

微米量级表面结构形貌特性对二次电子发射抑制的优化

胡晶 曹猛 李永东 林舒 夏宁

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

Hu Jing Cao Meng Li Yong-Dong Lin Shu Xia Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 177901 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180466

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180466>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[二次电子倍增对射频平板腔建场过程的影响](#)

The influence of multipactor discharge on field-buildup process in radio-frequency plate cavity

物理学报.2018, 67(17): 177902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180656>

[介质部分填充平行平板传输线微放电过程分析](#)

Multipactor in parallel-plate transmission line partially filled with dielectric material

物理学报.2018, 67(15): 157901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180351>

[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, 67(8): 087902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180079>

[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, 67(8): 087901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172740>

[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.67.20172119>

微米量级表面结构形貌特性对二次电子发射抑制的优化*

胡晶 曹猛† 李永东 林舒 夏宁

(西安交通大学电子与信息工程学院, 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2018年3月17日收到; 2018年5月13日收到修改稿)

抑制二次电子倍增效应是提高空间大功率微波器件和粒子加速器等设备性能的重要课题, 而使用表面处理降低材料的二次电子发射系数是抑制二次电子倍增的有效手段. 为优化寻找抑制效果最好的表面形貌, 本文采用蒙特卡罗方法模拟了各种微米量级不同表面形貌的二次电子发射特性, 研究占空比、深宽比、结构形状及排列方式等的影响. 模拟结果表明, 正方形、圆形、三角形凸起和凹陷结构的二次电子发射系数随占空比和深宽比的增大而减小, 但存在饱和值; 凸起结构的排列方式对二次电子发射系数的影响不大, 但是凸起结构形状却对二次电子发射系数的影响较大, 其中三角形的抑制效果最佳. 对凹陷结构而言, 不同形状的抑制效果差别不大; 同时, 占空比和深宽比相同时, 凸起结构较凹陷结构抑制效果更佳. 究其原因, 核心在于垂直侧壁的“遮挡效应”, 凹陷结构遮挡效应的大小与“陷阱”垂直高度有关, 而凸起结构遮挡效应的大小和凸起部分的斜方向投影大小有关.

关键词: 二次电子发射, 凹陷结构, 凸起结构, 微放电敏感区域

PACS: 79.20.Hx

DOI: 10.7498/aps.67.20180466

1 引言

电子辐照引起的二次电子 (secondary electron, SE) 发射现象是物理电子学一个重要的基础问题, 同时也是影响许多相关器件性能的重要因素. 在各类高功率微波器件^[1,2]、加速器^[3,4]中, 由二次电子倍增引起的微放电效应和电子云效应等有害效应是危害相关设备性能的重要因素, 对这些有害效应进行抑制是提高相关设备性能的必要环节^[5-9]. 显然, 减小二次电子发射系数 (secondary electron yield, SEY) 是抑制二次电子倍增的有效手段.

通过表面形貌修饰来抑制二次电子发射, 是减小SEY的重要方法. 在加速器领域, 美国国家加速器实验室 (SLAC) 的Pivi等^[10]从模拟和实验两方面研究了矩形槽、等腰三角形及锯齿槽等多种规则结构对SEY的影响. 日本高能加速器研究机

构 (KEK) 的Suetsugu等^[11]将刻槽和镀膜结合起来应用, 对Al表面刻三角槽和平面Al基镀TiN的情况进行了充分实验对比. 上述工作均采用了二维的沟槽结构. 本课题组总结了矩形槽、三角槽等二维结构对二次电子发射的影响规律, 给出了相应的解析模型^[12], 为二维结构沟槽的设计提供了理论指导. 相比于二维结构, 三维结构表面形貌往往具有更佳效果. 西班牙马德里自治大学的Nistor等^[13]采用湿法化学蚀刻工艺在Ag表面产生了微米尺度的高纵横比粗糙度, 再通过磁控溅射的方法在其表面形成Au涂层, 有效地抑制了波导的多重效应. Aguilera等^[14]在铜表面生长氧化铜纳米线以抑制二次电子发射, 使其总SEY小于1. 叶鸣等^[15]和王泽卫等^[16]在实验上采用矩形槽、方孔及圆孔结构抑制SEY并给出了唯象模型来分析相应的实验结果. He等^[17]采用热蒸发的方法在银表面产生超支化纳米结构, 对二次电子的发射有明显的抑制效果. Cui等^[18]则在铝的微孔表面镀上一层

* 国家自然科学基金 (批准号: U1537210, 11375139) 资助的课题.

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

银, 使得镀银样品的最大二次电子产量从 2.17 降低至 1.58.

虽然表面形貌抑制金属二次电子发射有了一定的效果, 但是对于抑制效果的优化, 尤其是三维形貌结构抑制效果的优化还需进一步研究. 一是需要深入探讨形貌与二次电子发射系数之间的关系, 并选择优化的形貌结构来获得更好的抑制效果; 二是在抑制二次电子发射的同时, 需要考虑此表面形貌应用于微波器件时可能引起的表面趋肤效应, 因此仍需探究怎样设计表面形貌可以使得在形貌结构深度较小的情况下获得更好的抑制效果. 数值模拟是研究形貌结构与 SEY 关系的一种有效手段, 它比实验研究成本更低, 效率更高. 本课题组前期开发了粗糙表面二次电子发射的多代模型, 通过该模型可以模拟任意表面形貌对二次电子发射的影响. 本文将使用该模型系统分析常用的三维表面形貌对二次电子发射的影响, 并在此基础上寻找有效抑制二次电子发射的优化结构, 为抑制二次电子倍增效应提供指导.

2 表面形貌结构及二次电子发射特性的数值模拟

2.1 二次电子发射特性的数值模拟

本文采用课题组开发的粗糙表面二次电子发射多代模型来研究特定表面形貌的二次电子发射特性^[19]. 当入射电子照射到材料上后, 采用蒙特卡罗模拟其在材料内的散射过程. 对于弹性散射过程, 仅改变电子的方向, 能量不变. 针对本文研究的入射电子能量在 10 keV 以下的条件, 弹性散射可用 Mott 微分散射截面来描述. 对于非弹性散射过程, 其微分散射截面为

$$\frac{d\lambda_{in}^{-1}}{d\Delta E d\Delta p} = \frac{1}{\pi a_0 E p} \text{Im} \left(\frac{-1}{\varepsilon(p, E)} \right), \quad (1)$$

其中 λ_{in} 为非弹性散射平均自由程, ΔE 和 Δp 为非弹性散射过程的能量和动量转移, a_0 为 Bohr 半径, $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部, 能量损失函数 $\text{Im} \left(\frac{-1}{\varepsilon(p, E)} \right)$ 的计算采用基于单极近似的 Penn 介电函数方法^[20]. 非弹性散射会在材料内激发出内二次电子, 内二次电子在材料内部继续发生级联散射, 直至能量消耗殆尽或者运动到表面.

粗糙表面电子出射和入射时, 由于不同出射点和入射点的表面法线方向可能不同, 因而不同点的

角度改变关系也不同. 出射时, 假设电子在材料内部的运动方向为 \mathbf{n}_i , 出射后的方向变为 \mathbf{n}_o , 表面法线方向为 \mathbf{n}_s , 显然, 这三个矢量在同一平面内. 那么电子出射方向为

$$\mathbf{n}_o = \left(\sqrt{\frac{E \cos^2 \theta - U_0}{E - U_0}} - \cos \theta \sqrt{\frac{E}{E - U_0}} \right) \mathbf{n}_s + \sqrt{\frac{E}{E - U_0}} \mathbf{n}_i, \quad (2)$$

其中 U_0 表示表面势垒. 显然, 能量为 E 、与表面法线夹角为 θ 的电子只有满足 $E \cos^2 \theta > U_0$ 时才能越过势垒, 按照量子力学方法, 计算得到电子跨越势垒的概率为

$$T(E, \theta) = \frac{4\sqrt{1 - U_0/E \cos^2 \theta}}{\left(1 + \sqrt{1 - U_0/E \cos^2 \theta}\right)^2}. \quad (3)$$

对于电子的入射也可以做类似的处理, 得到进入材料后的角度为

$$\mathbf{n}_i = \left(\cos \theta \sqrt{\frac{E}{E + U_0}} - \sqrt{\frac{E \cos^2 \theta + U_0}{E + U_0}} \right) \mathbf{n}_s + \sqrt{\frac{E}{E + U_0}} \mathbf{n}_o. \quad (4)$$

当电子从表面出射之后, 对于复杂表面, 有可能会出现再入射的情况. 再入射电子的处理过程和原入射电子类似. 对所有的电子进行追踪, 直至其在材料内能量耗尽, 或者出射且不发生再入射情况. 对最终出射的电子进行统计分析, 就可以得到非平整表面二次电子发射特性, 整个模拟过程的流程如图 1 所示.

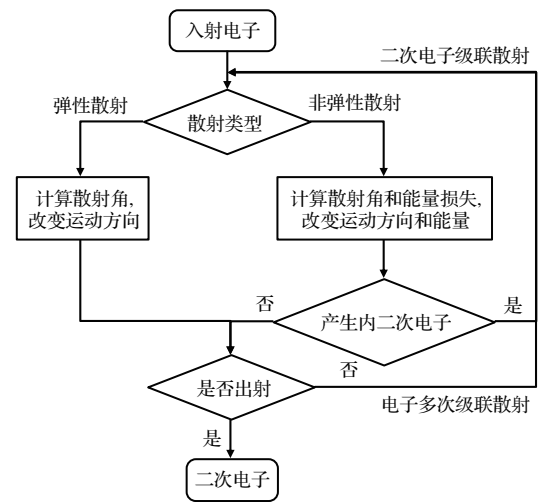


图 1 金属中电子散射过程 Monte Carlo 模拟流程图
Fig. 1. Monte Carlo simulation flow chart of electron scattering in metal.

2.2 三维结构表面形貌参数

为便于加工, 三维表面形貌设计为二维图案在垂直方向凹陷或者凸起的结构, 同时, 二维图案呈周期排列. 由于周期性, 只需研究一个周期单元的二次电子发射特性即可. 本文针对二维图案为正方形、圆形和等边三角形等几种典型结构进行分析. 图2和图3分别为三种图形的凹陷和凸起结构的示意图. 三种结构单元的横向特征尺寸为: 正方形为边长 a 、圆形为直径 d 、等边三角形为边长 l . 凹陷深度或者凸起高度用 h 来表示.

表面结构的占空比 D 和深宽比 A_S 对SEY影响很大. 占空比定义为一个周期单元中凹陷部分(对应凹陷结构)或者凸起部分(对应凸起结构)的投影面积所占的比例. 以正方形为例, 图4为一个周期单元的俯视图, 其占空比为

$$D = \frac{a^2}{A^2}, \quad (5)$$

其中 A 为周期单元的大小. 结构的深宽比定义为结构的凹陷深度或者凸起高度与横向特征尺寸(a , d 或者 l)之比.

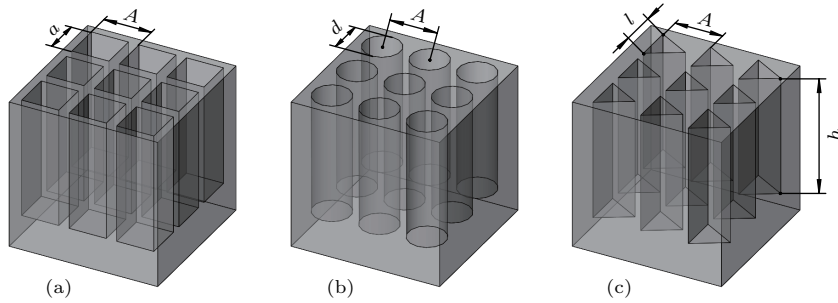


图2 几种凹陷结构三维示意图 (a)方孔结构; (b)圆孔结构; (c)三角孔结构

Fig. 2. Schematic diagram of concave structures: (a) Square concave structure; (b) round concave structure; (c) triangle concave structure.

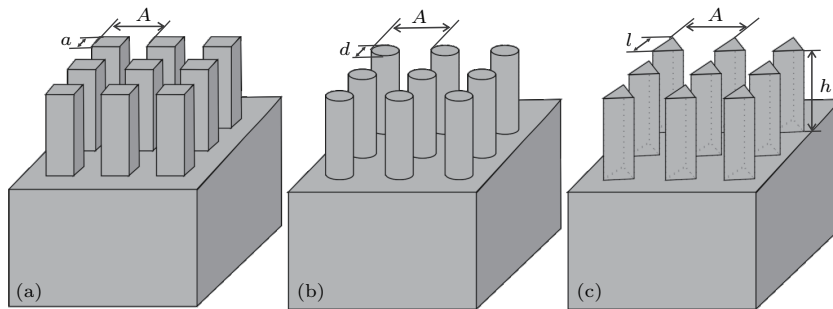


图3 几种凸起结构三维示意图 (a)正方形凸起结构; (b)圆形凸起结构; (c)三角形凸起结构

Fig. 3. Schematic diagram of convex structures: (a) Square convex structure; (b) round convex structure; (c) triangle convex structure.

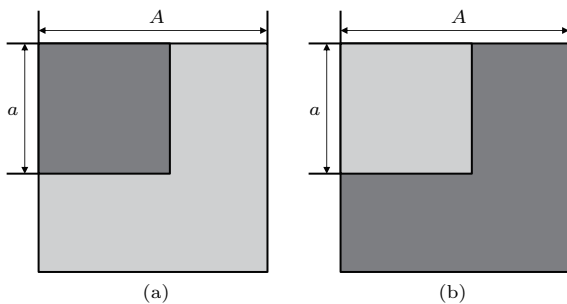


图4 一个周期单元的方孔和正方形凸起结构俯视图 (a)方孔结构; (b)正方形凸起结构

Fig. 4. Top views of a square periodic unit: (a) Concave structure; (b) convex structure.

3 结果与分析

本文采用蒙特卡罗方法对几种凹陷结构和凸起结构分别进行了数值模拟. 结果显示, 形貌结构的占空比和深宽比与二次电子发射特性之间存在一定的规律, 一定程度上可以减小材料的SEY; 除三角形凸起结构外, 其他结构形状的二次电子发射抑制效果相差甚微; 相同结构特征参数的情况下, 凸起结构的抑制效果略优于凹陷结构, 且三角形凸起结构显示出优异的抑制效果. 模拟过程先考虑电子正入射的情况, 然后分析了斜入射的情况, 模拟

中的入射电子数目设置为10000, 最后通过统计二次电子的信息得到二次电子发射特性. 接下来, 对于具体的影响规律及原因做详细的分析.

3.1 结构特征参数对SEY的影响

首先分析表面结构的绝对尺寸对于二次电子发射的影响. 在电子动能一定的情况下, 电子在材料中散射有一定的作用区域, 即二次电子的出射位置和入射电子的着陆点有可能不同. 为此, 本文研究了深宽比、占空比相同而绝对尺寸不同的结构中的二次电子发射特性. 如图5所示, 以正方形凸起和凹陷结构为例, 对于相同的深宽比和占空比, 当结构的大小为微米量级时, 不同结构深度对应的SEY几乎一样. 其原因在于电子的散射范围通常只有几个纳米, 远小于结构的尺寸, 电子在材料中阻挡路径对出射后被遮挡的概率影响很小. 因此, 对于微米量级表面形貌结构, 仅需要关注结构的相对尺寸, 即深宽比和占空比即可.

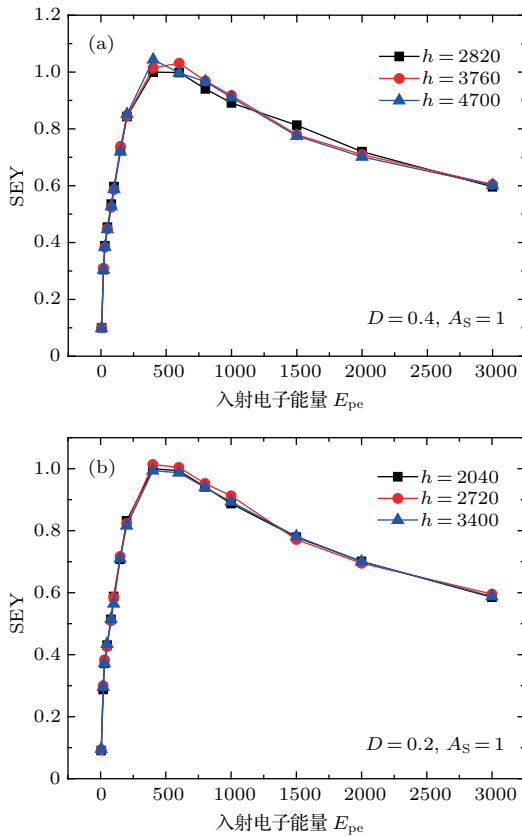


图5 相同深宽比但深度不同情况下的SEY对比结果 (a) $D = 0.4, A_S = 1$ 的方孔结构; (b) $D = 0.2, A_S = 1$ 的正方形凸起结构

Fig. 5. Simulated SEY curves of structures with the same depth to width ratios and different depths: (a) Square concave structure with $D = 0.4, A_S = 1$; (b) square convex structure with $D = 0.2, A_S = 1$.

结构设计时, 一个周期单元水平方向的尺寸为 $4500 \text{ nm} \times 4500 \text{ nm}$, 几种凹陷结构和凸起结构的具体尺寸如表1—表4所列.

接下来, 探究占空比和深宽比对各形貌结构二次电子发射特性的影响. 首先以正方形凹陷结构为例, 讨论表面形貌结构对SEY的影响. 图6(a)是当

表1 深宽比为3时凹陷结构不同占空比的特征参数
Table 1. Characteristic parameters of concave structures with different duty ratios of area when $A_S = 3$.

D	方孔 a/nm	圆孔 d/nm	三角孔 l/nm
0.1	1440	1620	2160
0.2	2040	2280	3060
0.3	2460	2760	3750
0.4	2820	3210	4320

表2 占空比为0.4时凹陷结构不同深宽比的特征参数
Table 2. Characteristic parameters of concave structures with different depth to width ratios when $D = 0.4$.

A_S	方孔 h/nm ($a = 2820 \text{ nm}$)	圆孔 h/nm ($d = 3210 \text{ nm}$)	三角孔 h/nm ($l = 4320 \text{ nm}$)
1	2820	3210	4320
3	8460	9630	12960
5	14100	16050	21600
7	19740	22470	30240

表3 深宽比为3时凸起结构不同占空比的特征参数
Table 3. Characteristic parameters of convex structures with different duty ratios of area when $A_S = 3$.

D	正方形 a/nm	圆形 d/nm	三角形 l/nm
0.1	1440	1620	2160
0.2	2040	2280	3060
0.3	2460	2760	3750
0.4	2820	3210	4320

表4 占空比为0.2时凸起结构不同深宽比的特征参数
Table 4. Characteristic parameters of convex structures with different depth to width ratios when $D = 0.2$.

A_S	正方形 h/nm ($a = 2040 \text{ nm}$)	圆形 h/nm ($d = 2280 \text{ nm}$)	三角形 h/nm ($l = 3060 \text{ nm}$)
1	2040	2280	3060
3	6120	6840	9180
5	10200	11400	15300
7	14280	15960	21420

占空比 $D = 0.4$ 时 SEY 随深宽比的变化情况, 深宽比值分别为 1, 3, 5, 7, 使用与平面结构的比值来处理数据并分析. 从图中可以看出, SEY 随深宽比的增大而减少, 且当深宽比达到一定数值时, 抑制效果趋于稳定.

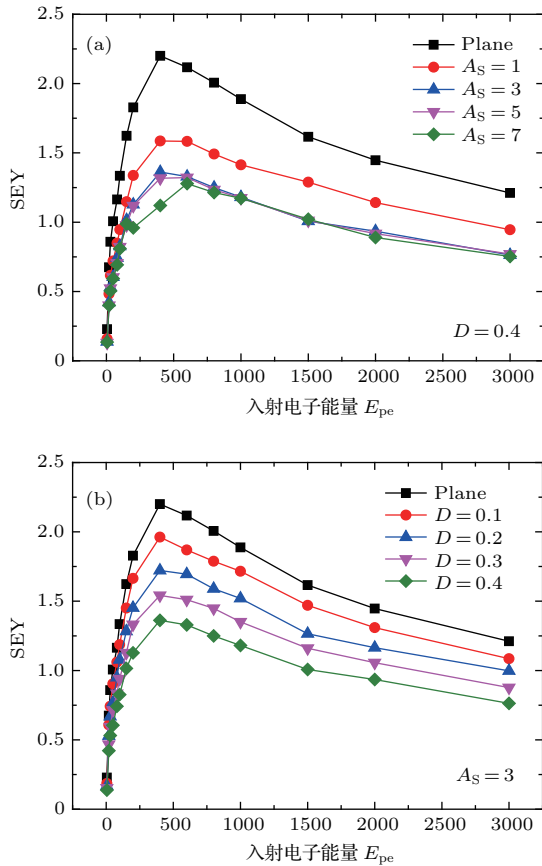


图6 方孔结构特征参数对SEY的影响 (a) $D = 0.4$ 时深宽比对SEY的影响; (b) $A_S = 3$ 时占空比对SEY的影响
Fig. 6. Simulated SEY curves of square concave structure with different geometrical structures: (a) The effect of different depth to width ratios on SEY with $D = 0.4$; (b) the effect of different duty ratios of area on SEY with $A_S = 3$.

通过分析各代二次电子的份额之比可以深入理解深宽比对二次电子发射的抑制效应. 图7为不同深宽比时从表面出射的各代二次电子份额之比. 这里入射电子能量为 400 eV. 可以看出, 不同深宽比情况下第1代二次电子的份额始终是最多的. 对微陷阱结构而言, 第1代二次电子是直接由陷阱底部出射的电子. 显然, 微陷阱结构越深, 二次电子被遮挡的越多, 底部电子出射的概率越小. 同时, 由于绝大部分二次电子的能量都只有数 10 eV, 当被遮挡的电子轰击到槽壁时, 其激发的下一代二次电子数目小于本身的数目, 从而导致总的二次电子数目减少. 从各代二次电子的分布也可以看出, 随

着深宽比的增大, 第1代二次电子减少的幅度变小, 因而二次电子发射的抑制效果趋于稳定.

图6(b)是深宽比 $A_S = 3$ 时, SEY 随占空比的变化情况, 图中给出了占空比值分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 时, 不同入射电子能量对应的 SEY. 可以看出, 占空比越大 SEY 越小. 图8给出了当入射电子能量为 400 eV 时, SEY 随占空比的变化. 可以看出, 两者呈线性关系. 这表明一定占空比的正方形凹陷结构对二次电子的抑制能力是一定的, 而入射电子照射到凹陷结构内部的比例即占空比越大, 二次电子发射的抑制效果越好.

为了深入理解占空比对正方形凹陷结构二次电子发射的抑制效应, 在蒙特卡罗模拟过程中, 控制边界条件, 将一定数量的电子全部射入陷阱底

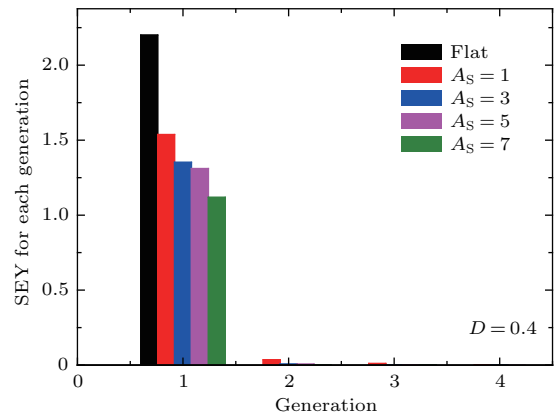


图7 方孔结构 $D = 0.4$ 时不同深宽比情况下从表面出射的各代二次电子的分布
Fig. 7. Generation distribution of SEs emitted from metal surface for square concave structure with different depth to width ratios, $D = 0.4$.

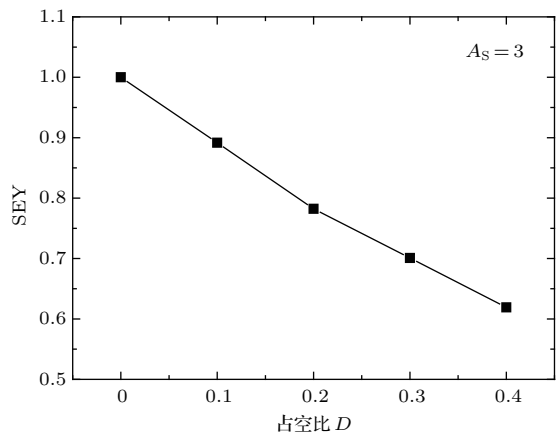


图8 方孔结构入射电子能量 400 eV, $A_S = 3$ 时 SEY 随占空比的变化
Fig. 8. Simulated SEY curve of square concave structure with varying duty ratio of area under incident electron energy as 400 eV, $A_S = 3$.

部, 获得陷阱部分对应的SEY. 对于一般的凹陷结构, 其SEY可表示为 $\delta_{\text{surf}} = D\delta_{\text{hole}} + (1 - D)\delta_{\text{flat}}$. 其中, δ_{surf} 为凹陷结构的SEY, δ_{hole} 为陷阱结构部分的SEY, δ_{flat} 为平滑表面部分的SEY. 利用该公式计算得出总的SEY, 并与表面形貌模拟的直接结果 δ_{hollow} 进行对比, 结果如表5所列, 入射电子能量均为400 eV. 可以看出, 两种结果基本符合, 占空比增大, 陷阱部分的出射电子数虽有所增加, 但俘获的电子数增加的幅度更大, 因而总的SEY呈减小趋势.

表5 方孔结构直接模拟结果与公式计算结果的对比
Table 5. Comparison of square concave structure between direct simulation results and calculation results by formula.

D	δ_{hole}	δ_{flat}	δ_{surf}	δ_{hollow}
0.1	0.05	2.20	1.96	1.96
0.2	0.11	2.20	1.78	1.72
0.3	0.15	2.20	1.59	1.54
0.4	0.20	2.20	1.40	1.36

正方形凹陷结构占空比对二次电子发射的影响可表示为^[21]

$$\delta_{\text{hollow}} = \delta_{\text{flat}} - D(\delta_{\text{flat}} - \sigma) + D \frac{\delta_{\text{ts}}}{2} \left[\cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{A_S}{C} \right) \right) + \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{A_S}{(1-C)} \right) \right) \right], \quad (6)$$

式中 $\sigma = \varepsilon + \eta$ 为背散射系数, ε 和 η 分别为弹性背散射系数和非弹性背散射系数, δ_{ts} 为本征二次电子系数. 从(6)式也可以看出, 占空比越大, 抑制效果越好.

以同样的方法分析正方形凸起结构特征参数对SEY的影响. 图9(a)是占空比 $D = 0.2$ 时SEY随深宽比的变化情况, 深宽比值分别为1, 3, 5, 7, 使用与平面结构的比值来处理数据并分析. 从图9可以看出, SEY随深宽比的增大而减少, 且SEY峰值减小的幅度也在逐渐减弱.

同理, 通过分析各代二次电子的份额之比来深入理解深宽比对二次电子发射的抑制效应. 图10为不同深宽比时从表面出射的各代二次电子份额之比. 这里入射电子能量为400 eV. 可以看出, 不同深宽比情况下第1代二次电子的份额始终是最多的, 且随着深宽比的增大, 第1代二次电子逐渐减少, 从而导致总的二次电子数目减少, 达到抑制

二次电子发射的效果. 但是减小的幅度也在同时减弱, 因而二次电子发射的抑制效果或将趋于稳定.

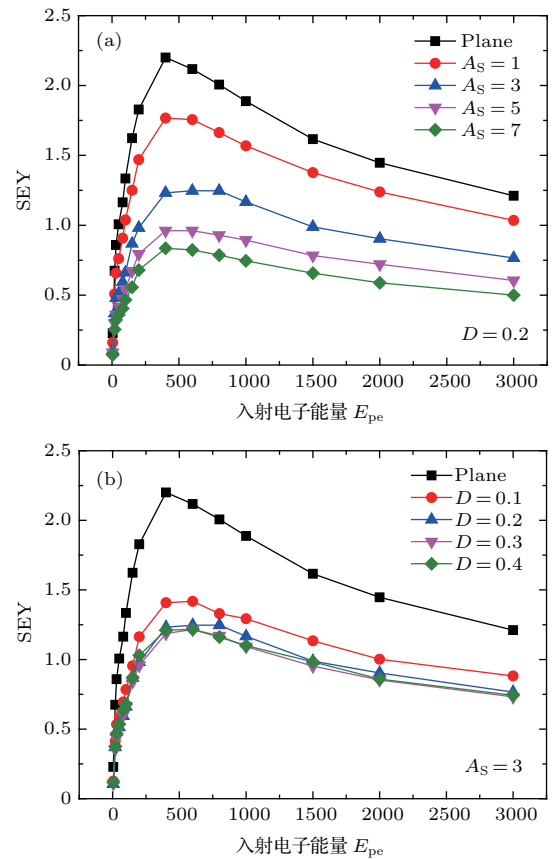


图9 正方形凸起结构特征参数对SEY的影响 (a) $D = 0.2$ 时深宽比对SEY的影响; (b) $A_S = 3$ 时占空比对SEY的影响

Fig. 9. Simulated SEY curves of square convex structure with different geometrical structures: (a) The effect of different depth to width ratios on SEY with $D = 0.2$; (b) the effect of different duty ratios of are on SEY with $A_S = 3$.

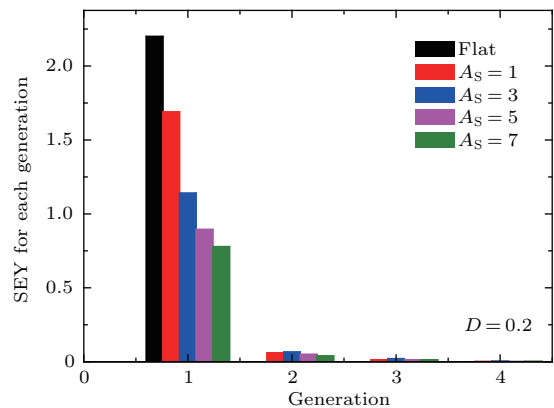


图10 正方形凸起结构 $D = 0.2$ 时不同深宽比情况下从表面出射的各代二次电子的分布

Fig. 10. Generation distribution of SEs emitted from metal surface for square convex structure with different depth to width ratios, $D = 0.2$.

对于正方形凸起结构来说,“陷阱”由无数个纵横矩形槽组成,由于占空比一定,“陷阱”所能俘获的电子数量是一定的,那么当槽的深度不断增加时,可以逃逸出的电子数便不会持续增加,因此单独增加深宽比对二次电子产额的抑制存在饱和值.

图9(b)是当深宽比 $A_S = 3$ 时SEY随占空比的变化情况,占空比值分别为0.1, 0.2, 0.3, 0.4. 从图中可以看出,SEY随占空比的增大而减少,且当占空比达到一定数值时,抑制效果趋于稳定. 图11给出了当入射电子能量为400 eV时,SEY随占空比的变化. 可以看出,占空比增大至一定数值时,SEY不再线性减小. 当深宽比固定时,凸起部分的面积越大即占空比越大,“陷阱”部分对应的深宽比则越大,因而二次电子的抑制效果越来越好.

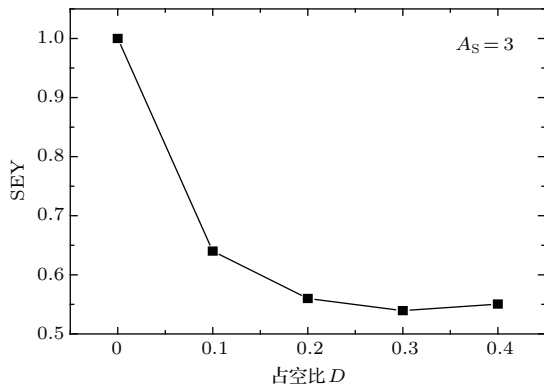


图11 正方形凸起结构入射电子能量400 eV, $A_S = 3$ 时SEY随占空比的变化

Fig. 11. Simulated SEY curve of square convex structure with varying duty ratio of area under incident electron energy as 400 eV, $A_S = 3$.

为进一步阐明占空比对正方形凸起结构二次电子发射的抑制效应,在蒙特卡罗模拟过程中,控制边界条件,将一定数量的电子全部射入陷阱底部,获得陷阱部分对应的二次电子发射系数. 对于一般的凸起结构,其SEY可表示为 $\delta_{surf} = (1 - D)\delta_{hole} + D\delta_{flat}$. 其中 δ_{surf} 为凸起结构的SEY, δ_{hole} 为陷阱部分的SEY, δ_{flat} 为平滑表面部分的SEY. 利用该公式计算得出总的SEY,并与表面形貌模拟的直接结果 δ_{convex} 进行对比,结果如表6所列,入射电子能量均为400 eV. 可以看出,两种结果基本符合,占空比的增大,陷阱部分的SEY减小,导致总的SEY呈减小趋势;且占空比越大时,总的SEY趋于稳定.

图12是入射电子能量为400 eV时深宽比和占空比对SEY的影响,图12(a)和图10(b)分别对应正方形凹陷结构和正方形凸起结构. 正方形凹陷结

构的深宽比对SEY的影响在逐渐减弱,但SEY随占空比的增加而线性减小,并且深宽比对SEY减小的贡献更大些. 而正方形凸起结构的深宽比和占空比对SEY的抑制效果均逐渐减弱,且随着深宽比和占空比的增大,两者对SEY减小的贡献差距有所增加. 总的来说,不管是正方形凹陷结构还是正方形凸起结构,深宽比的增加可以达到更好的二次电子抑制效果.

表6 正方形凸起结构直接模拟结果与公式计算结果的对比
Table 6. Comparison of square convex structure between direct simulation results and calculation results by formula.

D	δ_{hole}	δ_{flat}	δ_{surf}	δ_{hollow}
0.1	1.38	2.20	1.46	1.41
0.2	1.08	2.20	1.31	1.23
0.3	0.89	2.20	1.29	1.19
0.4	0.74	2.20	1.32	1.21

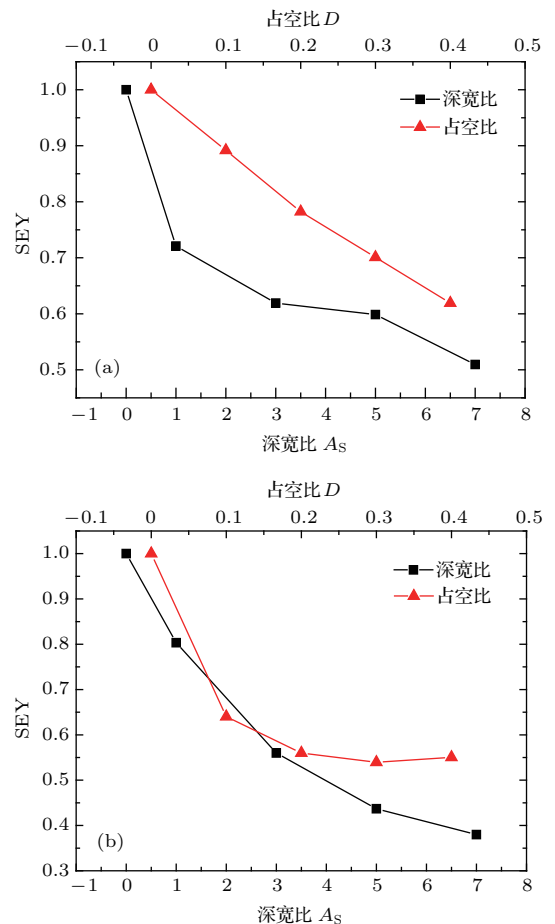


图12 入射电子能量为400 eV时深宽比和占空比对二次电子发射系数的影响 (a) 正方形凹陷结构; (b) 正方形凸起结构

Fig. 12. Simulated SEY curves of surface morphologies with varying depth to width ratio and duty ratio of area under incident electron energy as 400 eV: (a) Square concave structure; (b) square convex structure.

3.2 形状及排列方式对SEY的影响

图 13 所示为在相同占空比和深宽比的情况下, 几种凹陷和凸起结构的数值模拟结果, 占空比和深宽比值分别为 0.2 和 3. 图 13(a) 是几种凹陷结构, 包括方孔、圆孔、三角孔. 从图中可以明显看出, 相对于未做处理的平面结构, 这几种凹陷结构的 SEY 均有所减少, 但效果基本相同. 图 13(b) 是几种凸起结构, 包括正方形、圆形、三角形, 且均研究了两种排列方式, 若将各图形中心连接起来, 显示方形即为角标 1 所代表的排列方式, 显示菱形即为角标 2 代表的排列方式. 由图 13(b) 可知, 相对于未做处理的平面结构, 这几种凸起结构的 SEY 均有所减少, 但图形排列方式对其影响甚微, 其中三角形凸起结构的抑制效果最佳, 模拟结果显示可将 SEY 曲线峰值降低约 60%.

不论是凹陷结构还是凸起结构, 垂直侧壁的“遮挡效应”是其抑制二次电子发射的核心机理,

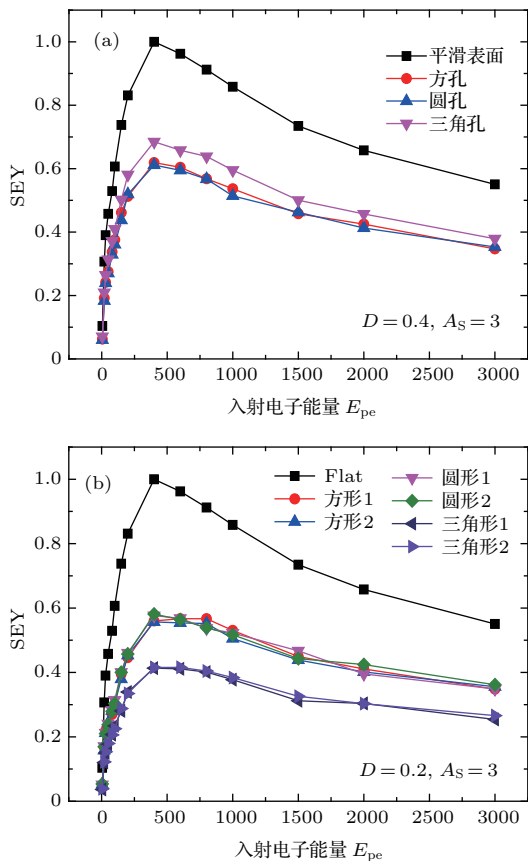


图 13 几种表面结构对二次电子发射的影响 (a) $D = 0.4, A_S = 3$ 的凹陷结构; (b) $D = 0.2, A_S = 3$ 的凸起结构

Fig. 13. Simulated SEY curves of surface morphologies: (a) Concave structures with $D = 0.4, A_S = 3$; (b) Convex structures with $D = 0.2, A_S = 3$.

“遮挡效应”是指结构底部斜向出射的电子可能被陷阱侧壁遮挡而无法形成有效二次电子发射. 那么不管是方孔、圆孔还是三角孔, 都只是提供“陷阱”用以“俘获”电子, 因而各结构的抑制效果没有多大差距. 而对于凸起结构, 抑制二次电子发射的主要机理是凸起部分对斜方向出射的二次电子的遮挡效应, 而遮挡效应的大小和凸起结构的斜方向投影大小有关, 对于外接圆大小相同的凸起结构, 遮挡效应大小接近. 相对于正方形和圆形, 在占空比和深宽比相同的情况下, 三角形提供的遮挡效应最佳. 不过, 具体应选择哪种形状的表面形貌需要根据具体应用场景选择, 此模拟结果仅是为抑制二次电子发射的工艺提供一种思路.

3.3 凹陷和凸起设计方式对SEY的影响

图 14 所示为相同占空比和深宽比时, 所有微陷阱结构对二次电子发射的影响对比, 其中占空比和深宽比值分别为 0.2, 3, 凸起结构则是选取最优的排列方式. 从图中可以得出, 几种凸起结构的抑制效果普遍优于凹陷结构, 凹陷结构的 SEY 曲线峰值在 0.8 左右, 正方形和圆形凸起结构的 SEY 曲线峰值在 0.55 左右, 而三角形凸起结构的理论模拟结果则低至 0.4, 即相比于平滑表面, SEY 减小了约 60%. 其实, 凹陷和凸起结构本身就是相对的, 出现这样的结果是由于相对于凹陷结构, 凸起结构的“陷阱”面积会比较大, 占空比和深宽比相同时, 后者俘获电子的可能性更大, 从而抑制效果更明显. 同时这样反向思维的设计方式, 会发现诸如三角形

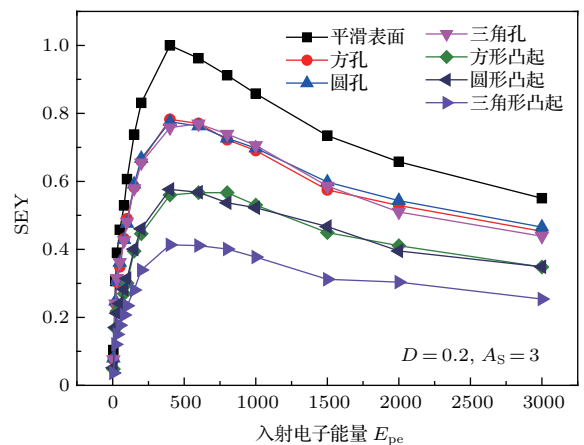


图 14 $D = 0.2, A_S = 3$ 时几种表面结构对二次电子发射的影响对比

Fig. 14. Simulated SEY curves of concave structures and convex structures with $D = 0.2, A_S = 3$.

凸起的表面形貌, 会增大电子碰撞的壁数, 使得碰撞概率增大, 从而减少二次电子的产生. 另外, 对于凸起结构, 可通过调整占空比来控制“陷阱”的深宽比, 这样在器件趋肤效应的限制下, 可以减小“陷阱”纵向尺寸的同时保证二次电子发射的抑制效果.

3.4 斜入射时深宽比、占空比和结构形状对 SEY 的影响

鉴于种子电子的出现具有随机性, 实际情况中种子电子并不可能是垂直入射 (正入射), 因此对斜入射情况下深宽比、占空比及结构形状对 SEY 的影响进行了探究, 其中入射电子能量均为 400 eV, 入射电子数目为 10000, 方位角 (入射电子与表面切线方向的夹角) 设置为 0° .

图 15 所示为占空比为 0.2 的正方形凸起结构不同深宽比时 SEY 随入射角的变化情况, 数据做了比值化处理, 均以 $A_S = 1, \theta = 0^\circ$ 时正方形凸起结构的 SEY 值为基准. 结果表明, 入射角一定时, SEY 随深宽比的增大而减小; 深宽比一定时, 随着入射角的增大, SEY 呈上升趋势; 深宽比越大, SEY 的增长趋势越缓慢, 说明深宽比越大时, SEY 受入射角的影响越小.

图 16 所示为深宽比为 3 的正方形凸起结构不同占空比时 SEY 随入射角的变化情况, 数据做了比值化处理, 均以 $D = 0.1, \theta = 0^\circ$ 时正方形凸起结构的 SEY 值为基准. 结果表明, 入射角一定时,

SEY 随占空比的增大而减小; 占空比一定时, 随着入射角的增大, SEY 均呈现上升趋势; 当占空比增大时, 入射角对 SEY 的影响效果基本一样, 即增长趋势一致, 说明占空比的增大并不能降低入射角对 SEY 的影响.

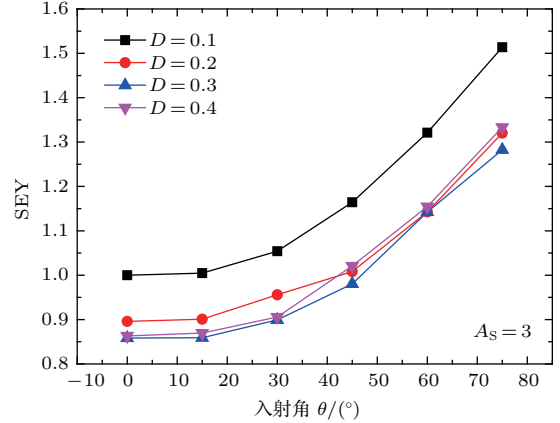


图 16 $A_S = 3$ 的正方形凸起结构不同占空比时 SEY 随入射角的变化情况

Fig. 16. Simulated SEY curves of square convex structure with varying electron incident angle under different duty ratios of area, $A_S = 3$.

图 17 所示为占空比为 0.2、深宽比为 3 时正方形、圆形、三角形凸起结构中 SEY 随入射角的变化情况, 数据做了比值化处理, 均以 $\theta = 0^\circ$ 时正方形凸起结构的 SEY 值为基准. 结果表明, 入射角一定时, 结构形状的改变对 SEY 有影响; 结构形状一定时, 随着入射角的增大, SEY 值均呈现上升趋势; 三角形结构的 SEY 受入射角的影响较小, 即随着入射角的增大, SEY 增加的幅度较小.

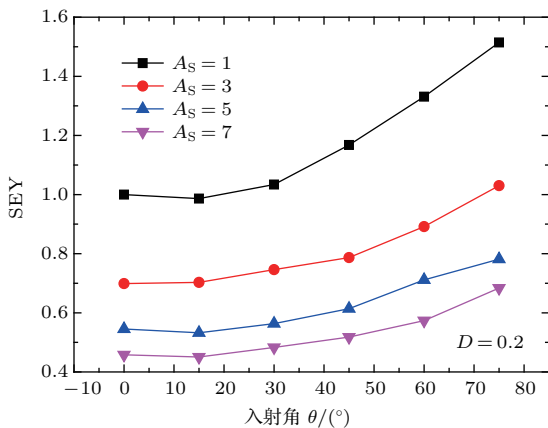


图 15 $D = 0.2$ 的正方形凸起结构不同深宽比时 SEY 随入射角的变化情况

Fig. 15. Simulated SEY curves of square convex structure with varying electron incident angle under different depth to width ratios, $D = 0.2$.

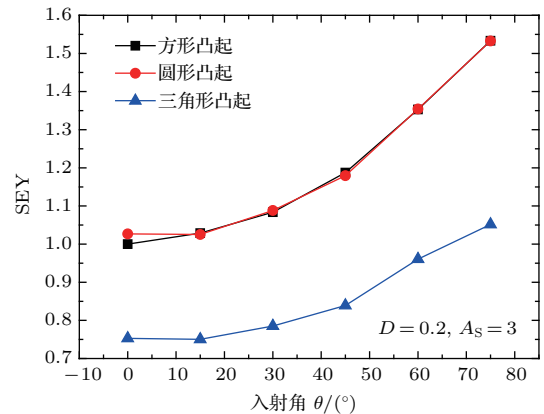


图 17 $D = 0.2, A_S = 3$ 的几种凸起结构 SEY 随入射角的变化情况

Fig. 17. Simulated SEY curves of convex structures with varying electron incident angle, $D = 0.2, A_S = 3$.

4 微放电敏感区域分析

为了探讨抑制SEY对微放电的效果,在上述模拟结果的基础上选择抑制效果较好的两种表面形貌,即占空比 D 、深宽比 A_S 分别为0.2, 3的正方形凹陷结构和正方形凸起结构,以其模拟的SEY曲线为基础,在平行平板结构微波器件上进行微放电敏感区域的分析,结果如图18所示,其中Flat, Concave, Convex分别表示平滑表面、正方形凹陷结构、正方形凸起结构对应的微放电敏感区域边界值(二次电子倍增率等于1).由图18可以看出,相对于平滑表面,正方形凹陷结构和正方形凸起结构的微放电区域变小,微放电阈值有所提高,显然后者的抑制效果更好.这也从侧面说明了通过表面处理可以降低材料的SEY,进而可使应用此表面形貌的微波器件的微放电效应得以减缓.

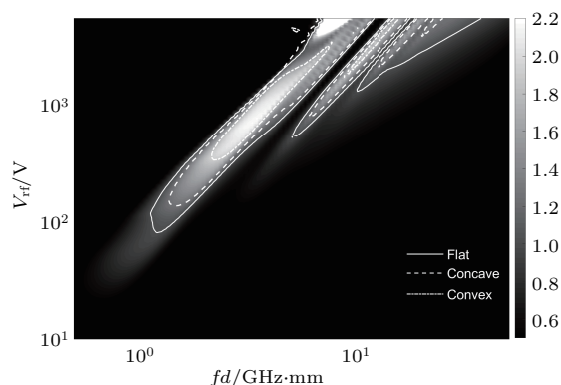


图18 几种表面结构的微放电敏感区域对比

Fig. 18. Susceptibility zone comparison of flat, square concave structure, and square convex structure.

5 结论

采用蒙特卡罗模拟的方法研究了各种不同表面形貌的二次电子发射.选取铜材料,采用凹陷和凸起两种设计思路进行表面形貌的设计,探究表面形貌的结构参数、形状及排列方式对二次电子发射的影响规律.数值模拟结果表明:1)凹陷结构和凸起结构的SEY都随占空比和深宽比的增大而减小,区别在于凹陷结构的深宽比有饱和值,凸起结构的占空比有饱和值,二次电子的抑制效果均在一定数值后趋于稳定;2)凹陷结构的形状对二次电子的抑制效果影响甚微,而凸起结构的形状对抑制效果有一定的影响,但其排列方式并不会影响抑制效果;3)两种设计方式对比,凸起结构更佳,尤其

是三角形凸起结构,理论上可将SEY峰值降低约60%;4)斜入射情况下,深宽比和占空比的增大均能有效抑制二次电子的发射,且深宽比越大,SEY受入射角的影响越小,而占空比则不是.另外,结构形状的改变也会带来二次电子抑制效果的显著变化,三角形凸起结构的SEY受入射角的影响较小.因表面形貌的设计受器件趋肤效应的影响,故在相同深宽比情况下凸起结构更占优势.该研究成果对抑制微波器件微放电效应的工艺具有理论指导意义.

参考文献

- [1] Charbonnier F 1988 *J. Vac. Sci. Technol. B* **16** 880
- [2] Song B P, Fan Z Z, Su G Q, Mu H B, Zhang G J, Liu C L 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 065008 (in Chinese) [宋佰鹏, 范壮壮, 苏国强, 穆海宝, 张冠军, 刘纯亮 2014 强激光与粒子束 **26** 065008]
- [3] Kirby R E, King F K 2001 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **469** 1
- [4] Pivi M T F, Collet G, King F, Kirby R E, Markiewicz T, Raubenheimer T O, Seeman J, Pimpec F L 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **621** 47
- [5] Federmann S, Caspers F, Mahner E 2011 *Phys. Rev. Spec. Top.-Accel. Beams* **14** 012802
- [6] Lin S, Yan Y J, Li Y D, Liu C L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 147902 (in Chinese) [林舒, 闫杨娇, 李永东, 刘纯亮 2014 物理学报 **63** 147902]
- [7] Valizadeh R, Malyshev O B, Wang S, Zolotovskaya S, Gillespie W A, Abdolvandand A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 231605
- [8] Li Y, Cui W Z, Zhang N, Wang X B, Wang H G, Li Y D, Zhang J F 2014 *Chin. Phys. B* **23** 048402
- [9] Li Y, Cui W Z, Wang H G 2015 *Phys. Plasmas* **22** 053108
- [10] Pivi M, King F K, Kirby R E, Raubenheimer T O, Stupakov G, Pimpec F L 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 104904
- [11] Suetsugu Y, Fukuma H, Pivi M, Wang L 2009 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.* **604** 449
- [12] Zhang N, Cao M, Cui W Z, Hu T C, Wang R, Li Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 207901 (in Chinese) [张娜, 曹猛, 崔万照, 胡天存, 王瑞, 李韵 2015 物理学报 **64** 207901]
- [13] Nistor V, González L A, Aguilera L, Montero I, Galán L, Wochner U, Raboso D 2014 *Appl. Surf. Sci.* **315** 445
- [14] 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
- [15] 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]

- [16] Wang Z W, Ye M, Chen L, He Y N, Cui W Z, Zhang Z B 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 124002 (in Chinese) [王泽卫, 叶鸣, 陈亮, 贺永宁, 崔万照, 张忠兵 2016 *强激光与粒子束* **28** 124002]
- [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] Cui W Z, Li Y, Yang J, Hu T C, Wang X B, Wang R, Zhang N, Zhang H T, He Y N 2016 *Chin. Phys. B* **25** 068401
- [19] Cao M, Zhang N, Hu T C, Wang F, Cui W Z 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 55501
- [20] Penn D R 1987 *Phys. Rev. B: Condens. Matter* **35** 482
- [21] Ye M, He Y N, Hu S G, Wang R, Hu T C, Yang J, Cui W Z 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 074904

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

Hu Jing Cao Meng[†] Li Yong-Dong Lin Shu Xia Ning

(Key Laboratory for Physical Electrons and Devices of the Ministry of Education, Department of Electronic Science and Technology, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 17 March 2018; revised manuscript received 13 May 2018)

Abstract

Suppression of the secondary electron (SE) multipactor is a key issue for improving the performance of high power microwave devices and particle accelerators. The decrease of the SE emission yield (SEY) by using certain surface morphology is one of the effective methods. To optimize the surface morphology, we simulate the SE emissions of different surface structures by using the Monte Carlo method. The effects of geometric parameters, such as duty ratio of area, depth-to-height ratio, pattern and its arrangement on SEY are investigated. For surface morphology with patterns of square, round and triangle, and for both convex and concave structures, the corresponding values of SEY first decrease and then become steady with the increase of duty ratio of area and depth-to-height ratio. For convex structures, the values of SEY are different for different pattern shapes, in which triangle pattern has the smallest SEY. However, the value of SEY is nearly independent of arrangement of pattern. For concave structures, on the other hand, the value of SEY is scarcely different for different patterns or different arrangements. In general, a convex structure has a better suppression effect than a concave structure if other geometric parameters are identical. The "shading effect" from side wall of structure is found to be the intrinsic reason of the suppression effect.

Keywords: secondary electron emission, concave structure, convex structure, multipactor susceptibility zone

PACS: 79.20.Hx

DOI: 10.7498/aps.67.20180466

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1537210, 11375139).

† Corresponding author. E-mail: mengcao@mail.xjtu.edu.cn