

## 激光刻蚀对镀金表面二次电子发射的有效抑制

王丹 叶鸣 冯鹏 贺永宁 崔万照

An effective reduction on secondary electron emission yield of gold coated surfaces by laser etching

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 067901 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181547

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181547>

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

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 金纳米结构表面二次电子发射特性

Secondary electron emission characteristics of gold nanostructures

物理学报. 2018, 75(8): 087902 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180079>

##### 微米量级表面结构形貌特性对二次电子发射抑制的优化

Optimization of surface morphology with micro meter size for suppressing secondary electron emission

物理学报. 2018, 75(17): 177901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180466>

##### 磁控溅射铂抑制镀银表面的二次电子发射

Suppressing secondary electron emission from silver-plated surface by magnetron sputtered platinum

物理学报. 2018, 75(8): 087901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172740>

##### 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, 75(3): 037902 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172243>

##### 电子入射角度对聚酰亚胺二次电子发射系数的影响

Effects of electron incident angle on the secondary electron yield for polyimide

物理学报. 2015, 72(15): 157901 <https://doi.org/10.7498/aps.64.157901>

## 激光刻蚀对镀金表面二次电子发射的有效抑制\*

王丹<sup>1)</sup> 叶鸣<sup>1)</sup> 冯鹏<sup>1)</sup> 贺永宁<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, 空间微波技术重点实验室, 西安 710100)

(2018年8月16日收到; 2019年1月10日收到修改稿)

使用红外激光刻蚀技术在镀金铝合金表面制备了多种形貌的微孔及交错沟槽阵列. 表征了两类激光刻蚀微阵列结构的三维形貌和二维精细形貌, 分析了样品表面非理想二级粗糙结构的形成机制. 研究了微阵列结构二次电子发射特性对表面形貌的依赖规律. 实验结果表明: 激光刻蚀得到的微阵列结构能够有效抑制镀金表面二次电子产额 (secondary electron yield, SEY), 且抑制能力明显优于诸多其他表面处理技术; 微阵列结构对 SEY 的抑制能力与其孔隙率及深宽比呈现正相关, 且孔隙率对 SEY 的影响更为显著. 使用蒙特卡罗模拟方法并结合二次电子发射唯象模型和电子轨迹追踪算法, 仿真了各微结构表面二次电子发射特性, 模拟结果从理论上验证了微阵列结构孔隙率及深宽比对表面 SEY 的影响规律. 本文获得了能够剧烈降低镀金表面 SEY 的微阵列结构, 理论分析了 SEY 对微结构特征参数的依赖规律, 对开发空间微波系统中低 SEY 表面及提高镀金微波器件性能有重要意义.

关键词: 激光刻蚀, 微结构, 二次电子发射, 二级粗糙结构

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

DOI: 10.7498/aps.68.20181547

## 1 引言

工作在空间环境中的大功率微波部件受到空间粒子束流的影响, 其表面易于发生电子倍增现象, 诱发微放电效应, 进而引起微波部件的性能劣化, 严重时可能引起部件甚至航天器整体失效<sup>[1]</sup>. 空间微波部件表面二次电子产额 (secondary electron yield, SEY, 即电子碰撞材料表面时出射电子数量与入射电子束量之比) 大于 1 是诱发微放电效应的根本原因之一<sup>[2]</sup>. 已有诸多研究<sup>[2,3]</sup>表明抑制空间材料表面的 SEY 能够有效降低微波部件表面发生微放电的风险. 镀银铝合金是空间大功率微波部件中常用的基体材料, 例如空间环行器、滤波器、微波开关等. 航天工程中为提高空间精密微波部件的灵敏度, 通常会在铝合金基体表面镀金,

以获得部件的超快响应性能, 同时镀金层能够降低部件表面损耗且防止表面氧化. 然而平滑镀金表面的 SEY 最大值 (记为  $\sigma_{\max}$ ) 通常在 1.8 附近<sup>[4,5]</sup>, 较大的 SEY 使得镀金层暴露在空间环境中时, 其表面易于发生电子倍增, 从而引起部件损伤或性能退化. 因此探究镀金金属表面低 SEY 技术对提高高精度空间微波部件的性能及寿命有重要意义.

自科学家们发现二次电子发射 (secondary electron emission, SEE) 是诱发空间中不良效应的根本原因之一起, 许多研究者开始探索能够应用于空间科学中以提高空间微波部件可靠性的低 SEY 工程表面. 由于 SEY 对于材料的本征特性 (物理密度、功函数等)、表面形貌、表面状态 (沾污、氧化等) 均较为敏感<sup>[6-8]</sup>, 因此现有的 SEY 抑制技术均是通过改变以上参量从而达到改善 SEY 的目的. 目前领域内较为成熟的低 SEY 技术大

\* 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

体可分为以下五类: 1) 表面粗糙化 (物理、化学刻蚀 [4,9–11]); 2) 表面涂覆低 SEY 薄膜 (TiN [12–14]、非蒸散型吸气剂 (non-evaporable getter, NEG) [15,16]、无定形碳 [17] 等); 3) 表面生长与基体材料同质的纳米结构 [18,19]; 4) 使用低 SEY 材料作为基体; 5) 以上四类方法的多种结合 [11,20]. 以上低 SEY 表面的实现大多依赖较为昂贵的设备 (如原子层沉积、磁控溅射、真空蒸发等) 或较为苛刻的环境 (如高真空、超净). 相比于其他的低 SEY 表面工程, 使用激光刻蚀技术在材料表面制备微纳结构是较为容易实现的表面处理方法, 且激光刻蚀具有以下优点: 1) 环境要求度低, 无需超净或真空环境等; 2) 设备简易、操作简单、灵活度高且表面处理效率高; 3) 表面处理仅通过光束辐照表面完成, 无其他接触, 因此在做适当保护的情况下表面不易产生沾污; 4) 所制备微结构稳定, 不易被破坏. 目前已有文献 [11, 21] 表明, 使用激光刻蚀在铜、铝及不锈钢表面形成的微纳结构能够有效抑制相应金属表面的 SEY, 而关于使用激光刻蚀技术在镀金金属表面制备微结构抑制 SEY 的研究还相对较少.

实验中使用红外激光扫描刻蚀技术在铝合金样品表面制备了多种不同特征尺寸的微米阵列结构, 使用磁控溅射在所制备微阵列结构样品表面镀约 250 nm 厚的金层; 使用显微技术表征了样品的二维及三维精细形貌, 探究了微阵列特征尺寸与激光刻蚀参数之间的关系; 使用 SEE 测试平台表征了各微阵列结构的 SEE 特性, 验证了微米阵列结构对镀金表面 SEY 的显著抑制作用, 同时研究了微阵列结构表面 SEY 对结构深宽比及孔隙率的依赖规律; 比较了激光刻蚀样品与其他工艺所制备样品对 SEY 的抑制程度, 证明了激光刻蚀微结构对 SEY 的显著抑制效果. 在获得平滑镀金表面 SEY 测试数据的基础上, 使用蒙特卡罗模拟方法,

并结合金属 SEE 唯象概率模型和电子运动轨迹追踪算法, 对各微阵列表面电子出射情况进行了仿真, 理论上验证了表面孔隙率及结构深宽比对 SEY 的影响规律, 揭示了激光刻蚀微阵列结构有效抑制镀金表面 SEY 的机理. 对比分析了微阵列结构实测 SEY 与仿真结果之间的差异, 给出了二级粗糙结构对实测 SEY 的影响规律.

## 2 实验方法

### 2.1 激光刻蚀制备微阵列结构

实验中使用波长为 1064 nm 的脉冲式红外光纤激光器 (GSS-Fiber-20, 西安高斯激光) 对铝合金样品表面进行扫描刻蚀. 激光器最大刻蚀功率为 20 W, 最小束斑直径约为 10  $\mu\text{m}$ , 最大可加工区域面积为 110 mm  $\times$  110 mm, 激光焦距约为 150 mm, 刻蚀过程中工作环境为大气环境. 实验选用的刻蚀样品为铝合金样品 (样品尺寸: 20 mm  $\times$  10 mm, 厚度为 1 mm). 实验中通过改变每个刻蚀单元内刻蚀面的形状及尺寸以达到控制样品表面刻蚀区域的目的, 通过改变激光功率大小及扫描刻蚀次数控制刻蚀区域的深度. 如图 1(a) 和图 1(c) 所示分别为两种刻蚀图形样式: 圆孔微阵列和正交沟槽微阵列, 图 1(b) 和图 1(d) 分别给出了两种微阵列中单个刻蚀单元的图样和尺寸标注. 实验中通过控制单点加工次数和激光功率, 制备了 4 组如图 1(a) 所示的圆形孔洞阵列 (#1—#4 样品); 通过控制刻蚀区域的特征尺寸, 制备了 3 组如图 1(c) 所示的正交沟槽阵列 (#5—#7 样品). 7 组样品详细加工参数及各刻蚀图形尺寸在表 1 中列出. 表 1 中理论孔隙率 (记为  $A$ ) 定义如下: 单元面积内, 刻蚀区域投影面积与单元投影总面积之比, 对于圆柱微孔阵列, 其理论孔隙率可由 (1) 式计算得到:

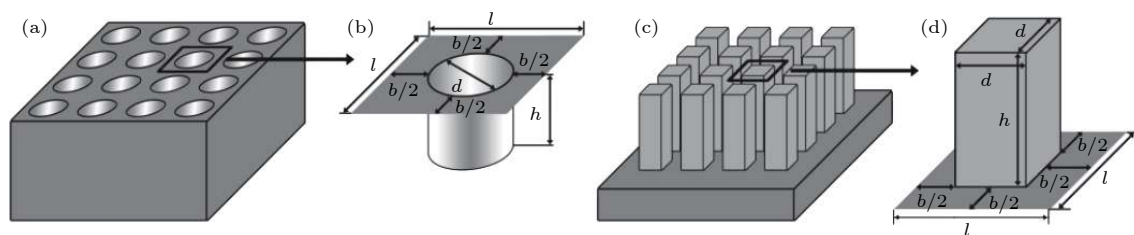


图 1 刻蚀图样 (a) 微孔阵列; (b) 微孔阵列刻蚀单元; (c) 正交沟槽阵列; (d) 正交沟槽阵列刻蚀单元

Fig. 1. Etching patterns: (a) Micro hole array; (b) etching unit of the micro hole array; (c) orthogonal groove array; (d) etching unit of the orthogonal groove array.

表 1 各样品刻蚀单元内图形尺寸及激光刻蚀参数  
Table 1. Sizes of the etching patterns and the detailed etching parameters.

	样品编号						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
激光功率/W	16	12	10	6	12	12	12
$d/\mu\text{m}$	150	150	150	150	150	100	50
$b/\mu\text{m}$	50	50	50	50	50	100	150
$l/\mu\text{m}$	200	200	200	200	200	200	200
扫描次数	400	100	25	5	250	250	250
理论孔隙率 $A/\%$	44.18	44.18	44.18	44.18	43.75	75.00	93.75

$$A = \frac{\pi d^2}{4l^2}. \quad (1)$$

对于正交沟槽阵列, 其理论孔隙率可由 (2) 式计算:

$$A = 1 - \frac{d^2}{l^2}. \quad (2)$$

为了达到测试镀金层表面 SEY 的目的并规避刻蚀后产生的表面改性 (如沾污及高温氧化等), 刻蚀完成后使用磁控溅射技术在各样品表面镀约 250 nm 厚的金镀层以尽量弱化表面改性带来的影响. 同时, 已有研究表明: 入射电子侵入材料内部的深度与电子的着地能量以及材料本征物理特性相关<sup>[6]</sup>, 几千电子伏能量的入射电子侵入材料表面的深度最多为十几纳米<sup>[6,7]</sup>, 因此本实验中厚度为 250 nm 的金镀层远大于电子的侵入深度. 此外, 由于所刻蚀的微结构其尺寸在百微米量级, 特征尺寸远大于金镀层厚度, 因此 250 nm 厚的金镀层对于微结构的形貌几乎不会有影响.

## 2.2 表面形貌及 SEE 特性表征

表征实验中, 使用激光扫描显微镜 (laser scanning microscopy, LSM, Keyence-VK9700) 对激光刻蚀前后样品的三维形貌进行了表征; 使用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM, Hitachi S-4800) 对刻蚀前后样品的二维精细形貌进行了表征. 此外, 实验中使用能量色散 X 射线谱 (energy dispersive X-Ray spectroscopy, EDX, Hitachi S-4800 附件) 分别对不同状态下样品的表面元素组分进行了分析. 样品 SEE 特性测试使用超高真空金属 SEE 研究平台完成, 关于该系统的具体参数及相关描述已在文献<sup>[22]</sup>中做了详尽报道. 样品的 SEY 测试使用传统的样品电流法, 关于样品电流法的详细原理及误差分析可见文献<sup>[23]</sup>, 该测试过程可简述为如下两步: 首先在样品上施加

+ 500 V 的偏压, 在此种入射情况下, 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 的偏压, 此种入射条件下, 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. 在得到  $I_p$  和  $I_s$  的情况下, 样品表面的 SEY 可由 (3) 式计算得到:

$$SEY = 1 - \frac{I_s}{I_p}. \quad (3)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 微阵列结构显微分析

图 2(a)—(d) 为使用 LSM 观测得到的激光刻蚀圆孔阵列 #1—#4 样品的三维形貌, 图 2(e)—(g) 为所刻蚀正交沟槽阵列 #5—#7 样品的三维形貌, 图 2(h) 给出了未经激光刻蚀处理的平滑镀金表面的三维形貌作为对照. 图 3(a)—(d) 给出了图 2 中部分样品的二维形貌, 插图为对应样品局部区域的精细形貌表征结果. 表征实验中, 通过 LSM 给出的样品三维形貌, 提取了 7 种微阵列结构的特征尺寸 (微孔阵列特征尺寸为表面孔径和孔深, 交错沟槽阵列特征尺寸为槽宽和槽深). 表 2 列出了 7 种微结构的深宽比 (记为  $H$ ), 此处将两类样品的深宽比定义为: 微孔 (或沟槽) 平均深度与微孔孔径 (或沟槽槽宽) 之比. 对于圆柱微孔阵列, 其尺寸标注如图 1(b) 所示, 微孔深宽比由 (4) 式计算得到:

$$H = \frac{d}{h}. \quad (4)$$

对于正交沟槽阵列, 其尺寸标注如图 1(d) 所示, 其深宽比由 (5) 式计算:

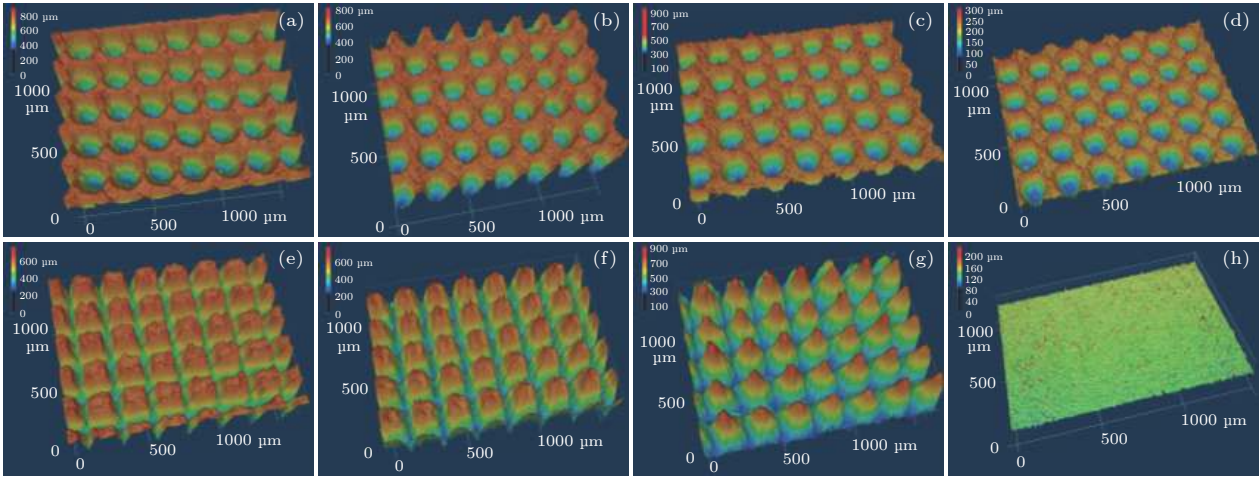


图 2 各镀金铝合金样品的三维形貌 (a) #1 样品; (b) #2 样品; (c) #3 样品; (d) #4 样品; (e) #5 样品; (f) #6 样品; (g) #7 样品; (h) 未经激光刻蚀处理的平滑镀金表面

Fig. 2. Three-dimensional morphologies of various gold coated samples: (a) Sample #1; (b) sample #2; (c) sample #3; (d) sample #4; (e) sample #5; (f) sample #6; (g) sample #7; (h) untreated flat gold coated surface.

$$H = \frac{b}{h}. \quad (5)$$

对比表 1 中各样品的刻蚀参数及表 2 中的特征尺寸可知: 对于微孔阵列, 当激光刻蚀次数增加时, 孔的深度显著增加, 但受激光聚焦位置所限, 随着刻蚀次数的成倍增加, 所刻蚀微孔深度的增幅逐渐变小, 说明刻蚀面在稍微偏离激光聚焦位置百微米时, 激光的刻蚀效率会大大降低. 此外表 2 数据表明: 实际刻蚀的微孔孔径及沟槽宽均略大于表 1 中的设计尺寸, 这使得实际得到的刻蚀样品表

面孔隙率均大于理论设计, 该现象的产生主要受限于激光的刻蚀精度 (约为 10 μm) 和刻蚀过程中的横向扩散效应.

此外, 观察图 2 和图 3 中的样品形貌可以看出, 两类微结构阵列除了表面有意刻蚀得到的微孔或沟槽这类一级粗糙结构外, 微孔和沟槽的边缘及内壁还存在一定的二级粗糙结构, 例如图 3(a) 和图 3(b) 中的孔洞边缘堆积着一些十几微米的金属颗粒, 图 3(c) 中沟槽阵列顶部未经处理的区域也有一些微米颗粒堆积. 这类二级粗糙结构并非理论

表 2 各激光扫描刻蚀样品的特征尺寸、深宽比及孔隙率统计

Table 2. Characteristic sizes, aspect ratio and porosity of the laser etched samples.

	样品编号						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
$d/\mu\text{m}$	165	164	158	155	121	83	34
$h/\mu\text{m}$	437	324	253	181	306	373	416
深宽比 $H$	2.65	1.98	1.60	1.17	3.87	3.19	2.51
孔隙率 $A/\%$	53.46	52.81	49.01	47.17	63.40	82.78	97.11

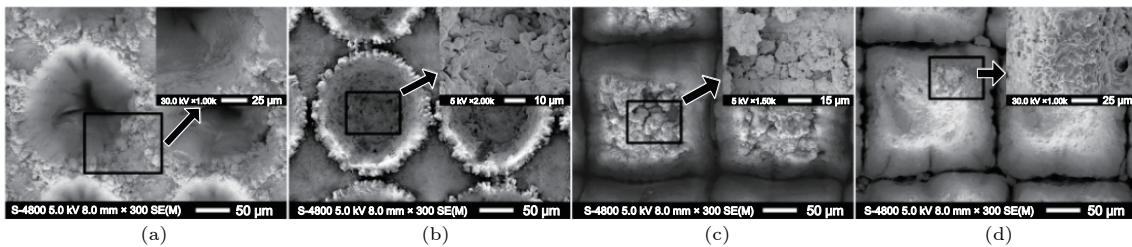


图 3 SEM 下各激光刻蚀样品的二维精细形貌 (a) #1 样品; (b) #4 样品; (c) #5 样品; (d) #7 样品

Fig. 3. Accurate two-dimensional morphologies of various samples characterized by SEM: (a) Sample #1; (b) sample #4; (c) sample #5; (d) sample #7.

设计时有意为之, 而是实验过程中受实验环境影响所致, 即实验环境为大气环境时, 孔洞内受热熔融而飞溅出的金属颗粒受空气阻力影响, 不能够及时远离样品表面, 故而冷凝堆积在孔洞及沟槽的内壁或边缘, 因此形成了这类二级粗糙结构. 通过对比图 3(a) 和图 3(b) 中的微孔结构可知, 当微孔较深时 (#1 样品, 图 3(a)), 孔洞边缘堆积的颗粒较多, 但微孔内壁相对光滑, 此时二级粗糙结构仅存在于孔洞边缘; 而当微孔较浅时 (#4 样品, 图 3(b)), 孔洞边缘堆积的微米颗粒尺寸变大、数量变多, 且微孔内壁也较为粗糙, 此时二级粗糙结构存在于孔洞边缘、内壁及底部. 对比图 3(c) 和图 3(d) 中的交错沟槽结构可以看出, 刻蚀区域小且槽深较浅的 #5 样品 (图 3(c)) 其顶部堆积的微颗粒相对较多, 形成了该样品的二级粗糙结构, 相比于顶部的微米颗粒, 该类沟槽结构的侧壁相对光滑; 对于刻蚀区域大且槽深较深的 #7 样品 (图 3(d)), 其刻蚀区域接近于 100%, 几乎没有顶部的未刻蚀区域, 其侧壁在高倍显微图像中可以观察到不同程度的二级粗糙结构, 尺寸约在几微米量级.

除对样品的表面形貌进行了分析外, 表征实验中还使用 EDX 对样品原始表面、激光刻蚀后、刻蚀 + 镀金后三种表面状态下的表面元素进行了定量分析, 表 3 列出了 #4 样品三种状态下表面元素的定量分析结果 (各元素原子数量比). 表 3 的测试结果表明: 对于原始的铝合金镀银样品, 其表面存在一定程度的氧化, 根据元素测试结果推测其表面以氧化银为主; 对于激光扫描后的样品, 其表面的镀银层经刻蚀从表面剥离, 铝合金基体裸露于表面, 故铝含量较高, 此外对比发现刻蚀区域的氧含量明显降低, 该类情况下, 刻蚀区域表面以铝和氧化铝的混合物为主; 对于刻蚀+溅射镀金后的样品, 镀金层已基本覆盖了刻蚀区域表面, 其表面金原子比例达到 45.64%, 而测试中之所以仍然能够探测

表 3 三种状态下 #4 样品表面元素原子比例定量分析

Table 3. Quantitative analysis of atomic proportion under three surface states for sample #4.

	元素			
	O	Al	Ag	Au
原始表面	51.64%	8.24%	40.12%	0
激光刻蚀后	15.51%	78.76%	5.73%	0
刻蚀 + 镀金后	11.78%	38.66%	3.92%	45.64%

到氧、铝、银元素的含量, 是因为 EDX 的探测深度 (几微米) 大于镀金层厚度 (250 nm) 所致.

### 3.2 微阵列结构 SEE 特性

图 4 给出了两种微阵列结构的 SEE 特性表征结果, 其中图 4(a) 为 #1—#4 微孔阵列结构 SEY, 这 4 种样品孔隙率相近但深宽比相差较大; 图 4(b) 为 #5—#7 交错沟槽阵列结构的 SEY, 这 3 种样品孔隙率和深宽比均有一定差异; 其中的插图均为各样品归一化 SEY (设各初始电子能量下, 平滑镀金表面 SEY 为 1). 图 4 的 SEY 测试结果表明, 两类微阵列结构都能够大幅降低镀银层表面 SEY, 且 #1 样品表现出最小的 SEY, 其  $\sigma_{max}$  为 0.74. 结合表 2 中的特征尺寸可以得出: 对于孔隙率相近的 #1—#4 号样品, 单个微孔深宽比越大时, 微孔阵列对 SEY 的抑制作用越强烈; 归一化 SEY 曲线表明, 在初始电子能量为 400 eV 时, #1 样品对

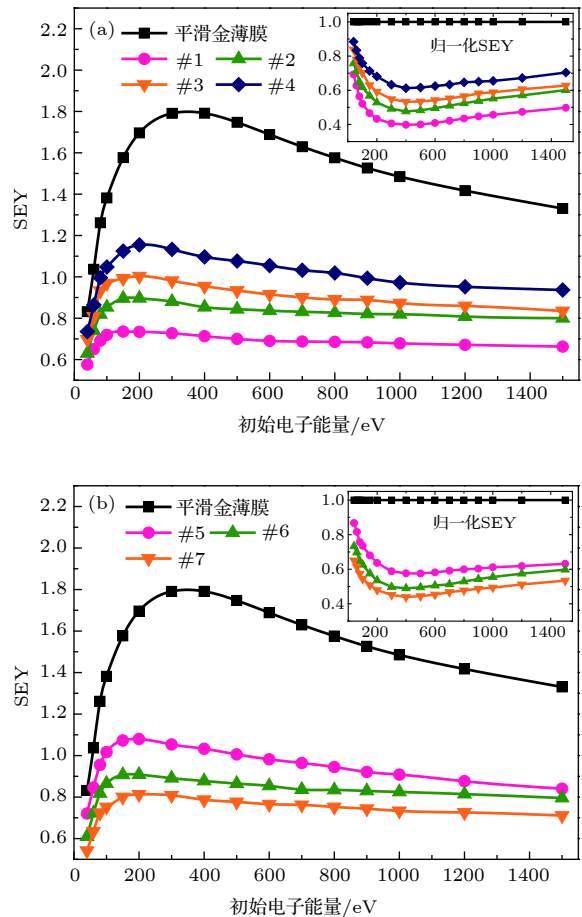


图 4 激光刻蚀样品 SEE 特性表征 (a) 微孔阵列; (b) 正交沟槽阵列

Fig. 4. Measured SEE characteristics of laser etched samples: (a) Micro hole array; (b) orthogonal groove array.

SEY 的抑制幅度达到 60.2%. 在所有正交沟槽微阵列样品中, 相比于 #5 和 #6 样品, #7 表现出对 SEY 更为强烈的抑制作用, 其  $\sigma_{\max}$  为 0.81, 归一化结果表明在初始电子能量为 400 eV 时, #7 样品对 SEY 的抑制幅度达到 56.0%. 结合表 2 样品特征尺寸可知, 尽管 #7 样品的深宽比小于 #5 及 #6 样品的深宽比, 但其孔隙率较大 (接近 100%), 抑制 SEY 的能力也更加明显. 该现象表明, 在深宽比较大的情况下 (例如 #5—#7 样品深宽比均大于 2.5), 深宽比的变化对 SEY 的影响较小, 而相比之下孔隙率对于 SEY 的影响则较大. 综上所述可知, 微结构孔隙率相近时且深宽比各异时, 深宽比越大则 SEY 越小; 微结构深宽和孔隙率均不同时, 孔隙率对 SEY 的影响能力要强于深宽比 (针对深宽比较大的情况).

图 5 给出了其他工艺制备的低 SEY 表面与本实验中激光刻蚀微结构表面 SEY 的对比结果. 所展示的样品包括: 本实验中使用激光刻蚀制备的 #1 和 #7 微阵列结构、氩离子清洗后的镀金铝合金表面 [5]、低气压蒸发制备的金纳米结构 (蒸发气压为 70 Pa) [19]、磁控溅射 TiN 薄膜 (经氩离子清洗) [12] 及磁控溅射 NEG 薄膜 [15]. 图 5 的 SEY 对比结果显示, 相比于其他的金表面 (金纳米结构表面及氩离子清洗镀金表面), 激光刻蚀得到的镀金微阵列结构能够大幅降低镀金表面的 SEY, 表明激光刻蚀微结构能够有效束缚表面电子出射, 且抑制二次电子能力优于其他类型的粗糙金属表面; 相比于 TiN 和 NEG 镀层表面, 激光刻蚀的镀金微阵列结构在 200—1000 eV 初始电子能量范围内表现出

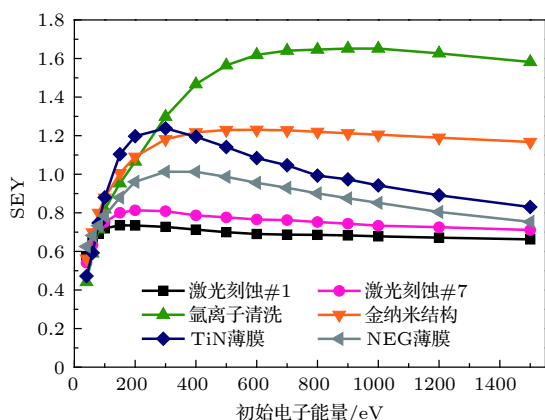


图 5 不同处理工艺获得的低电子产额表面 SEY 对比  
Fig. 5. SEY comparison among some surfaces acquired by various surface treatment technics.

更小的 SEY, 该结果表明在此能量范围内激光刻蚀微结构对二次电子的束缚能力优于低 SEY 薄膜.

### 3.3 微阵列结构 SEE 特性仿真

为验证 3.2 节中所制备微阵列结构深宽比及孔隙率对镀银表面 SEY 的影响规律, 本节中使用如图 1(a) 和图 1(c) 中的规则几何阵列分别对激光刻蚀制备的两类微阵列结构进行等效, 等效模型的几何参数选用表 2 中所制备样品的实际尺寸. 仿真过程与文献 [24] 中报道的方法类似, 可简述如下: 1) 使用 MEST SEE 唯象概率模型 [25] 模拟平滑镀金表面的 SEE 特性以确定模型中的部分待定参数; 2) 使用蒙特卡罗模拟方法并结合已确定参数的 MEST 模型模拟电子的碰撞及出射过程; 3) 基于电子的出射信息并借助电子轨迹追踪算法模拟电子在微结构中的运动过程; 4) 判断电子在该运动过程中的最终状态 (从微结构中逃逸成为出射电子, 或再次碰撞微结构表面); 5) 重复以上过程 2)—4), 直至所有初始电子的碰撞过程均模拟完毕. 对于每种微阵列结构, 仿真过程中入射电子设置为  $5 \times 10^4$  个, 入射位置均匀分布于样品表面, 且均为垂直入射.

图 6(a) 和图 6(b) 分别给出了 4 种微孔阵列及 3 种正交沟槽阵列的 SEY 仿真结果, 并列出了图 4 中的 SEY 测试结果作为对比. 从图 6(a) 可以看出, 对于孔隙率相近、深宽比依次减小的 #1—#4 号样品, 其 SEY 的仿真结果与微孔深宽比呈现反关系, 即深宽比越大的微孔其 SEY 越低, 抑制二次电子能力越强, 深宽比越小的微孔其 SEY 越高, 抑制二次电子能力越弱. 该仿真结果从趋势上验证了实验现象的合理性, 并且从理论上证明了单一因素情况下深宽比对 SEY 的影响规律. 图 6(b) 中对深宽比各异、孔隙率不同的正交沟槽微结构的仿真结果表明: 在深宽比均较大的情况下, 深宽比对 SEY 的影响较小而孔隙率对 SEY 的影响较大, 且孔隙率越大的微阵列 (#7) 结构其 SEY 越低, 对 SEE 的抑制作用越强烈. 该仿真结果证明了实验中激光刻蚀沟槽阵列对镀金表面 SEY 的抑制规律, 并从理论上证明了多因素条件下, 孔隙率对 SEY 的影响更为显著. 综上所述, 仿真结果从趋势上验证了实验结果的正确性, 并且为激光刻蚀微阵列结构抑制电子发射提供了理论依据.

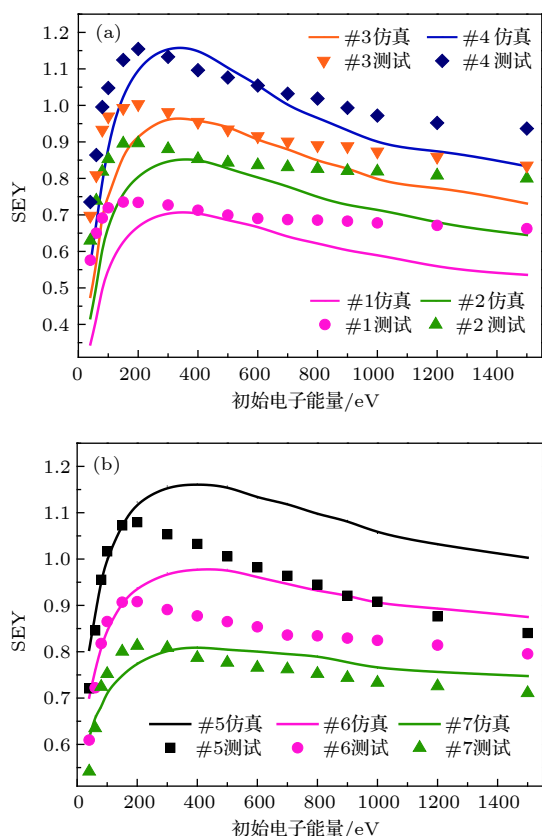


图 6 激光刻蚀样品等效结构 SEE 特性仿真 (a) 微孔阵列; (b) 正交沟槽阵列

Fig. 6. Simulated SEE characteristics of laser etched samples: (a) Micro hole array; (b) orthogonal groove array.

此外, 图 6 表明: SEY 仿真结果与实测值之间表现出一定的差异, 具体如下: 对于图 6(a) 中 #1—#4 微孔阵列结构, 仿真得到的 SEY 几乎均小于实测值; 对于图 6(b) 中 #5—#7 沟槽阵列结构, 仿真得到的 SEY 几乎均大于实测值. 此处我们认为激光刻蚀过程中产生的非理想二级粗糙结构 (如图 3 中各样品的二维精细形貌所示) 是引起该差异的主要原因. 由图 3 可知, 激光刻蚀样品的二级粗糙结构主要由球形颗粒和随机形状的间隙结构组成, 而这两类结构对于 SEY 的影响可参考文献 [24] 中的理论模型及其对 SEY 的作用规律. 文献 [24] 探讨了金属纳米结构中球形颗粒结构和间隙结构对 SEE 的作用机制, 即: 球形颗粒能够增强表面 SEY, 间隙结构抑制表面 SEY, 而金属纳米结构由球形颗粒结构和间隙结构组合而成, 因此纳米结构表现出的 SEY 是两类结构加权平均作用的结果.

观察图 3(a) 和图 3(b) 中样品的精细形貌可知, 对于微孔阵列结构, 其表面微颗粒比例大而间

隙结构比例较小, 因此二级粗糙结构中, 球形颗粒对 SEY 的增强作用大于间隙结构对 SEY 的抑制作用, 从而导致微孔阵列的 SEY 测试值略大于仿真值. 对于交错沟槽微阵列结构, 图 3(c) 和图 3(d) 显示其表面和侧壁有很大比例的间隙结构, 而球状颗粒结构则仅存在于顶部部分区域, 因此二级粗糙结构中球状颗粒所占的比例远小于间隙结构所占比例, 在影响电子出射方面, 即表现为沟槽结构对 SEY 的抑制作用大于球状颗粒对 SEY 的增强作用, 从而导致沟槽阵列的 SEY 测试值小于仿真值.

## 4 结 论

使用激光刻蚀技术获得了能够大幅降低镀金表面 SEY 的微阵列结构, 并理论验证了该类微阵列结构特征参数对 SEY 的影响规律. 实验结果表明: 1) 激光刻蚀能够在金属表面高效率地制备深宽比各异、孔隙率不同的微结构; 2) 激光刻蚀获得的微结构能够大幅抑制镀金表面电子出射, 且抑制幅度优于诸多其他工艺获得的低 SEY 表面; 3) 微结构对 SEY 的抑制能力与孔隙率及深宽比呈现正相关, 且孔隙率对微结构抑制 SEY 能力的影响要大于深宽比, 即在设计低 SEY 微陷阱结构时, 应优先考虑孔隙率对 SEY 的影响. 使用蒙特卡罗模拟方法, 并结合 SEE 唯象概率模型和电子轨迹追踪算法, 仿真了微结构中电子的运动过程及出射情况, 仿真结果从理论上定性验证了实现现象的正确性. 从二级粗糙结构角度出发, 定性解释了微结构 SEY 仿真与实验结果之间的差异. 本工作系统研究了激光刻蚀金属表面微结构的 SEE 特性, 对开发材料低 SEY 表面有重要参考价值.

## 参考文献

- [1] Kishek R A, Lau Y Y 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3198
- [2] Vaughan J R M 1988 *IEEE Trans. Electron Devices* **35** 1172
- [3] Hueso J, Vicente C, Gimeno B, Boria V E, Marini S, Taroncher M 2010 *IEEE Trans. Electron Devices* **57** 3508
- [4] Nistor V, González L A, Aguilera L, Montero I, Galán L, Wochner U, Raboso D 2014 *Appl. Surf. Sci.* **315** 445
- [5] 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
- [6] Dionne G F 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 5361
- [7] Dionne G F 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 3347
- [8] Cazaux J 2010 *Appl. Surf. Sci.* **257** 1002
- [9] Ye M, He Y N, Hu S G, Wang R, Hu T C, Yang J, Cui W Z 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 074904
- [10] 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) [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]
- [11] Valizadeh R, Malyshev O B, Wang S H, Zolotovskaya S A, Gillespie W A, Abdolvand A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 231605
- [12] Montero I, Mohamed S H, García M, Galán L, Raboso D 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 113306
- [13] Michizono S, Kinbara A, Saito Y, Yamaguchi S, Anami S, Matuda N 1992 *J. Vac. Sci. Technol. A* **10** 1180
- [14] Wang D, He Y N, Cui W Z 2018 *J. Appl. Phys.* **124** 053301
- [15] Henrist B, Hilleret N, Scheuerlein C, Taborrelli M 2001 *Appl. Surf. Sci.* **172** 95
- [16] Pimpec F L, Kirby R E, King F, Pivi M 2005 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **551** 187
- [17] 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
- [18] Thomas S, Pattinson E B 1970 *J. Phys. D* **3** 1469
- [19] Wang D, He Y N, Ye M, Cui W Z 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 087902 (in Chinese) [王丹, 贺永宁, 叶鸣, 崔万照 2018 *物理学报* **67** 087902]
- [20] 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
- [21] Valizadeh R, Malyshev O B, Wang S, Sian T, Cropper M D, Sykes N 2017 *Appl. Surf. Sci.* **404** 370
- [22] 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]
- [23] Ye M, Wang D, Li Y, He Y N, Cui W Z, Daneshmand M 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 074902
- [24] Wang D, He Y N, Ye M, Peng W B, Cui W Z 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 153302
- [25] Lara J D, Pérez F, Alfonseca M, Galán L, Montero I, Román E, Raboso D, Baquero G 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 476

# An effective reduction on secondary electron emission yield of gold coated surfaces by laser etching\*

Wang Dan<sup>1)</sup> Ye Ming<sup>1)</sup> Feng Peng<sup>1)</sup> He Yong-Ning<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 16 August 2018; revised manuscript received 10 January 2019 )

## Abstract

Multipactor is a frequent discharging phenomenon for space high-power microwave components, and this detrimental effect is mainly induced by secondary electron emission (SEE) and electron resonance in vacuum. Plenty of researches have verified that suppressing SEE is an efficient approach to mitigate the multipactor. Therefore, low SEE yield surfaces are urgently needed for mitigating the multipactor in the field of space science. In the past few decades, a number of technics have been developed to acquire low SEE yield surfaces, including surface coating, surfaces roughening, depositing coessential nanostructure, etc. Laser etching has been partly reported to be an advisable way to construct micro- or nano-structure on some materials' surfaces, and able to further suppress the SEE yield. Whereas, employing laser etching to obtain the SEE yield reduction on gold coated surfaces is rarely investigated. In this work, by using the laser etching technic, we fabricate four micro hole arrays and three orthogonal groove arrays with various porosities and aspect ratios, and we also characterize their three-dimensional and accurate two-dimensional morphologies. In addition, we investigate the dependence of SEE yield on surface morphology. Experimental results indicate that the laser etched microstructures can effectively suppress the SEE yield from gold coated surfaces, and the suppression levels on SEE yield of these samples are superior to those of many other low SEE yield technics. Furthermore, experiments reveal that the ability to suppress the SEE yield is positively related to the porosity and aspect ratio, as well as that the porosity influences SEE yield more strongly than the aspect ratio does. To theoretically verify the experimental phenomena, we utilize the Monte Carlo method combining with the SEE phenomenological model and the electron trajectory tracking algorithm, to simulate the SEE characteristics of the fabricated microstructures. And the simulation results can qualitatively explain the experimental phenomena. This work digs out an advisable method to sharply reduce the SEE yield from gold coated surfaces by laser etching, which is of considerable importance for exploiting the low SEE yield surface engineering in space microwave systems, and for improving the performance of the space microwave components with gold coated surface.

**Keywords:** laser etching, microstructure, secondary electron emission, secondary roughness

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

**DOI:** [10.7498/aps.68.20181547](https://doi.org/10.7498/aps.68.20181547)

\* 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)