

金纳米结构表面二次电子发射特性

王丹 贺永宁 叶鸣 崔万照

Secondary electron emission characteristics of gold nanostructures

Wang Dan He Yong-Ning Ye Ming Cui Wan-Zhao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 087902 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180079

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180079>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[材料二次电子产额对腔体双边二次电子倍增的影响](#)

Influence of secondary electron yield of material on two-sided multipactor discharge in cavity

物理学报.2018, 67(3): 037901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.037901>

[铝阳极氧化的多孔结构抑制二次电子发射的研究](#)

Suppressing second electron yield based on porous anodic alumina

物理学报.2018, 67(3): 037902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.037902>

[腔体双边二次电子倍增一阶与三阶模式瞬态特性对比](#)

Comparison between the 1st and 3rd order mode temporal characteristics of two-sided multipactor discharge in cavity

物理学报.2017, 66(20): 207901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.207901>

[多载波微放电阈值的粒子模拟及分析](#)

Particle simulation and analysis of threshold for multicarrier multipactor

物理学报.2017, 66(15): 157901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.157901>

[基于频域电磁场的微波器件微放电阈值快速粒子模拟](#)

Fast particle-in-cell simulation method of calculating the multipactor thresholds of microwave devices based on their frequency-domain EM field solutions

物理学报.2016, 65(23): 237901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.237901>

## 金纳米结构表面二次电子发射特性\*

王丹<sup>1)</sup> 贺永宁<sup>1)†</sup> 叶鸣<sup>1)</sup> 崔万照<sup>2)</sup>

1)(西安交通大学微电子学院, 西安 710049)

2)(中国空间技术研究院西安分院, 空间微波技术国防科技重点实验室, 西安 710100)

(2018年1月11日收到; 2018年2月2日收到修改稿)

使用低气压蒸发工艺制备了金纳米结构, 研究了金纳米结构的二次电子发射特性及其对表面形貌的依赖规律, 表征了金纳米结构表面出射二次电子能量分布. 实验结果表明: 蒸发气压升高时, 金纳米结构孔隙率增大, 表面电子出射产额降低; 能量分布表明金纳米结构仅对低能真二次电子有明显抑制作用, 对背散射电子的作用效果则依赖于表面形貌. 使用由半球和沟槽构成的复合结构, 并结合二次电子发射唯象概率模型, 对金纳米结构进行模型等效及电子发射特性仿真, 模拟结果表明: 纳米结构中的半球状纳米颗粒对两种电子产额均有增强作用; 沟槽对真二次电子产额有强抑制作用, 而对背散射电子产额仅有微弱抑制作用. 本工作深入研究了金纳米结构表面电子发射机理, 对于开发空间微波系统中纳米级低电子产额表面有重要参考价值.

关键词: 纳米结构, 电子发射, 能量分布, 背散射电子

PACS: 79.20.Hx, 79.60.Jv, 73.43.Cd

DOI: 10.7498/aps.67.20180079

## 1 引言

真空环境中, 粒子束流与材料相互作用而导致材料表面电子出射的现象称为二次电子发射 (secondary electron emission, SEE). 材料表面的 SEE 特性是材料的固有特性, 物理电子领域通常使用总电子发射产额 (total electron emission yield, TEEY) 来衡量材料表面的 SEE 水平, TEEY 的定义为当电子束入射材料表面时, 表面出射电子数量与入射电子数量的比值. 空间大功率微波器件工作在复杂的空间环境中, 其表面受空间粒子束流碰撞影响, 易于发生二次电子倍增, 进而诱发微放电效应, 轻则影响器件性能及寿命, 严重时甚至有可能引起航天器整体失效<sup>[1-3]</sup>. 器件中腔壁表面 TEEY 大于 1 是诱发表面发生二次电子倍增的根本原因之一, 因此减小器件表面的 TEEY 能有效降低该表面发生电子倍增的风险<sup>[4,5]</sup>. 金属材料具有超高电导率, 在空间大功率微波器件中会使用高纯度的金

薄膜作为器件表面镀层材料, 以降低微波器件表面损耗; 此外, 空间微波开关中也会使用金作为表面镀层以获得器件的超快开关响应. 然而平滑金薄膜表面具有较大的二次电子发射系数, 文献<sup>[6, 7]</sup>表明平滑金表面 TEEY 最大值 ( $\sigma_m$ ) 约为 1.8, 较高的 TEEY 使得微波器件的镀金表面在空间环境中易于发生微放电效应, 因此探究金表面低 TEEY 技术对提高镀金空间微波器件的性能及寿命有重大意义.

目前领域内降低材料表面 TEEY 的方法主要有两种: ①低 TEEY 材料表面镀层; ②材料表面粗糙化. 方法①得益于镀层薄膜自身具有较低的 TEEY, 且由于 SEE 现象仅发生在材料表面几至十几个纳米的厚度内, 因此通常几十纳米量级的低 TEEY 薄膜层能在对材料表面只产生很小影响的情况下大幅度降低材料表面 TEEY. 氮化钛 (TiN) 是空间镀膜技术中常用的低 TEEY 薄膜<sup>[8]</sup>, 此外有研究报道石墨烯也可作为良好的低 TEEY 表面涂层<sup>[9]</sup>. 方法②对 TEEY 的抑制利用了构筑材料表

\* 国家自然科学基金 (批准号: U1537211, 61501364) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn

面粗糙结构能够很大程度上增加电子碰撞概率的思想,即经过多次碰撞的电子其能量大大损失,进而降低了电子的逃逸概率.典型的材料表面粗糙化方法包括化学刻蚀<sup>[6,10-12]</sup>、激光刻蚀<sup>[13,14]</sup>等.方法①中的低TEEY表面镀层依赖于材料表面异质膜层生长(如金镀层表面生长TiN),不同材料的接触可能会存在表面改性等问题;方法②主要依赖于材料表面刻蚀技术,即对原始表面进行破坏性刻蚀以达到表面粗糙化的目的,目前关于破坏表面对器件性能影响的研究相对较少.结合上述两种方法的优点,在材料表面进行同质纳米结构生长(例如金表面生长金纳米结构),能够避免表面改性和破坏表面的问题.已有研究表明,金属表面生长同质类炭黑纳米结构能够有效降低其表面的TEEY<sup>[15,16]</sup>.2016年,本课题组使用低气压蒸发工艺在银表面生长同质纳米结构,并印证了该类炭黑银纳米结构能够大幅降低银表面TEEY<sup>[17]</sup>;2017年,本课题组揭示了金属类炭黑纳米结构抑制TEEY的机理,并使用银纳米结构的SEE特性测试结果对该理论进行了论证<sup>[18]</sup>.目前,国际上大多数对于金SEE特性的研究均针对平滑的金薄膜,而对于金纳米结构SEE特性的研究较为缺乏.

本文使用低气压蒸发工艺制备了多种孔隙率的金纳米结构,表征了蒸发气压与纳米结构表面形貌的关系.使用SEE测试平台表征了各金纳米结构的SEE特性,研究了纳米结构孔隙率与其表面电子发射产额的依赖规律;测试了金纳米结构表面出射电子能量分布,分离了TEEY中的真二次电子产额(true secondary electron yield, TSEY)部分和背散射电子产额(back-scattered electron yield, BSEY)部分,发现了纳米结构在抑制TEEY的同时存在增强BSEY的现象.使用几何模型并结合二次电子唯象概率模型对不同孔隙率的金纳米结构SEE特性进行了仿真,仿真结果定性验证了实验中纳米结构对不同种类出射电子的作用机理.

## 2 实验方法

### 2.1 热蒸发制备金纳米结构

实验中选用的衬底为铝合金镀银样片(样品尺寸:20 mm × 10 mm × 1 mm,镀银层厚度10 μm)和单晶硅片(N型重掺杂,晶向<100>,电阻率小于0.01 Ω·cm,厚度300 μm),考虑到直接在镀银衬底上生长金纳米结构黏附性较差,因此首先在铝合

金镀银样品表面镀一层约60 nm的金膜,然后在金膜表面生长金纳米结构,以避免异质生长存在的黏附性差及生长取向问题.实验中选取了4种蒸发气压,分别为40, 50, 60和70 Pa.使用高纯度金粒(99.99%)作为金蒸发源,每次蒸发实验中,金粒质量为0.16 g.蒸发舟为金属钨制成,最高可耐2900 °C高温,远高于金的熔点.加热电流135 A,加热时间5 min,在此温度及时间范围内,能保证所用金源蒸发完毕.在引入干扰气体(氩气)之前,真空室内气压抽至低于 $6 \times 10^{-4}$  Pa.高真空蒸发制备金薄膜时,样品与金源的距离约为350 mm;低气压蒸发制备金纳米结构时,衬底与金源的距离约为55 mm.

### 2.2 表面形貌及SEE特性表征

表征实验中,使用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi S-4800, 日本)对所制备样品的表面形貌及其侧面图像进行了表征;使用超高真空金属二次电子发射研究平台对样品的SEE特性进行了表征.关于该系统的具体参数及相关描述,已在其他文献中有详尽报道<sup>[19,20]</sup>.测试内容为不同入射角度下同一位置同一位置的TEEY,测试使用传统的样品电流法,关于样品电流法的原理及误差分析已在其他文献中有详尽描述<sup>[21]</sup>,该测试过程可简述为如下两步:首先在样品上施加+500 V偏压,这种入射情况下,几乎所有逃逸的二次电子都会被吸引回样品表面,此时测得的电流为该过程中所有电子束流之和 $I_P$ ;然后在样品上施加-20 V偏压,这种入射条件下,所有逃逸的电子均会受到样品表面负偏压的排斥作用而加速远离样品表面,此时测得样品上流过的电流 $I_S$ 即为总的电子束流 $I_P$ 减去逃逸的电子束流.样品表面的TEEY可表示为 $1 - I_S/I_P$ .为表征出射电子的能量分布信息,实验中使用电子能量分析器(DESA150, STAIB Instruments)对出射电子的能量分布进行统计,能量收集时本底真空低于 $10^{-7}$  Pa,选取4个初始电子能量点进行能谱测试,分别为40, 100, 300和1000 eV.

## 3 结果与讨论

### 3.1 金纳米结构的显微分析

图1(a)—图1(e)分别给出了金薄膜以及40, 50, 60和70 Pa蒸发气压下制备得到金纳米结构的

微观形貌, 其中图 1(a)—图 1(c) 中的插图分别为对应样品的截面图像. 样品的显微分析结果表明, 低气压蒸发工艺所制备金纳米结构的表面形貌强烈依赖于蒸发过程中腔室内氩气分压的大小. 对比不同蒸发气压下得到的纳米结构表面形貌可以看出, 随蒸发气压的增加, 表面金颗粒的尺寸逐渐减小, 具体如图 1 所示. 图 1(b) 为 40 Pa 蒸发气压制备的金纳米结构, 其表面堆积的金颗粒尺寸约为 150 nm; 图 1(c) 为 50 Pa 蒸发气压制备的金纳米结

构, 表面金颗粒的尺寸约为 100 nm; 当蒸发气压升至 70 Pa 时, 制备的金纳米结构表面金颗粒尺寸约为 50 nm, 如图 1(e) 所示. 由各纳米结构的表面形貌及截面图像可知, 纳米结构主要由纳米柱以及纳米柱之间的间隙组成, 定义各纳米结构的孔隙率为 SEM 图像中表面间隙所占面积与图像总面积之比. 图 1(f) 给出了各纳米结构表面孔隙率的统计结果, 该结果表明, 随蒸发气压的增加, 样品表面的孔隙率逐渐增加.

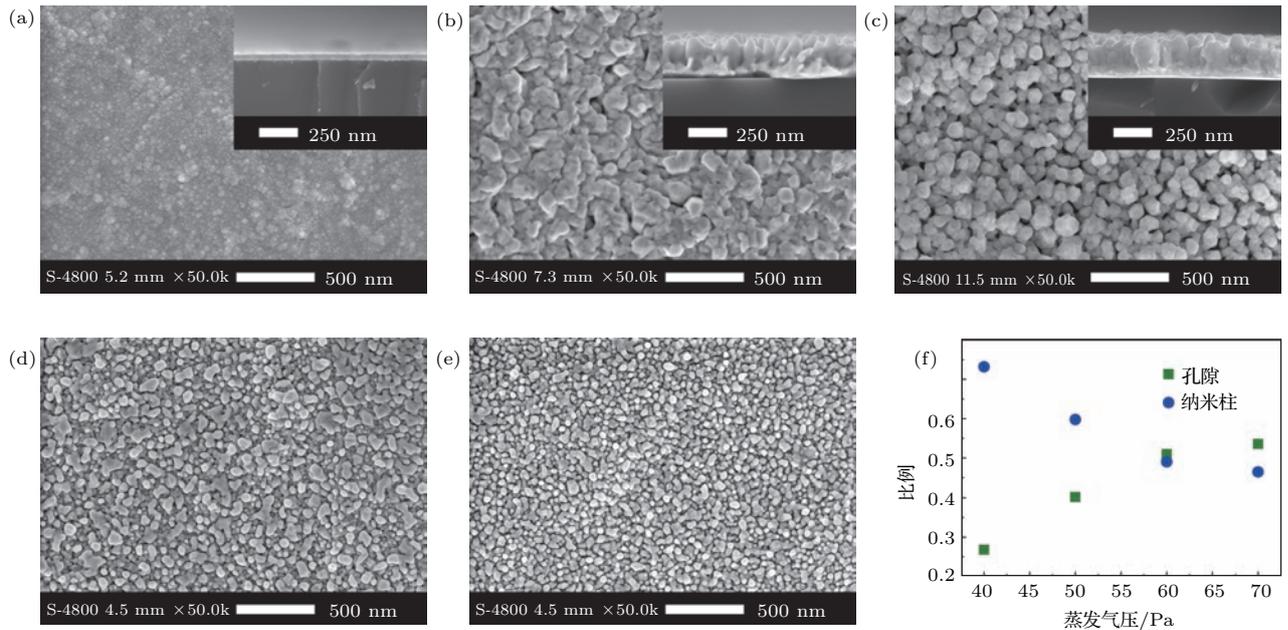


图 1 所制备金薄膜及金纳米结构的微观形貌 (a) 金薄膜; (b) 40 Pa, (c) 50 Pa, (d) 60 Pa, (e) 70 Pa 蒸发气压下制备的金纳米结构, 插图为对应样品的截面图像; (f) 各纳米结构表面孔隙率统计

Fig. 1. SEM images of (a) flat gold thin film and gold nanostructures fabricated by the residual gas pressure of (b) 40 Pa, (c) 50 Pa, (d) 60 Pa, (e) 70 Pa, inserted images are the section morphologies for the corresponding samples; (f) porosities of the gold nanostructures.

关于热蒸发制备金属纳米结构的原理可简述如下: 在高真空 (低于  $6 \times 10^{-4}$  Pa) 情况下, 杂质气体的量极少可忽略不计, 因此受热蒸发并具有一定动能的金原子不会与其他原子碰撞而损失能量, 能运动较远的距离; 此时如果有干扰气体 (本实验中为氩气) 引入真空腔内, 受热蒸发的金原子就会有较大概率与氩原子发生多次碰撞, 引起蒸发原子的能量损失, 能量受损的蒸发原子平均自由程会大大降低, 不能运动到距离蒸发源较远的地方. 这即是低气压蒸发时样品与蒸发源之间的距离 (约 55 mm) 远小于高真空情况下样品与蒸发源之间的距离 (约 350 mm) 的原因. 图 2 给出了金纳米结构的形成过程, 在受干扰气体影响而产生能量损失的

情况下, 蒸发的金原子沿随机的轨迹运动, 最早到达衬底的蒸发原子随机散布在样品表面, 如图 2(a) 所示, 称之为“种子”原子. 后续到达的蒸发原子也沿随机轨迹运动, 在接近样品表面时, 如果该位置未被“种子”原子占据, 那么蒸发原子就会占据该区域而成为“种子”原子; 如果该区域已被“种子”原子所占据, 那么蒸发原子就会附着在“种子”原子上, 后续到达的蒸发原子也遵循这样的运动规律, 进而逐渐形成百纳米级的柱状凸起结构, 如图 2(b) 所示. 蒸发原子一个接一个随机附着在前置原子上, 最终当蒸发源蒸发完后, 在样品表面形成了如图 2(c) 所示的金纳米结构.

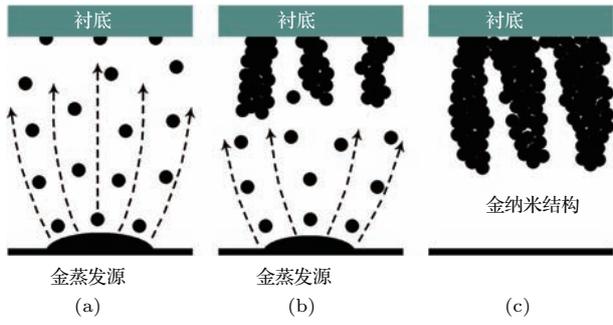


图2 纳米结构的形成过程 (a) 蒸发的金原子与氩原子碰撞后随机附着在衬底表面; (b) 后续到达衬底的金原子沿之前的“种子”原子继续生长; (c) 最终形成金纳米结构  
Fig. 2. Formation process of the gold nanostructure: (a) Evaporated gold atoms impact with the argon atoms and then randomly adhere to the substrate resulting into a stochastic seed distribution; (b) following gold atoms accumulate one by one; (c) the gold nanostructure is formed.

此外, 从SEM图像可以看出, 实验中蒸发气压的变化会导致纳米结构形貌的巨大差异, 对此做如下解释. 如前文中所述, 当真空腔室中引入氩气时, 蒸发原子会有极大的概率与氩原子产生多次碰撞,

且这种碰撞概率随氩气量的增加而增加, 进而引起碰撞原子的平均自由程减小以及动能降低. 即随蒸发气压的增加, 蒸发原子能量降低, 致使能到达衬底的蒸发原子数量变少, 因此从SEM图像中可以看出随蒸发气压的增加, 纳米结构逐渐变得稀疏, 衬底上未被蒸发原子占据的区域变大, 纳米结构的孔隙率增加. 关于随蒸发气压增加, 纳米颗粒尺寸变小的现象可作如下解释: 每一个百纳米尺度的金颗粒都是由许多的蒸发原子堆积而成, 当氩气压升高时, 能到达样品并积聚在一起形成颗粒的蒸发原子数量变少, 因此颗粒尺寸变小.

### 3.2 金纳米结构的二次电子发射特性测试结果及分析

图3展示了所制备金薄膜及金纳米结构样品的SEE特性测试结果. 其中图3(a)为各样品TEEY与初始电子能量的依赖关系; 图3(b)为与图3(a)对应的归一化TEEY曲线; 图3(c)为不同入射角度下各样品 $\sigma_m$ 与样品形貌的依赖关系;

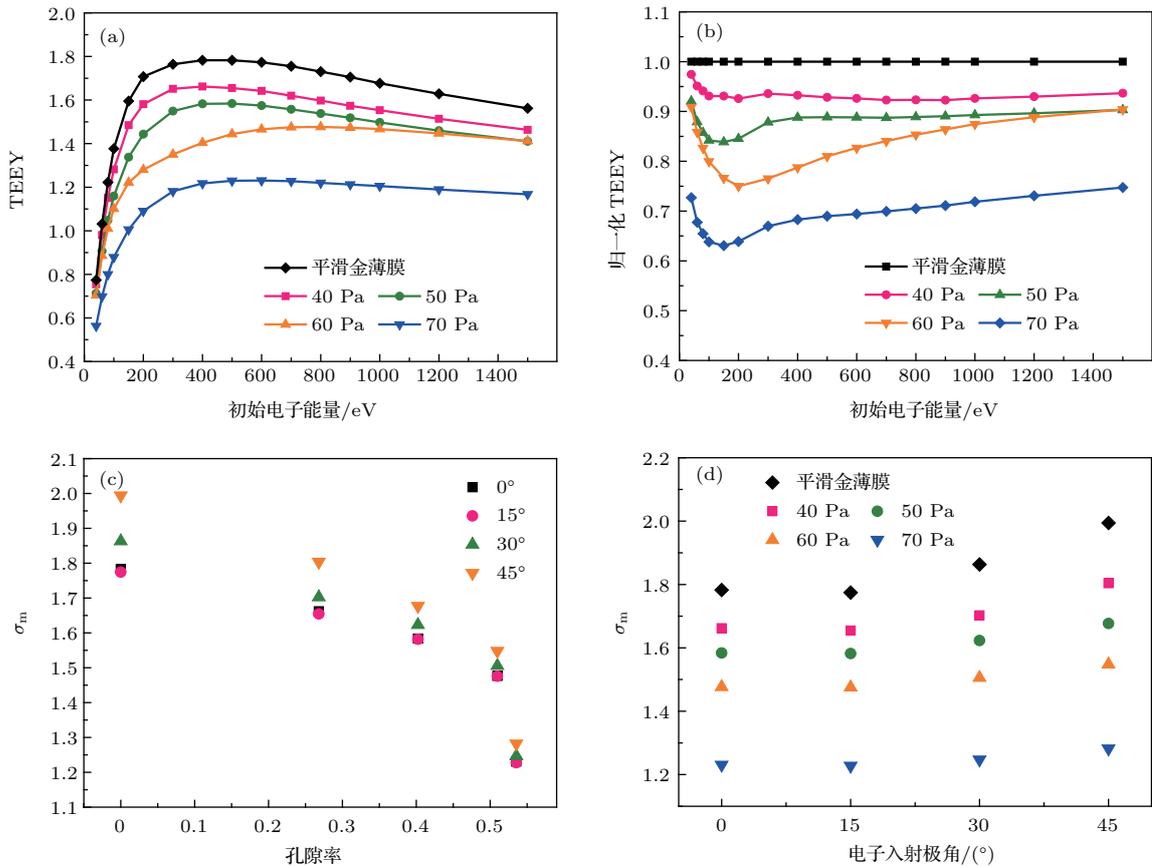


图3 金薄膜及纳米结构的SEE特性 (a) 总电子发射产额; (b) 归一化总电子发射产额; (c)  $\sigma_m$ 与孔隙率的关系; (d)  $\sigma_m$ 与入射极角的关系

Fig. 3. SEE characteristics of the gold film and nanostructures: (a) TEEY; (b) normalized TEEY; (c) dependence of  $\sigma_m$  on porosity; (d) dependence of  $\sigma_m$  on incident polar angle.

图3(d)为各样品 $\sigma_m$ 与初始电子入射角度的依赖关系. 图3(a)表明, 在实验选取的初始电子能量范围内, 相比于平滑的金膜表面, 低气压蒸发制备的金纳米结构对于TEEY均有较为明显的抑制作用. 对比不同气压下制备的金纳米结构形貌及其TEEY可知, 较低气压(如40 Pa)下制备的金纳米结构孔隙较为稀疏, TEEY的抑制程度也较弱, 较高气压(如70 Pa)下制备的金纳米结构孔隙较为致密, TEEY抑制程度也较为明显.

图3(b)的归一化TEEY曲线表明, 随初始电子能量的增加, 纳米结构对于TEEY的抑制程度先急剧增强然后逐渐减弱, 当初始电子能量约为150 eV时, 纳米结构对于TEEY的抑制程度达到最大, 其中70 Pa制备的金纳米结构在150 eV时对TEEY的抑制程度可达36.94%. 图3(c)中 $\sigma_m$ 随样品形貌的变化趋势表明: 随金纳米结构孔隙率的增加,  $\sigma_m$ 逐渐降低, 与各样品TEEY规律一致. 图3(d)中的 $\sigma_m$ 随入射角度的变化关系表明: 当电子的入射角度增加时,  $\sigma_m$ 也随之增大, 且入射角度的改变对平滑金薄膜表面TEEY影响较大, 而对金纳米结构TEEY影响较小, 如表1所列. 对于平滑金薄膜样品, 入射角度从0°增加至45°时, 其表面 $\sigma_m$ 从1.782增至1.994, 增幅达11.90%; 而相同的角度变化情况下, 70 Pa气压所制备金纳米结构的 $\sigma_m$ 仅从1.231增至1.282, 增幅为4.14%. 该结果表明实验所制备金纳米结构表面的电子发射水平对于电子的入射角度并不敏感.

表1 各样品不同入射角度下 $\sigma_m$ 对比

Table1. Comparison of  $\sigma_m$  for different incident polar angles.

蒸发气压/Pa	0	40	50	60	70
$\sigma_m(0^\circ)$	1.782	1.662	1.584	1.476	1.231
$\sigma_m(45^\circ)$	1.994	1.804	1.677	1.548	1.282
$\sigma_m$ 增加量	0.212	0.142	0.093	0.072	0.051
$\sigma_m$ 增加比例/%	11.90	8.54	5.87	4.88	4.14

### 3.3 出射电子能量分布分析

二次电子能量谱(secondary electron energy spectrum, SEES)是材料表面二次电子发射特性中的另一个重要参量, SEES从出射电子能量分布方面反映了材料表面的电子出射情况, 并且可以直接对能量谱进行积分得到出射电子中的TSEY部分

和BSEY部分. 图4为典型的二次电子出射能量谱(平滑金样品, 垂直入射, 初始电子能量为300 eV), 其中横坐标表示出射电子的能量, 纵坐标表示该出射能量下的归一化电子产额. 图4显示该能量分布谱中有两个电子峰, 其中左侧能量较低电子峰为真二次电子峰, 右侧能量较高的电子峰为背散射电子峰. 对于该电子能量谱, 我们关注其中三个参数: 真二次电子峰值、TSEY及BSEY. 其中真二次电子峰值可以直接通过观测曲线得到. 对于后两个参数, 通常情况下认为出射电子能量小于50 eV的电子为真二次电子, 能量大于50 eV的电子为背散射电子<sup>[22]</sup>. 因此, 对能量谱中0—50 eV的部分积分能够得到TSEY(对于40 eV初始电子能量情况, 积分区域切换为0—20 eV), 对能量谱中50 eV到初始电子能量区域进行积分能够得到BSEY(对于40 eV初始电子能量情况, 积分区域切换为20—40 eV).

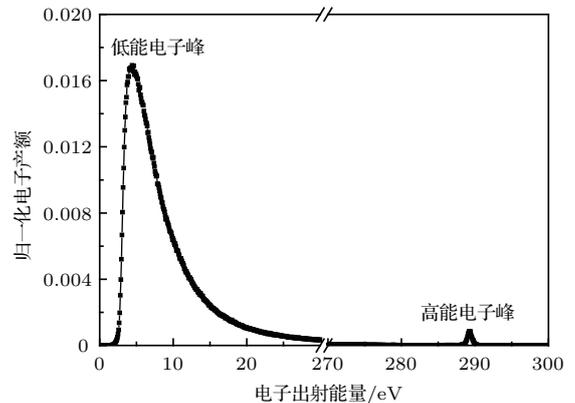


图4 典型的二次电子能量分布(平滑金薄膜, 300 eV初始电子能量, 垂直入射)

Fig. 4. Typical energy distribution of emitted secondary electrons (flat gold film, 300 eV primary electron energy, normal incidence).

为进一步探究纳米结构抑制SEE机理, 通过对各样品电子能量谱进行积分, 计算得到了对应样品表面的TSEY和BSEY, 如图5所示. 图5(a)中的TSEY趋势表明, 在测试能量范围内, 金纳米结构对于真二次电子具有明显的抑制作用, 且不同金纳米结构对TSEY的抑制趋势与该纳米结构对TEEY的抑制趋势类似, 即孔隙率越大的金纳米结构表现出对TSEY更强烈的抑制作用. 图5(b)中的BSEY趋势表明, 孔隙率越大的金纳米结构BSEY越小, 4种纳米结构中仅有70 Pa气压下制备的金纳米结构对于BSEY表现出抑制, 40, 50和60 Pa气压下制备的金纳米结构非但对BSEY无抑制作用, 反而增强了BSEY. 该现象表明金纳米结构

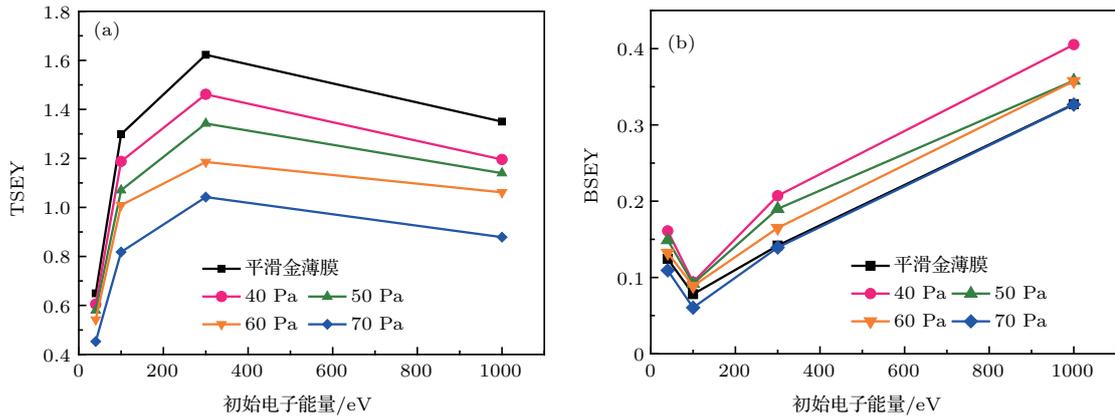


图5 金样品电子产额 (a) TSEY; (b) BSEY

Fig. 5. Electron yield of the gold samples: (a) TSEY (b) BSEY.

对于TEEY的抑制主要源于该纳米结构对低能真二次电子的抑制, 而对于高能的后散射电子, 该纳米结构不一定有抑制作用, 反而存在增强其BSEY的可能性.

### 3.4 金纳米结构的建模与SEE特性仿真

为解释实验中观察到的金纳米结构SEE特性, 我们提出了金纳米结构的等效模型, 并结合MEST SEE唯象概率模型<sup>[23]</sup>和蒙特卡罗模拟方法, 对金纳米结构的SEE特性进行研究. 如图6(a)所示, 使用几何半球结构等效金纳米结构中纳米柱顶端的球形纳米颗粒, 使用如图6(b)所示的复合沟槽结构等效金纳米结构中纳米柱之间的间隙, 半球和复合沟槽结构的特征尺寸在图中标出. 仿真中通过改变两种几何结构所占比例来模拟具有不同孔隙率的纳米结构, 最终通过加权平均算法获得纳米

的纳米结构.

碰撞后产生的电子数量、电子出射角度等信息主要利用MEST SEE唯象概率模型进行计算. 通过3.3节中对平滑金薄膜表面SEE特性的分析, 得到了使用MEST模型仿真金表面SEE时需要的三个参数: 真二次电子产额最大值( $\delta_m$ )为1.53, 取得 $\delta_m$ 时的初始电子能量( $E_m$ )为350 eV、参数 $S$  (与材料相关, 无实际物理意义)为1.35. 在此基础上, 结合蒙特卡罗模拟方法, 仿真半球和沟槽结构表面的电子漫反射过程. 仿真过程可简述如下: 1) 使用已知参数 $\delta_m$ ,  $E_m$ ,  $S$ 拟合实测的平滑金表面SEE曲线; 2) 结合MEST模型和电子轨迹追踪模块预估金半球和金沟槽结构的SEE特性; 3) 改变两种仿真结构在整体纳米结构模型中的比例, 以模拟不同孔隙率的纳米结构, 最终通过加权平均算法获得纳米

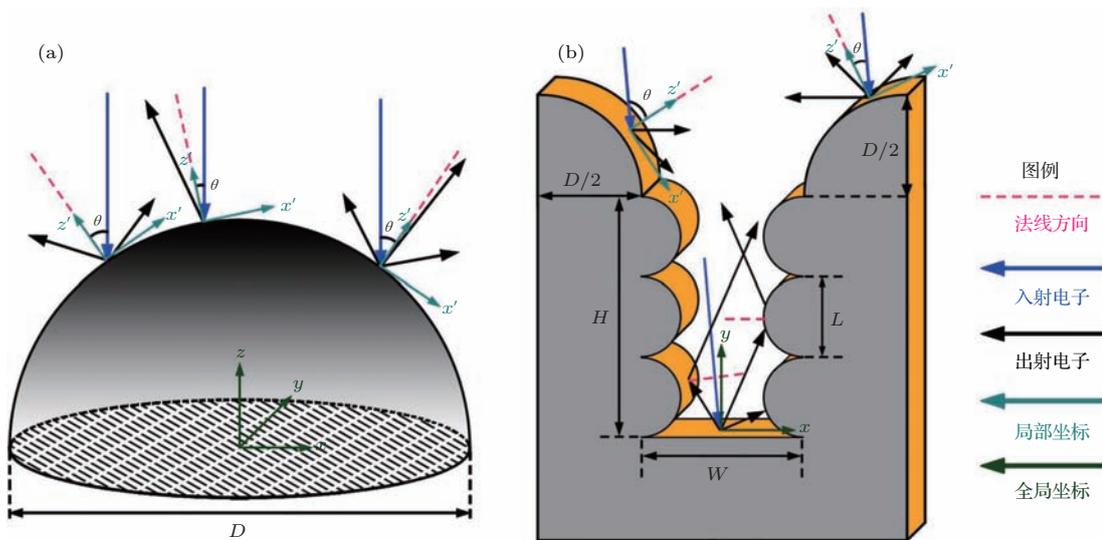


图6 仿真模型示意图 (a) 半球结构; (b) 复合沟槽结构

Fig. 6. Sketch map of the simulation models: (a) Hemisphere structure; (b) composite groove structure.

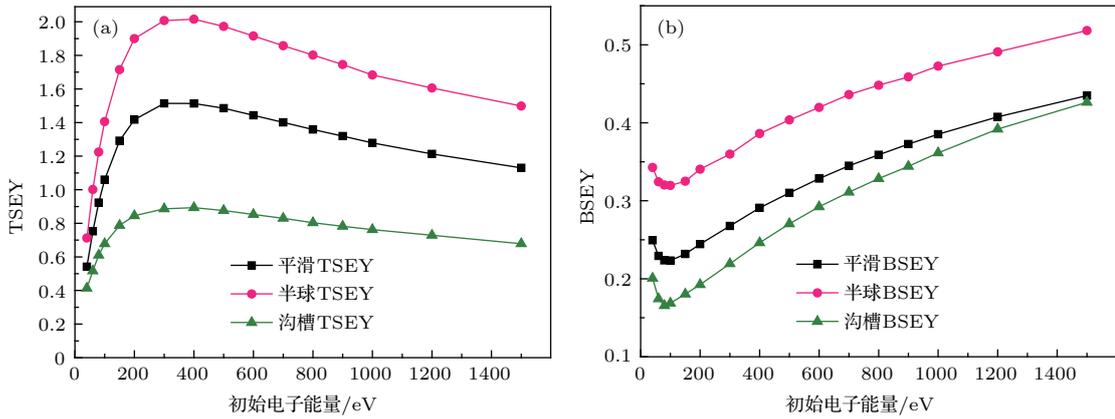


图7 半球及沟槽结构电子产额仿真结果 (a) TSEY; (b) BSEY

Fig. 7. Simulated electron yield of hemisphere and groove structure: (a) TSEY; (b) BSEY.

结构模型的SEE特性. 仿真过程基于如下两个假设: 1) 入射电子数量设置为  $5 \times 10^5$  且电子入射位置均匀分布在半球及沟槽结构表面; 2) 半球表面的电子均为垂直水平面入射, 沟槽结构表面电子入射极角均设置为  $5^\circ$  (从图1的SEM图像中可知金纳米柱略有倾斜, 故在此将入射极角设置为  $5^\circ$ ).

图7为仿真得到的金薄膜、单个半球及复合沟槽结构的SEE特性, 图7(a)和图7(b)分别为三种样品的TSEY和BSEY. 仿真结果表明金半球结构表现出比平滑金薄膜更高的TSEY和BSEY, 该现象表明纳米柱顶端的半球状纳米颗粒对两种电子产额均有增强作用. 对该现象做如下解释: 当电子垂直水平面入射时, 相比于平滑的金薄膜表面, 半球结构表面增大了入射电子的入射极角(图6(a)中 $\theta$ ), 而根据对图3(c)的分析以及文献[11]的报道可知, 相同初始电子能量下, 电子入射极角的增大会引起电子产额的增加, 因此该入射情况下, 半球表面的两种电子产额均高于平滑表面. 对于复合沟槽结构, 根据金纳米结构的微观形貌, 设置其特征尺寸如下:  $H : W : L = 3 : 2 : 1$  ( $H, W, L$ 的定义见图6(b)). 仿真结果表明复合沟槽结构对于两种电子产额均有所抑制, 但抑制程度不同, 图7(a)表明沟槽结构对TSEY有较为明显的抑制作用, 尤其是在中高初始电子能量区域(200—1500 eV); 图7(b)则表明沟槽结构对BSEY的抑制作用较弱, 且在实验测试的能量范围内, 随初始电子能量增加, 沟槽结构对BSEY的抑制作用在逐渐减弱, 当初始电子能量接近1500 eV时, 沟槽结构的BSEY很接近平滑表面的BSEY, 表明在该能量附近, 沟槽结构对于BSEY几乎不再抑制.

以上讨论仅基于单个几何结构, 而实际的纳米结构则是由多种几何体组合而成, 为定性探究

金纳米结构整体的SEE特性, 我们适当地简化了仿真模型, 并使用图6中半球、复合沟槽这两种几何体的周期性组合来等效图1中的金纳米结构, 且通过调节仿真模型中半球和复合沟槽的比例来模拟不同纳米结构孔隙率的差异, 在此用仿真模型中复合沟槽所占的比例来类比纳米结构的孔隙率, 具体仿真计算过程与文献[18]中报道的等效银纳米结构SEE计算方法类似. 各纳米结构模型SEE特性仿真结果如图8所示, 仿真中纳米结构孔隙率分别设置为0.9, 0.7, 0.6, 0.4 (即沟槽所占比例为90%, 70%, 60%, 40%). 图8(a)—图8(d)分别为5种仿真模型的TSEY, BSEY, TEEY以及归一化TEEY. 仿真结果表明当孔隙率为0.9时, 纳米结构对TSEY和BSEY均表现出抑制特性, 说明大孔隙率的纳米结构能够有效抑制两类电子出射. 但对比图8(a)—图8(c)可以看出纳米结构对于TEEY的强烈抑制作用得益于其对TSEY的强烈抑制, 而纳米结构对于BSEY的抑制作用很弱, 尤其是在高初始电子能量区域(1500 eV). 当孔隙率为0.7时, 纳米结构对TSEY表现出抑制, 而对BSEY仅在40—500 eV时表现出很弱的抑制, 在600—1500 eV初始电子能量区域则对BSEY表现出增强作用, 且增强的幅度随初始电子能量的增加而上升. 当孔隙率为0.6时, 在全初始电子能量范围内(40—1500 eV), 纳米结构对BSEY均为增强作用, 而对TSEY和TEEY均为抑制作用, 印证了3.3节中40, 50和60 Pa气压下所制备金纳米结构在抑制TEEY的同时存在增强BSEY的可能性. 当孔隙率为0.4时, 金纳米结构对TSEY和BSEY均表现出增强作用, 说明当纳米结构中顶部半球状颗粒所占比例较大时, 该结构存在增强两种电子产额的可能性.

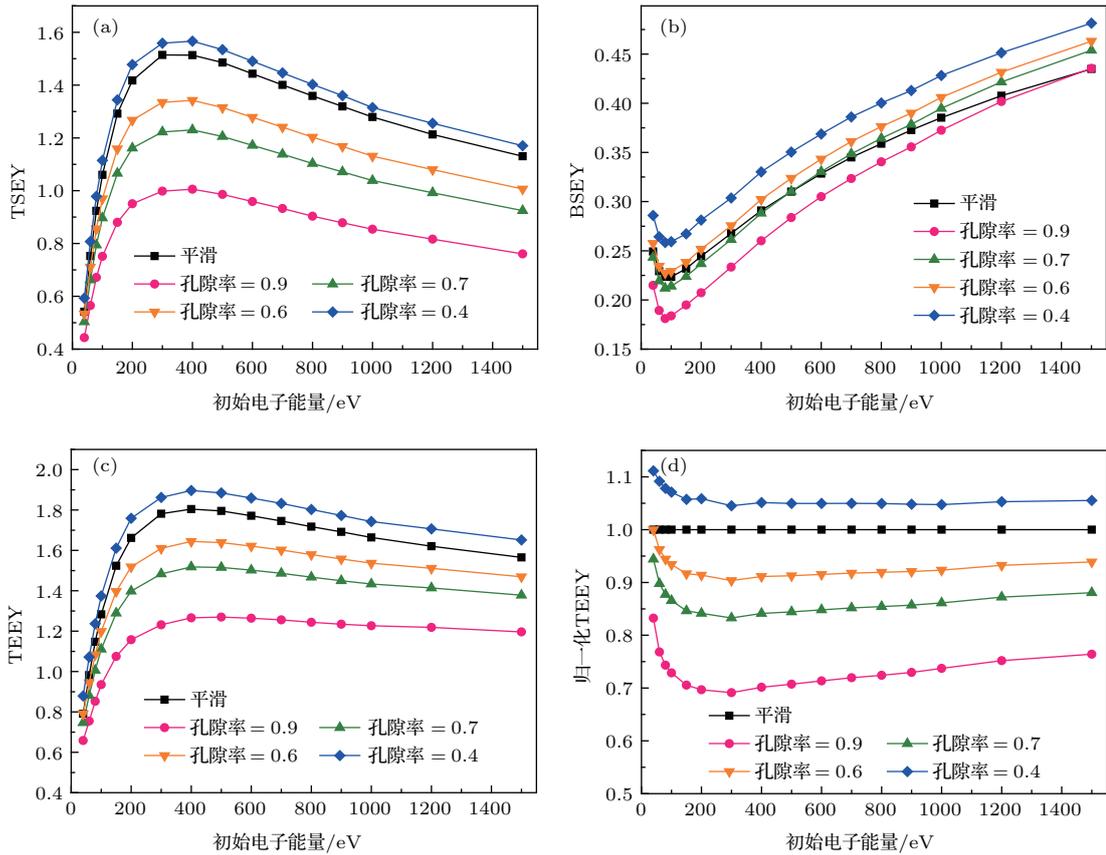


图8 不同孔隙率纳米结构电子产额仿真结果 (a) TSEY; (b) BSEY; (c) TEEY; (d) 归一化 TEEY

Fig. 8. Simulated electron yield of the nanostructures: (a) TSEY; (b) BSEY; (c) TEEY; (d) normalized TEEY.

## 4 结 论

使用低气压蒸发工艺制备了多种金纳米结构,研究了纳米结构孔隙率对金表面二次电子发射特性的影响规律,并使用MEST二次电子发射唯象概率模型对实验结果进行了仿真验证.实验结果表明:1)低气压蒸发工艺中腔室气压对样品表面形貌有很大影响,即蒸发气压增加时,金纳米结构孔隙率增加,单个纳米柱尺寸减小;2)具有较大孔隙率的金纳米结构对二次电子表现出更强烈的抑制作用;3)金纳米结构对于总电子产额的抑制源于其对出射电子中真二次电子的强烈抑制;4)金纳米结构对背散射电子的作用因样品形貌而有所不同,70 Pa气压下制备的金纳米结构能够抑制背散射电子出射,而40, 50和60 Pa气压下制备的金纳米结构则对背散射电子表现出增强作用.仿真结果表明:金纳米结构中顶端的半球状纳米颗粒对电子产额有增强作用,纳米结构中的间隙结构则对电子产额有抑制作用,金纳米结构表现出的二次电子发射特性为半球和间隙结构共同作用的结果.

## 参考文献

- [1] Kishek R A, Lau Y Y 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3198
- [2] Semenov V E, Rasch J, Rakova E, Johansson J F 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 721
- [3] Wang D, He Y N, Li Y 2017 *Chin. Space Sci. Technol.* **37** 1 (in Chinese) [王丹, 贺永宁, 李韵 2017 中国空间科学技术 **37** 1]
- [4] Vaughan J R M 1988 *IEEE Trans. Electron Devices* **35** 1172
- [5] Hueso J, Vicente C, Gimeno B, Boria V E, Marini S, Taroncher M 2010 *IEEE Trans. Electron Devices* **57** 3508
- [6] Nistor V, González L A, Aguilera L, Montero I, Galán L, Wochner U, Raboso D 2014 *Appl. Surf. Sci.* **315** 445
- [7] Yang J, Cui W Z, Li Y, Xie G B, Zhang N, Wang R, Hu T C, Zhang H T 2016 *Appl. Surf. Sci.* **382** 88
- [8] Ruiz A, Román E, Lozano P, García M, Galán L, Montero I, Raboso D 2007 *Vacuum* **81** 1493
- [9] Luo J, Tian P, Pan C T, Roberson A W, Warner J H, Hill E W, Briggs G A D 2011 *ACS Nano* **5** 1047
- [10] Ye M, He Y N, Hu S G, Wang R, Hu T C, Yang J, Cui W Z 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 074904
- [11] 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
- [12] Ye M, He Y N, Wang R, Hu T C, Zhang N, Yang J, Cui W Z, Zhang Z B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 147901 (in Chinese)

- Chinese) [叶鸣, 贺永宁, 王瑞, 胡天存, 张娜, 杨晶, 崔万照, 张忠兵 2014 物理学报 **63** 147901]
- [13] Valizadeh R, Malyshev O B, Wang S H, Zolotovskaya S A, Gillespie W A, Abdolvand A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 231605
- [14] Watts C, Gilmore M 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 836
- [15] Bruining H 1954 *Physics and Applications of Secondary Electron Emission* (London: Pergamon Press) p142
- [16] Thomas S, Pattinson E B 1970 *J. Phys. D* **3** 1469
- [17] He Y N, Peng W B, Cui W Z, Ye M, Zhao X L, Wang D, Hu T C, Wang R, Li Y 2016 *AIP Adv.* **6** 025122
- [18] Wang D, He Y N, Ye M, Peng W B, Cui W Z 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 153302
- [19] Ye M, Wang D, Li Y, He Y N, Cui W Z, Daneshmand M 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 074902
- [20] Cui W Z, Yang J, Zhang N 2013 *Space Electron Technol.* **10** 75 (in Chinese) [崔万照, 杨晶, 张娜 2013 空间电子技术 **10** 75]
- [21] Zhang N, Cao M, Cui W Z, Zhang H B 2014 *Chinese J. Vac. Sci. Technol.* **34** 554 (in Chinese) [张娜, 曹猛, 崔万照, 张海波 2014 真空科学与技术学报 **34** 554]
- [22] Seiler H 1983 *J. Appl. Phys.* **54** R1
- [23] Lara J D, Pérez F, Alfonseca M, Galán L, Montero I, Román E, Raboso D, Baquero G 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 476

# Secondary electron emission characteristics of gold nanostructures\*

Wang Dan<sup>1)</sup> He Yong-Ning<sup>1)†</sup> Ye Ming<sup>1)</sup> Cui Wan-Zhao<sup>2)</sup>

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

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

( Received 11 January 2018; revised manuscript received 2 February 2018 )

## Abstract

Secondary electron emission (SEE), which is a frequent phenomenon in space high power microwave systems, is one of the basic inducement of multipactor in space microwave components. It is already verified that lowering SEE is an effective method to mitigate the undesirable effect. Metal black nanostructures have ever been reported to suppress SEE remarkably, however, the SEE characteristics of the gold nanostructures are rarely investigated. In this work, we use the thermal evaporation to fabricate the gold nanostructures under various evaporation gas pressures, and further analyze their SEE characteristics as well as energy distribution information. Experimental results reveal that the evaporation gas pressure determines the morphology of gold nanostructure, and the morphology dominates the SEE level of the gold nanostructure. To be specific, as the evaporation gas pressure rises, the porosity of the nanostructure increases and the SEE yield decreases. The energy distribution information indicates that the gold nanostructure just suppresses the true secondary electrons (TSEs) effectively. However, the effect of the nanostructure on the back scattered electrons (BSEs) is heavily dependent on the surface morphology. Specifically, the nanostructure fabricated at 70 Pa suppresses the BSEs weakly while the nanostructures fabricated at 40–60 Pa enhance the BSEs to some degree. To theoretically explain the experimental phenomena, we establish an equivalent model, which is made up of the periodical combination of a hemisphere and a composite groove, to imitate the fabricated gold nanostructure and simulate its SEE characteristics based on the SEE phenomenological probability model. Simulation results indicate that the hemisphere induces more TSEs and BSEs while the composite groove suppresses them, besides, the groove suppresses the TSEs much more remarkably than the BSEs. The SEE level of the nanostructure model is determined by the weighted average effect of both the hemisphere and the groove. The simulations qualitatively explain the experimental phenomena. This work in depth reveals the SEE mechanism for the gold nanostructures, and is of considerable significance for developing the low SEE surface on a nanometer scale in a space high power microwave-system.

**Keywords:** nanostructure, electron emission, energy distribution, back scattered electron

**PACS:** 79.20.Hx, 79.60.Jv, 73.43.Cd

**DOI:** [10.7498/aps.67.20180079](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180079)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1537211, 61501364).

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