是依据二次电子发射的唯象概率模型和入射电子信息计算所产生的二次电子信息. 具体计算过程包括: 首先依据三种类型二次电子 (即弹性背散射电子、非弹性背散射电子、真二次电子) 各自的发生概率判断该次碰撞所属类型, 然后依据该类型二次电子相应的唯象概率模型计算其发射个数、能量及方向. “电子轨迹追踪模块”的功能是依据微结构几何边界和二次电子发射信息计算二次电子运动轨迹, 求解的主要策略是: 根据二次电子初始发射位置、方向和微结构几何边界特性, 计算该二次电子到达各边界所需时间 (将微结构开口边或面也视为边界), 然后取最先到达的边界为真实到达边界. 由此可见, 该计算过程与微结构几何形状息息相关, 因此针对图1所示的4种微结构分别开发了相应的轨迹追踪模块.

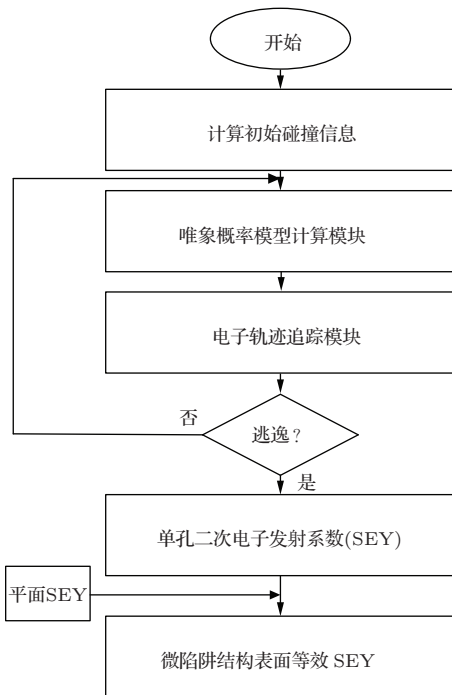


图2 微陷阱结构表面SEY唯象概率模型计算流程

二次电子发射的唯象概率模型计算方法忽略了陷阱结构边沿的二次电子发射增强现象<sup>[1]</sup>, 但对于本文所模拟的微米尺度的陷阱结构, 由于入射到边沿的电子占总入射电子的比例较小, 所以这种边沿附近导致的二次电子发射增强现象对计算结果

的影响可忽略不计. 但是, 若将本文方法用于纳米级陷阱结构时, 则会引入较大计算误差.

### 3 微陷阱结构的SEY模拟结果与分析

#### 3.1 微陷阱结构特征参数对SEY的影响

图3所示为三角形结构不同张角时的SEY特性模拟结果, 入射方向为垂直入射, 孔隙率取值为0.5, 腰长取值为10 μm. 图中张角为180°的曲线对应于平滑表面的SEY特性. 可以看到, 当张角α较小时, 三角形结构的SEY低于平滑表面SEY, 即具有SEY抑制效应; 当张角α较大时, 三角形结构的SEY基本与平滑表面SEY一致, 在某些张角条件下甚至可能高于平滑表面, 即增强了表面的二次电子发射. 实际上, 当张角较小时, 出射的二次电子更容易在陷阱结构内部经历多次碰撞过程, 从而表现出SEY抑制效应; 而当张角较大时, 二次电子在陷阱结构内部发生多次碰撞的可能性降低, 从而减弱了SEY抑制效应. 此外, 由于三角形的侧边导致初始电子的实际碰撞角度大于0°, 因而引入了斜入射效应<sup>[14]</sup>, 这是使得SEY趋于增大的因素. 当三角形张角逐渐增大时, 由于多次碰撞过程导致的SEY降低趋势逐渐减弱, 引起SEY有增加趋势; 与此同时, 斜入射效应引起的SEY增加趋势也逐渐减弱, 导致SEY有减小的趋势. 因此, 三角形结构的SEY取决于这两方面因素的综合作用. 图3中给出的模拟结果显示SEY随张角减小先增后减, 说明刚开始时斜入射引起的二次电子发射增强效应占据了主导地位, 但当张角逐渐减小时, 陷阱壁引起的多次碰撞吸收效应逐渐占据了主导地位.

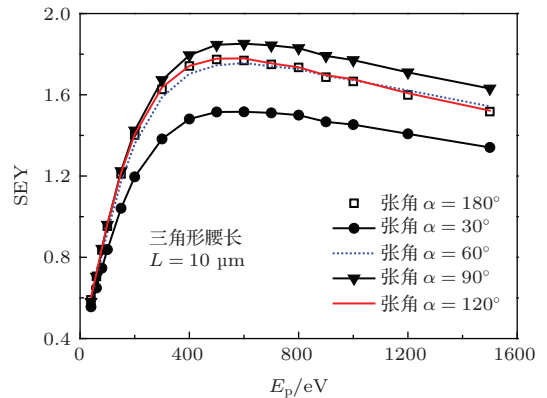


图3 不同张角时的三角形陷阱结构SEY模拟结果

图4给出了矩形沟槽陷阱结构在垂直入射条

件下SEY随深宽比 $A_s$ 、孔隙率 $P$ 的变化规律,其中图4(a)对应的孔隙率为0.5,图4(b)对应的深宽比为1.可以看出,当孔隙率、深宽比越大时,陷阱结构的SEY抑制效果越显著.与三角形沟槽结构相比,矩形沟槽结构只有多次碰撞引起的SEY抑制效应,不存在斜入射效应引起的SEY增强效应,所以SEY呈现出随深宽比单调变化的规律.对方孔结构和圆孔结构也进行了SEY随深宽比、孔隙率变化规律的模拟,所得规律与矩形沟槽结构一致.文献[13]中给出的圆孔陷阱结构实验结果证实了这一理论预测的合理性.

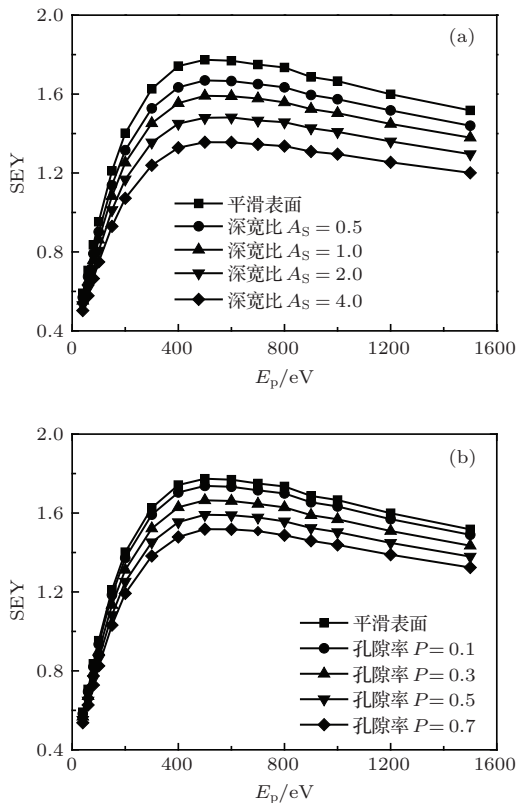


图4 矩形沟槽结构的SEY模拟结果 (a)不同深宽比; (b)不同孔隙率

对于方孔结构,在宽 $b$ 和高 $c$ 不变的情况下,模拟了不同长度 $a$ 时的SEY变化规律,模拟结果如图5所示.模拟时,入射角度为垂直入射,宽和高取值为 $10\ \mu\text{m}$ ,孔隙率取为0.5.由图可见,SEY随着长度增加而增加.这是因为长度越长,二次电子在陷阱结构内部发生多次碰撞的可能性越低,因而SEY抑制效应减弱.

### 3.2 微陷阱结构形状对SEY的影响

图3至图5的模拟结果表明,除了三角形陷阱结构可能导致SEY增加外,其余三种结构均能有

效抑制SEY,且抑制规律均为:深宽比、孔隙率越大,则抑制效应越明显.图6给出了这三种结构在相同特征参数及垂直入射的条件下SEY抑制效果的比较,其中孔隙率取为0.5,深宽比取值为1(对于方孔结构,取长、宽、高相等,即立方体结构).结果显示,三维的方孔和圆孔陷阱结构的SEY抑制效应优于二维的矩形沟槽陷阱结构.这是因为三维结构在第三个维度上也增加了二次电子在陷阱结构内部多次碰撞的可能性,从而具有更为显著的SEY抑制效果.需要说明的是,图6结果显示,在所取深宽比及孔隙率条件下,三种形状陷阱结构在垂直入射时的SEY比较接近,这与模拟计算时所设定的几何结构参数、入射电子参数以及所采用的唯象概率模型参数有一定关系,正如下文即将给出的斜入射模拟结果所显示的,在其他入射角度条件下各形状的微陷阱结构SEY间的相对大小关系有所不同.因此,实际应用中究竟选取哪种形状及尺寸的陷阱结构,还需结合具体应用目的对微陷阱结构的SEY特性进行全面考虑后予以决定.

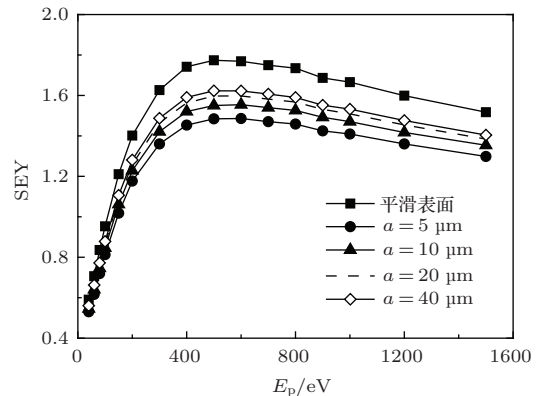


图5 方孔结构不同长度时的SEY模拟结果

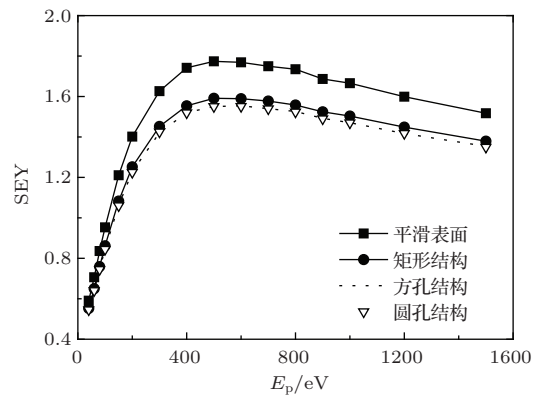


图6 不同形状的陷阱结构SEY抑制效应比较

### 3.3 微陷阱结构的斜入射 SEY 特性

在实际应用中, 比如电子云效应、微放电效应的研究中, 由于二次电子在外力作用下会发生运动轨迹的改变, 导致实际系统中二次电子与金属的碰撞多数情况下为斜入射碰撞, 因此有必要对微陷阱结构在斜入射条件下的 SEY 特性进行研究<sup>[14,18]</sup>. 图 7 给出了入射能量  $E_p$  为 500 eV、孔隙率为 0.5 时, 四种微陷阱结构 SEY 随入射角度  $\theta_p$  变化的模拟结果. 其中, 三角形沟槽结构的张角为  $60^\circ$ , 矩形沟槽结构、圆孔结构的深宽比为 1, 方孔结构设置为立方体结构. 为便于对比, 图 7 中还给出了平滑表面的斜入射 SEY 模拟结果. 结果显示: 1) 相比于平滑表面, 四种陷阱结构在斜入射条件下均有良好的 SEY 抑制效应; 2) 微陷阱结构的 SEY 随角度的变化相比于平滑表面弱得多, 类似于文献<sup>[19]</sup>中描述的“black metal”; 3) 如前所述, 在斜入射条件下, 三维陷阱结构的 SEY 抑制效应更为显著, 这也意味着对于要求斜入射 SEY 抑制的场合, 三维陷阱结构将具有更好的效果.

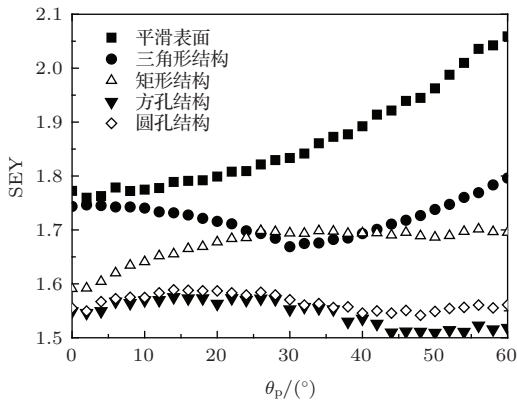


图 7 微陷阱结构的斜入射 SEY 特性模拟结果

## 4 微陷阱结构 SEY 抑制效应的实验验证

在实际的表面处理工艺中, 不同基材、不同处理方法得到的表面形貌千差万别, 而且由于物理或化学反应过程微观上的随机性, 使得最终获取的表面往往是多种理想结构的组合, 这种形貌复杂性为相应的理论分析带来了困难. 但是, 通过选择工艺方法、合理控制工艺参数, 可以近似获得与前述几何模型一致的表面微结构, 从而对理论模拟结果进行验证.

在给出微陷阱结构表面抑制 SEY 的实验验证结果之前, 首先对 SEY 测试原理进行介绍. 采用电流法对样片 SEY 进行测试<sup>[20]</sup>, 图 8 为该测试方法原理图. 首先给待测样片施加 +500 V 偏压, 入射电子所激发的二次电子中仅有高能部分 (能量大于 500 eV) 逃离样片, 这时皮安表所测电流  $I_p$  近似为入射电流; 然后, 将样片所加偏压改为 -20 V, 这时入射电子所激发的二次电子全部逃离样片, 皮安表所测电流  $I_R$  为入射电流与二次电子电流之差. 因此, 电流法测量所得 SEY 为

$$\delta = 1 - I_R/I_p. \quad (2)$$

为提高测试精度, 测试过程中, 真空系统保持在超高真空状态 (压强约为  $10^{-7}$  Pa). 从上述测试原理可知, 本文所测 SEY 是包含了背散射电子在内的全二次电子发射系数. 事实上, 应用这种电流法测试原理, 由于测试入射束流时所加偏压 +500 V 并未将出射电子完全拉回 (能量高于 500 eV 的电子将逃离样片), 实测入射束流是小于真实入射束流的, 这使得实际 SEY 测试数据在入射能量大于 500 eV 时存在一定正误差.

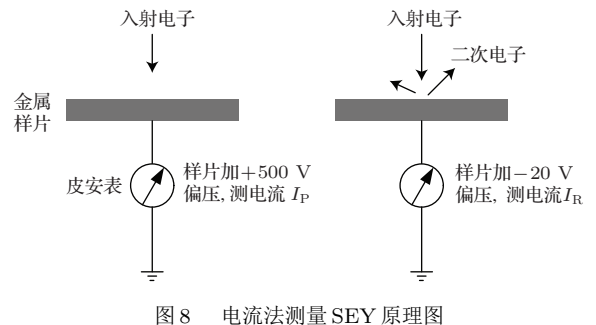


图 8 电流法测量 SEY 原理图

为了验证前述有关三角形微陷阱结构 SEY 特性的模拟结果, 通过机加工的方法获得了 4 种不同表面粗糙度的铝合金基底样片, 然后采用电化学镀的方法在基底表面镀上厚度约为  $10 \mu\text{m}$  的银. 图 9 (a) 为该组样片的激光扫描显微镜 (LSM) 三维形貌分析结果, 样片粗糙度依次为 0.8, 1.6, 3.2,  $6.4 \mu\text{m}$  (该粗糙度量值为算术平均粗糙度, 依据粗糙度比较样块获得). 可以看到, 这种表面在一定程度上可以近似为图 1 (a) 所示的三角沟槽结构. 依据二维剖面数据, 得到该组样片对应的三角形张角约为  $140^\circ$ . 图 9 (b) 为该组样片的 SEY 测试结果, 对比平滑镀银表面的典型 SEY 测试数据<sup>[14]</sup> 可知, 正如模拟结果所揭示的, 这种表面结构的样片没有呈现出明显的 SEY 抑制效应.

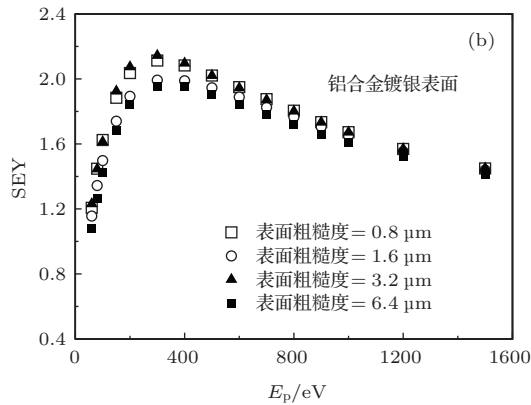
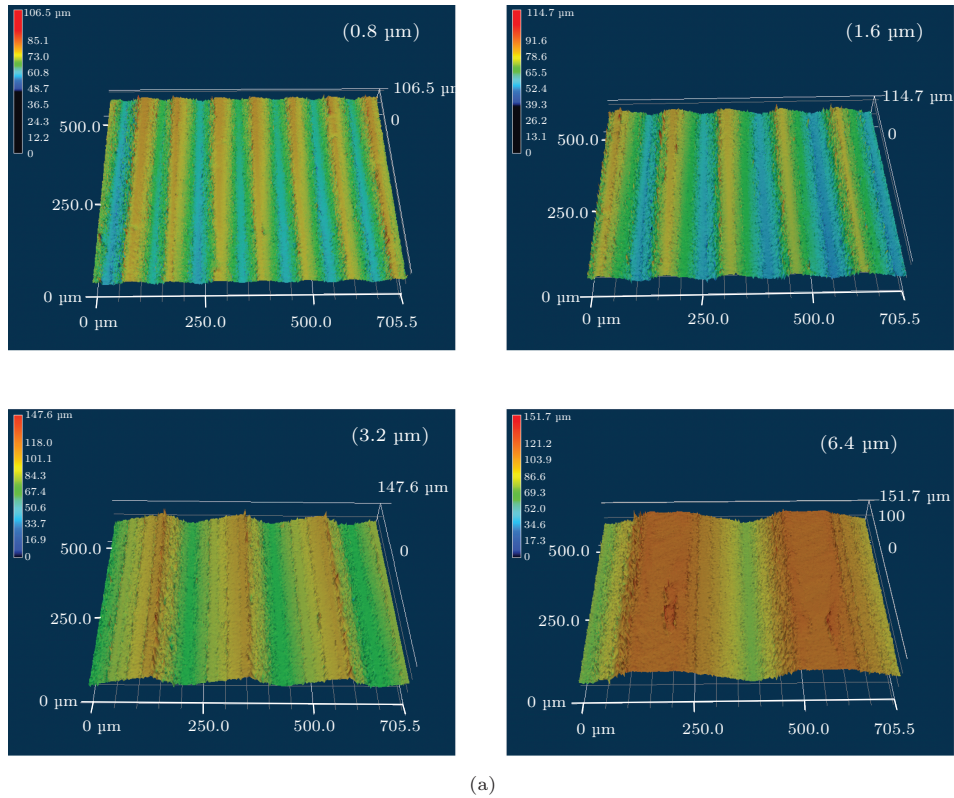


图9 不同表面粗糙度的样品及其SEY实测结果 (a) LSM分析结果; (b) SEY测试结果

为了验证矩形沟槽结构抑制SEY的有效性, 采用光刻法在铝合金电化学镀铜表面制备了矩形沟槽陷阱结构. 样片的三维形貌分析结果及SEY测试结果如图10所示. 为便于对比, 图10(b)中还给出了原始镀铜表面的SEY测试数据. 由于金属表面的SEY特性受表面成分、吸附等因素的影响较为显著<sup>[21,22]</sup>, 可能影响到对微陷阱结构SEY抑制效果的观测, 所以图10(b)中分别给出了样品进行原位等离子清洗前后的SEY测试结果. 等离子清洗采用Ar<sup>+</sup>离子, 离子能量为1 kV, 清洗时间为10 min, 束流大小约为30 μA. 由等离子清洗之前的SEY测试结果可以看到, 相比于原始表面, 矩形陷阱结构表面的SEY最大值下降了约27%, 但当入

射能量高于900 eV时, 微陷阱结构表面的SEY反而略高于平滑表面. 在进行等离子清洗之后, SEY最大值下降20%, 在较高的入射能量段也没有出现陷阱结构表面SEY高于平滑表面SEY的现象, 但是在入射能量小于100 eV时, 微陷阱结构表面的SEY略高于平滑表面. 由此可见, 微陷阱结构表面的SEY抑制效果与入射能量关系较大. 这是因为入射能量影响着出射的二次电子能谱(亦即二次电子类型), 而不同类型的二次电子与粗糙表面的作用过程是不同的<sup>[21]</sup>, 最终导致SEY抑制效应受到入射能量的影响.

图11给出了在铝合金镀银表面实现的圆孔形微陷阱结构三维形貌及相应的SEY测试结果. 需

要说明的是,与文献[13]中给出的等离子清洗后SEY数据不同,图10中所给SEY数据为未经等离子清洗所测数据.实测结果表明,通过构造微陷阱结构表面,SEY可以降低32%.有关圆孔形陷阱结构表面更详细的实验验证结果可参见文献[13].最后,通过直接化学刻蚀的方法制备了随机性的多孔

结构表面,并测试了其SEY随入射角度变化的规律.图12给出了该样片的扫描电镜(SEM)分析与SEY实测结果.不难发现,正如图7的模拟结果所预测的,微陷阱结构表面的SEY对入射角度的依赖相比于平滑表面要弱得多.有关微陷阱结构斜入射特性分析更详细的结果可参见文献[14].

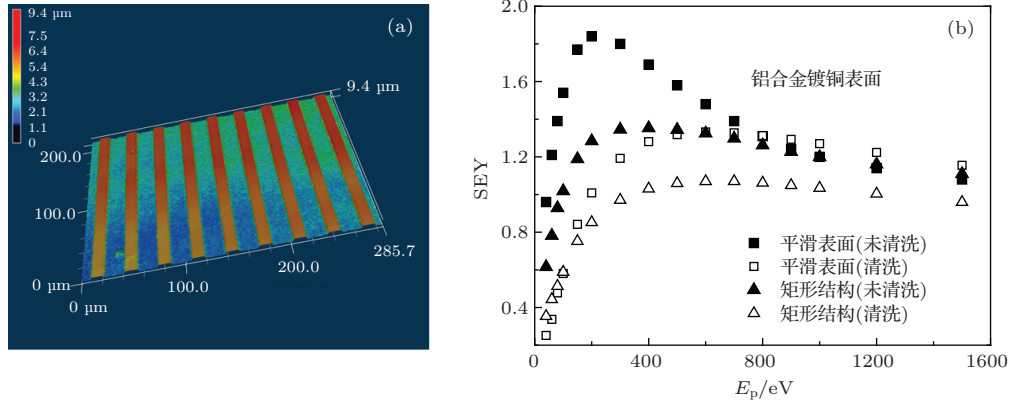


图10 镀铜表面实现的矩形沟槽结构及其SEY测试结果 (a) LSM分析结果; (b) SEY测试结果

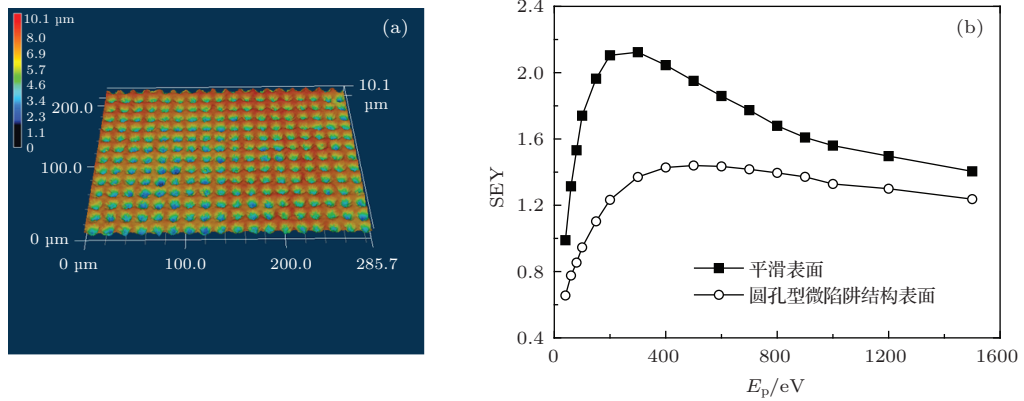


图11 圆孔形微陷阱结构的(a)三维LSM分析结果及(b)SEY测试结果

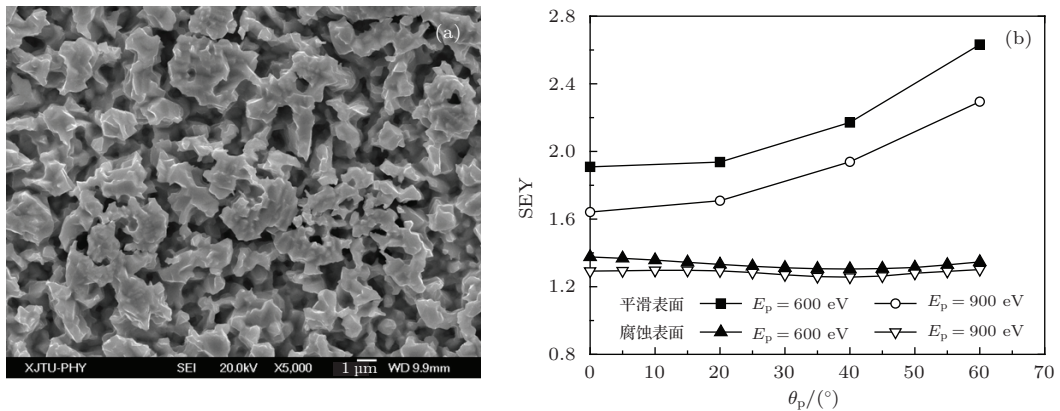


图12 随机多孔表面的(a)SEM分析结果及(b)SEY随入射角度变化的实测结果

## 5 结 论

采用唯象概率模型计算方法对四种不同形状微陷阱结构的SEY特性进行了模拟,研究了微陷阱结构的几何形状及尺寸参数对SEY抑制效果的影响规律.模拟结果表明:1)微陷阱结构能显著抑制SEY,且深宽比、孔隙率越大,抑制效应越明显;2)方孔形、圆孔形的陷阱结构的SEY抑制效果优于三角形沟槽、矩形沟槽陷阱结构;3)与普通平滑表面相比,微陷阱结构的SEY特性具有对入射角度的弱依赖关系.最后,通过机加工、光刻、化学刻蚀等表面处理工艺手段,制备了具有不同表面形貌的微陷阱结构样片,并进行了SEY特性测试,所得结果证实了理论模拟的合理性,为SEY抑制的相关工艺研究提供了参考.

感谢中国空间技术研究院西安分院黄光孙研究员在工艺实验方面提供的帮助.

## 参考文献

- [1] Seiler H 1983 *J. Appl. Phys.* **54** R1
- [2] Xie A G, Zhang J, Wang T B 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 097901
- [3] Balcon N, Payan D, Belhaj M, Inguibert V 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 282
- [4] Lin S, Li Y D, Cao M, Liu C L 2012 *Vacuum Electron.* (3) 1 (in Chinese) [林舒, 李永东, 曹猛, 刘纯亮 2012 真空电子技术 (3) 1]
- [5] Li Y D, Yan Y J, Lin S, Wang H G, Liu C L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 047902 (in Chinese) [李永东, 闫杨娇, 林舒, 王洪广, 刘纯亮 2014 物理学报 **63** 047902]
- [6] Pinto P C, Calatroni S, Neupert H, Delrieux D L, Edwards P, Chiggiato P, Taborelli M, Vollenberg W, Vallgren C Y, Colaux J L, Lucas S 2013 *Vacuum* **98** 29
- [7] Li Y D, Yang W J, Zhang N, Cui W Z, Liu C L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 077901 (in Chinese) [李永东, 杨文晋, 张娜, 崔万照, 刘纯亮 2013 物理学报 **62** 077901]
- [8] Furman M A, Pivi M T F 2002 *Phys. Rev. Top-AC* **5** 124404
- [9] Kirby R E, King F K 2001 *Nucl. Instrum. Meth. A* **469** 1
- [10] Bai G D, Ding M Q, Zhao Q P, Qu B, Feng J J 2009 *Vacuum Electron.* **5** 22 (in Chinese) [白国栋, 丁明清, 赵青平, 瞿波, 冯进军 2009 真空电子技术 **5** 22]
- [11] Aguilera L, Montero I, Dávila M E, Ruiz A, Galán L, Nistor V, Raboso D, Palomares J, Soria F 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 165104
- [12] Pivi M, King F K, Kirby R E, Raubenheimer T O 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 104904
- [13] Ye M, He Y N, Hu S G, Wang R, Hu T C, Yang J, Cui W Z 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 074904
- [14] Ye M, He Y N, Hu S G, Yang J, Wang R, Hu T C, Peng W B, Cui W Z 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 104905
- [15] Ohya K, Itotani T, Kawata J 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** 1153
- [16] Xie A G, Zhan Y, Gao Z Y, Wu H Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 057901
- [17] Lara J, Pérez F, Alfonseca M, Galán L, Montero I, Román E, Raboso D G B 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 476
- [18] Zhou Z Y, Shi L Q, Zhao G Q, Lu Q L 2005 *Chin. Phys.* **14** 1465
- [19] Bruining H 1954 *Physics and Applications of Secondary Electron Emission* (London: Pergamon) pp42-44
- [20] Cui W Z, Yang J, Zhang N 2013 *Space Electron.* (2) 75 (in Chinese) [崔万照, 杨晶, 张娜 2013 空间电子技术 (2) 75]
- [21] Zhang H B, Hu X C, Wang R, Cao M, Zhang N, Cui W Z 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 066105
- [22] Zhang H B, Hu X C, Cao M, Zhang N, Cui W Z 2014 *Vacuum* **102** 12



# Suppression of secondary electron emission by micro-trapping structure surface\*

Ye Ming<sup>1)</sup> He Yong-Ning<sup>1)†</sup> Wang Rui<sup>2)</sup> Hu Tian-Cun<sup>2)</sup> Zhang Na<sup>2)</sup>  
Yang Jing<sup>2)</sup> Cui Wan-Zhao<sup>2)</sup> Zhang Zhong-Bing<sup>3)</sup>

1) (School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China)

3) (Radiation Detection Research Center, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

( Received 11 January 2014; revised manuscript received 27 March 2014 )

## Abstract

Suppression of secondary electron yield attracted much attention in areas such as accelerator and high power microwave components in recent years. To evaluate the suppression efficiencies of different surface topographies, the secondary electron yields (SEYs) of four kinds of micro-structured surfaces for trapping secondary electrons, i.e., triangular groove, rectangular groove, cuboid, cylindrical, are obtained by the phenomenological probabilistic model of secondary electron emission. The simulation results show that the SEYs of these structures are much dependent on the shape parameters such as aspect ratio or porosity. There are mainly three findings: 1) the SEY decreases with increasing aspect ratio and porosity; 2) the traps with cuboid or cylindrical shape are more efficient than triangular or rectangular traps for the SEY suppression; 3) the SEY dependence of micro-structured surface on incident angle is not as obvious as that of flat surface. Micro-trapping structure surfaces are fabricated by mechanical method, photolithography process and chemical etching respectively. The measured SEYs of these samples validate the theoretical results. All these results show that the proposed micro-structures as secondary electron traps have potential applications in SEY suppression in fields such as multipactor and electron-cloud effects.

**Keywords:** secondary electron yield suppression, micro-trapping structure surface, phenomenological probabilistic model

**PACS:** 79.20.Hx, 73.43.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.63.147901

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11275154).

† Corresponding author. E-mail: [yongning@mail.xjtu.edu.cn](mailto:yongning@mail.xjtu.edu.cn)