

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.04.013

表面微孔阵列结构调控二次电子发射特性研究

黄 昆¹, 杨 宁², 杨 雄¹, 邹方正¹, 宋佰鹏¹, 张冠军¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049;

2. 中国电力科学研究院有限公司 电网环境保护国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 固体介质的二次电子发射受到材料成分、元素构成、表面状况等因素影响, 其中表面状况对于二次电子发射系数起着至关重要的作用, 表面微结构调控入射电子在材料表面的运动状态和碰撞频率, 进而影响二次电子发射。基于粒子路径追踪算法, 建立了一次电子与材料表面碰撞模型, 研究了微孔阵列结构参数对二次电子发射系数的调控机制, 分析了微孔阵列单元深度、孔径和面积占比的影响规律。研究发现, 通过设置合理的结构单元深度和宽度, 可以实现对二次电子发射系数的调节。单元孔径宽度为 2 mm、深度为 5 mm、数目为 169 时, 二次电子发射系数降低了 57%。研究结论可为脉冲功率、航天领域的沿面放电机理分析和抑制提供理论和数据支撑。

关键词: 微孔阵列结构; 二次电子发射系数; 路径追踪

中图分类号: V443; O462

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2022)04-0099-08

Study on secondary electron emission characteristics regulated by surface microporous array structure

HUANG Kun¹, YANG Ning², YANG Xiong¹, ZOU Fangzheng¹, SONG Baipeng¹, ZHANG Guanjun¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The secondary electron emission of solid insulator is affected by material composition, element composition, surface condition and other factors. The surface condition plays a vital role in secondary electron yield. Surface microstructure regulates the motion state of incident electrons on the material surface and then affect the secondary electron emission. Based on the path tracking algorithm, this paper establishes the primary electron-surface collision model, studies the regulation mechanism of the structural parameters of the microporous array on the secondary electron emission coefficient, and analyzes the effects of the unit depth, width and area ratio of the microporous array. It is found that the secondary electron yield can be adjusted by setting the reasonable depth and width of the structural unit. When the unit width is 2 mm, the depth is 5 mm and the number is 169, the secondary electron yield is reduced by 57%. The conclusions of this paper can provide theoretical and data support for the analysis and suppression of surface discharge mechanism in the field of pulse power and aerospace.

Key words: microporous array structure; secondary electron yield; path tracing

0 引言

二次电子发射通常指具有一定能量的带电粒

子(如电子或离子),以一定能量轰击材料表面,从而使得材料表面溢出电子的物理过程^[1-2]。二次电子发射系数,即每个入射一次电子发射的二次电子

收稿日期:2022-05-10; 修回日期:2022-05-21

基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(编号:51827809)

引用格式:黄昆,杨宁,杨雄,等. 表面微孔阵列结构调控二次电子发射特性研究[J]. 空间电子技术,2022,19(4):99-106.
HUANG K, YANG N, YANG X, et al. Study on secondary electron emission characteristics regulated by surface microporous array structure[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(4):99-106.

数量,通常用于评估材料的二次电子发射特性,反映电子脱离材料的能力。二次电子发射现象对多领域真空装置和器件均有着重要的影响,如空间粒子与航天器相互作用引发的二次电子发射过程可能导致表面甚至深层带电,进而引发系统故障^[3-4]。粒子加速器中真空室材料在高速电子作用下发射二次电子形成电子云,将严重影响被加速粒子的性能参数^[5]。在真空绝缘系统中,三结合点处产生的初始电子引发的二次电子倍增过程是导致真空沿面闪络进而使得绝缘失效的主要原因^[5-8]。因此,调控材料的二次电子发射特性对于提升多领域设备的性能和可靠性有着重要的意义。

二次电子发射受到多种因素的影响,如表面材料组成^[9-10]、表面微观形貌^[11-16]、表面污染^[17]、一次电子的入射能量和方向等,其中表面形貌是影响二次电子发射特性的关键因素,可以通过改变材料表面形貌对二次电子发射系数进行调控。Wood等^[11]通过使用非等离子增强湿法化学气相沉积法,在N型硅片衬底表面形成碳纳米管森林来降低二次电子发射系数。这种减少二次电子发射系数的方法主要是由于电子和材料表面之间碰撞次数增加,使得次级电子更可能多的被困在局部微结构中,而不是逸出材料近表面,逃逸到真空环境中。Jin等^[18]通过在水平石墨基底表面构建碳天鹅绒表面形貌来调控二次电子发射系数,其主要机理是将电子限制在天鹅绒表面结构所形成的复杂表面微腔中,使较少的电子从材料近表面逸出,从而降低二次电子发射系数。Pivi等^[19]采用蒙特卡罗方法对二维三角形和矩形沟槽表面形貌的二次电子发射系数进行模拟,并采用机械加工方式制备毫米尺度的铜刻槽样品测量二次电子发射系数,结果表明抑制效果取决于三角形槽的角度和矩形槽的纵横比。张娜等^[20]采用蒙特卡罗方法系统研究了三维规则表面形貌对二次电子发射特性的影响,并且从理论上推导了矩形槽二次电子产额的解析模型^[21]。

现有研究多通过化学沉积、物理刻蚀等方法构建复杂表面微观形貌,工艺复杂且难以大量制备。微尺寸打印技术的发展使得快速大量制造复杂精密结构成为可能,因此通过构建表面规则微孔阵列结构,进而调控材料二次电子发射特性,具有更大的工业应用可能性。文章基于路径追踪算法,建立了一次电子与材料表面碰撞模型,构建了具有不同

几何参数的四棱锥多孔阵列结构表面,探究了微孔单元参数对二次电子发射系数的调控机制,研究结论可为脉冲功率、航天领域的沿面放电机理分析和抑制提供理论和数据支撑。

1 二次电子发射仿真模型

1.1 基于有限元思想的路径追踪算法

采用计算机图形学算法有助于研究电子和复杂表面之间的相互作用。当电子在随机微结构表面上的移动距离较短时,不考虑外部电磁场和表面电荷对电子轨迹的影响,将运动过程视为较短的直线运动。文章建立了一种路径追踪算法研究电子与微孔阵列表面相互作用的二次电子发射过程,路径追踪算法示意图如图1所示。

入射电子从一定高度轰击微结构表面的中心区域,当电子入射到表面上时开始从碰撞交点处寻找下一个碰撞点,如图1(a)所示。在此过程中,首先确定当前碰撞点所在的网格位置,称为初始位置。随后,根据电子运动的方向矢量确定下一个碰撞点的探寻方向。在初始网格周围逐层探索下一个碰撞点,如图1(b)所示,确定在电子运动方向上环绕初始网格的第一层网格中是否存在下一个碰撞点。如果第一层网格中没有下一个碰撞点,则继续在电子运动方向的下一层网格中继续判断是否存在下一个碰撞点,直到获得下一个碰撞点为止,如图1(c)~图1(d)所示。然后以获得的碰撞点为初始碰撞点进行相同的碰撞过程,或从样品表面附近的区域逸出,如图1(e)所示。

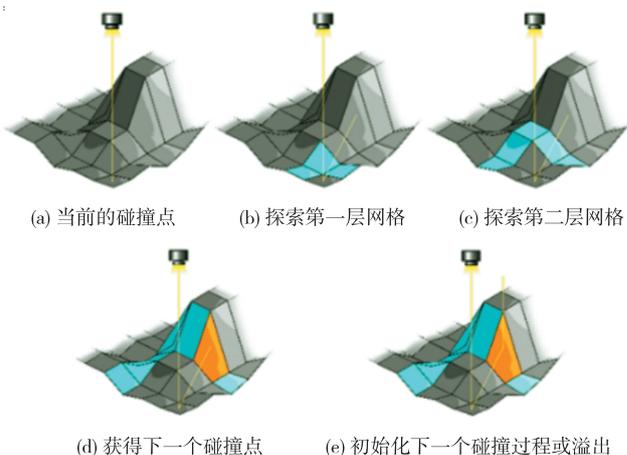


图1 路径追踪和碰撞交点计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of path tracking and intersection calculation

表面微结构的每个四边形网格可进一步划分为两个三角形斜面以近似模拟表面。根据碰撞点的坐标位置和电子的方向矢量,得到电子运动的直线方程。相交点的坐标分别根据直线方程和两个三角形斜面的平面方程计算。如果得到的交点坐标的投影落到三角形在 XY 平面的投影范围内,则所得到交点坐标为下一个碰撞点。

在电子与表面微结构相互作用过程中,电子可能会在一次碰撞后从样品表面附近的区域逸出,或二次电子倍增,或由于连续的多次折反射在微结构内相互碰撞。电子与表面微结构相互作用中的几种典型的电子轨迹如图 2 所示。

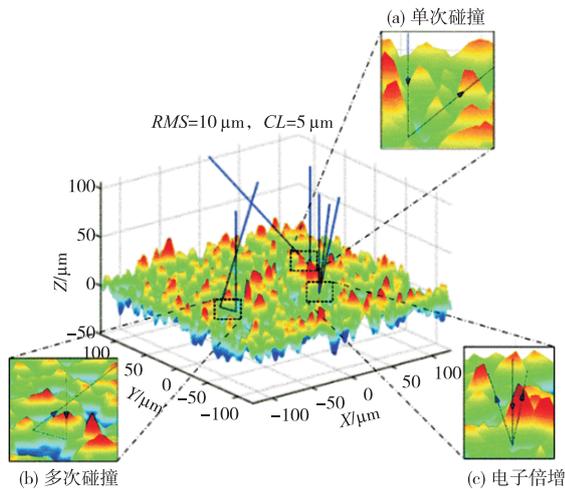


图 2 电子和表面相互作用的几种典型轨迹结果

Fig. 2 Several typical trajectory induced by electron and surface interaction

1.2 二次电子发射唯象模型

假定理想光滑表面的二次电子发射系数和能谱用于描述电子和随机微结构表面相互作用时的本构响应。理想光滑表面二次电子发射系数由 Furman 提出的唯象模型给定^[22]:

$$\delta = \delta_{\max} G(x) \quad (1)$$

其中 $G(x) = sx/(s-1+x^s)$, $x = E_p/E_{p\max}$, δ 为二次电子发射系数, δ_{\max} 为最大二次电子发射系数, E_p 为入射电子能量, $E_{p\max}$ 为最大二次电子发射系数对应的能量入射电子的能量, s 为衰减系数。

二次电子能谱由快峰和慢峰构成^[20-22]。快峰的能量在入射电子能量附近,慢峰满足伽马分布,可用式(2)给定:

$$f(E_{\text{out}}) = \left(\frac{E_{\text{out}}}{T^2} e^{-E_{\text{out}}/T} / \gamma\left(2, \frac{E_{\text{inc}}}{nT}\right) \right) \quad (2)$$

其中 E_{out} 为二次电子的能量, T 为样品表面温度, E_{inc} 为入射电子能量, n 为二次电子的数目, $\gamma(s, x)$ 为不完全伽马分布。

当电子和表面随机微结构的局部倾斜面相互作用时,电子和材料表面相互作用的局部入射角度与样品参考系下的入射电子束流与样品表面作用角度的名义入射角不同。因此,根据局部入射角度对理想光滑表面的二次电子发射系数进行修正^[23],修正如式(3)所示:

$$\delta_{\theta} = \delta \exp[P(1 - \cos\theta)] \quad (3)$$

其中 θ 为入射电子与表面随机微结构的局部倾斜区域的夹角, δ_{θ} 为入射电子倾斜入射作用下的二次电子发射系数, P 为归一化参数,对于介质材料其典型值为 1,对于导体材料其典型值为 0.5。

由于电子数目为整数,因此在确定相互作用过程中发射的电子数时,需要对二次电子产率(second emission yield, SEY)的小数部分进行校正:

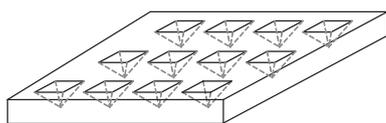
$$\delta = \delta_{\text{int}} + \begin{cases} 0, & \delta_{\text{dec}} < K_{\text{rand}} \\ 1, & K_{\text{rand}} \leq \delta_{\text{dec}} \end{cases} \quad (4)$$

其中: δ_{int} 为二次电子发射系数的整数部分, δ_{dec} 为二次电子发射系数的小数部分, K_{rand} 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数。碰撞过程中产生的二次电子的空间角满足余弦分布^[24],方位角为 0 到 π 之间的均匀分布。

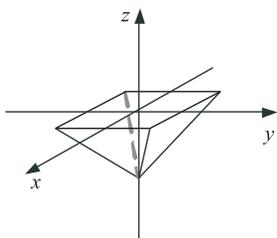
2 微孔阵列参数对二次电子发射系数的影响

考虑到实际工艺中平底结构微孔制作工艺以及制作精度要求较高,在初步仿真中选取四棱锥作为典型微孔结构,其示意图如图 3(a)所示,图 3(b)为四棱锥微孔阵列结构的单元示意图,二维坐标系下的四棱锥形的微孔结构可以表示为三角形结构。四棱锥微孔结构单元的几何特征参数为:孔深度 D ,单位:mm;孔宽度 W ,单位:mm;单位样片上的微孔单元的数目: N ,单位:个。

当具有一定能量的一次电子垂直入射材料表面与四棱锥结构单元相互作用时,根据二次电子倍增理论,将在材料表面发生二次电子倍增现象,产生的二次电子和微孔结构材料表面相互作用产生第二代二次电子,如图 4 所示。



(a) 微孔阵列表面示意图



(b) 四棱锥形微孔单元示意图

图 3 微孔阵列表面及微孔单元示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microporous array structure surface and microporous unit

— 初始电子 - - - 第一代 SE - - - 第二代 SE

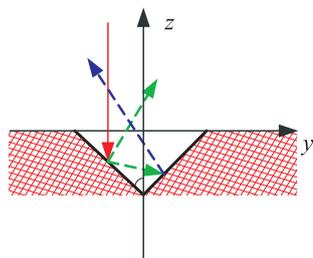


图 4 电子与微孔单元相互作用示意图

Fig. 4 Schematic diagram of interaction between electron and microporous unit

2.1 微孔单元深度的影响

研究四棱锥结构孔深度对二次电子发射系数的影响,保持单位样品上的微孔单元数目不变,分别设置孔宽度 W 为 1 mm、2 mm 和 4 mm,并改变微孔单元深度 H ,得到如图 5 所示的三维表面。

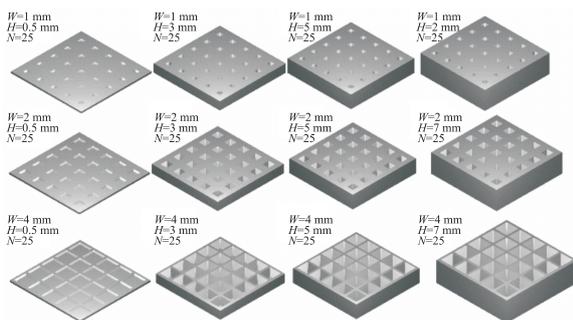


图 5 不同孔径宽度 W 下微孔单元深度 H 改变微孔阵列结构表面图

Fig. 5 3D model of microporous array surface with various unit depth for different width

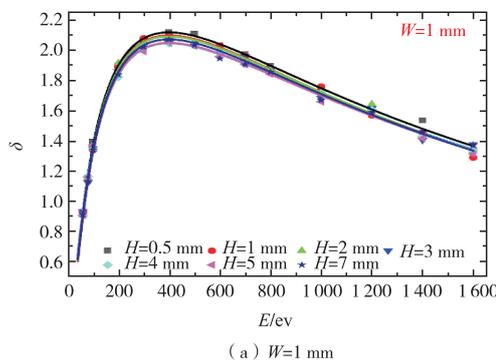
计算不同孔径宽度下微孔单元深度改变时四棱锥单元侧壁倾斜角度,如表 1 所列,随着微孔单元深度增加,四棱锥结构的侧壁倾角逐渐增大。因此,对于不同深度和不同孔径宽度的微孔阵列结构,竖直入射的一次电子与材料表面作用的实际角度将发生改变,局部二次电子发射系数也将改变,需要考虑局部倾斜角度变化对二次电子发射系数的影响。

表 1 微孔单元深度 H 改变时微孔侧壁倾角

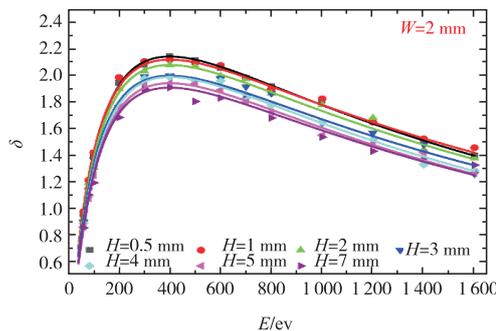
Tab. 1 Inclination angle of unit sidewall with various unit depth

单元深度 H/mm	0.5	3	5	7
$W = 1 \text{ mm}$	15.24	58.55	69.85	75.31
$W = 2 \text{ mm}$	28.59	73.00	79.60	82.53
$W = 4 \text{ mm}$	47.47	81.31	84.76	86.25

基于有限元思想的路径追踪算法可模拟任意 3D 表面形貌对二次电子发射系数的影响,认为表面光滑样品表面的二次电子发射系数是模拟的本构响应。设置入射电子能量范围为 60 ~ 1600 eV,对入射电子与如图 5 所示的各结构的微孔阵列表面的相互作用过程进行模拟,得到如图 6 所示的二次电子发射系数曲线。可以看到其二次电子发射系数满足典型的先升后降的规律,与 Furman 模型有着较好的拟合效果。



(a) $W=1 \text{ mm}$



(b) $W=2 \text{ mm}$

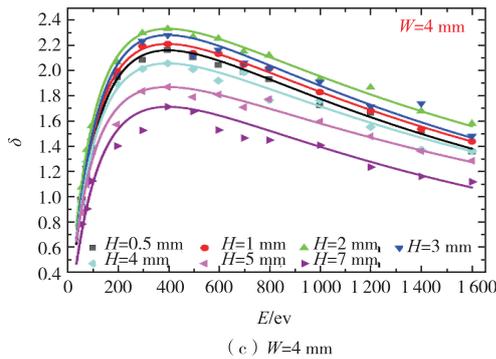


图 6 不同孔径宽度 W 下微孔单元深度 H 改变微孔阵列结构二次电子发射系数

Fig. 6 SEY with various unit depth for different width

当孔径宽度 $W = 1 \text{ mm}$ 时,随着微孔单元深度的变化,其二次电子发射系数随入射能量变化的曲线差异较小,各条曲线之间的重合度较高;当 $W = 2 \text{ mm}$ 、 4 mm 时,随着微孔单元深度的增加,二次电子发射系数曲线之间差异变大,重合度变低。

图 7 为最大二次电子发射系数及对应的总的二次电子发射系数随微孔单元深度变化的关系曲线。总的二次电子发射系数均随着微孔单元深度 H 的增大逐渐增大。特别地,当孔径宽度较大 ($W = 4 \text{ mm}$),随着孔径深度增大,其总的二次电子发射系数增大更为明显。值得注意的是,当孔径宽度较小 ($W = 1 \text{ mm}$ 、 $W = 2 \text{ mm}$) 时,最大二次电子发射系数曲线随着微孔单元深度 H 的增加逐渐降低,当孔径较大时 ($W = 4 \text{ mm}$),最大二次电子发射系数随着微孔单元深度 H 的增大存在一个上升的过程,然后随着深度的增大而减小。

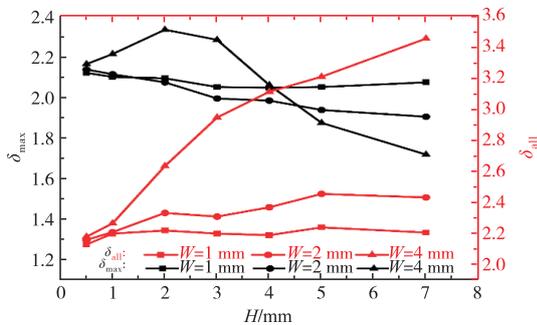


图 7 不同孔径宽度 W 下微孔单元深度 H 改变微孔阵列结构 δ_{\max} 和 δ_{all}

Fig. 7 δ_{\max} , δ_{all} with various unit depth

表面形貌通过对电子与材料相互作用的局部倾斜角度及平均碰撞次数进而对二次电子发射系数影响。随着相互作用的局部角度增大,局部二次电子发射系数增大。统计一次电子和二次电子与

微孔阵列结构表面平均碰撞次数,得到一次电子和二次电子平均碰撞次数随微孔单元深度 H 变化的曲线如图 8 所示。当孔径较小时 ($W = 1 \text{ mm}$ 、 $W = 2 \text{ mm}$),随着微孔的单元深度 H 的增大,一次电子的平均碰撞次数基本保持不变,而二次电子的平均碰撞次数随着微孔单元的深度增大有着显著变化。当保持微孔单元数目一定,若孔径较小,入射电子只有较小的数目进入了材料表面的微孔结构,大量的一次电子在材料水平表面发生相互作用及二次电子倍增。随着孔径宽度 W 的增大,进入微孔阵列结构的一次电子数目增多,一次电子及产生的二次电子与微孔单元多次碰撞,且微孔单元越深,二次电子的平均碰撞次数增大的越明显,二次电子越不容易从微孔单元中逃逸。因此,对于较小的孔径 ($W = 1 \text{ mm}$ 、 $W = 2 \text{ mm}$),最大二次电子发射系数随着入射深度的增大而降低。

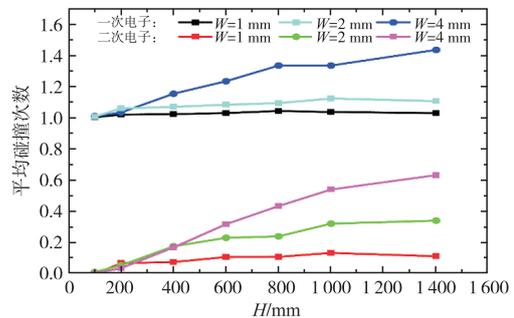


图 8 一次电子和二次电子平均碰撞次数随微孔单元深度 H 变化的曲线

Fig. 8 Average collisions numbers of primary electrons and secondary electrons with various unit depth

2.2 微孔单元孔径的影响

研究微孔单元孔径宽度 W 对二次电子发射系数的影响,分别保持微孔单元深度 $H = 1 \text{ mm}$ 和 5 mm 不变,改变微孔单元孔径宽度 W 分别为 0.5 mm 、 1 mm 、 2 mm 、 3 mm 、 4 mm 。得到如图 9 所示的三维微孔阵列结构表面。

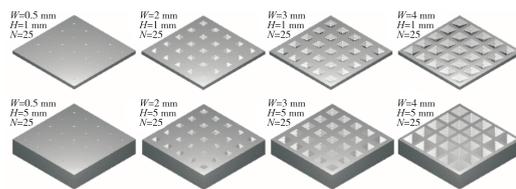


图 9 不同微孔单元深度 H 下孔径宽度 W 改变微孔阵列结构表面图

Fig. 9 3D model of microporous array surface with various unit width

当微孔单元宽度在不同深度下变化时,计算单元侧壁的倾角如表 2 所列。随着单元宽度的增加,侧壁倾角逐渐减小。电子与表面的局部相互作用随着单元宽度的增加而减小,局部二次电子发射系数减小。

表 2 微孔单元宽度 W 改变时微孔侧壁倾角

Tab. 2 Inclination angle of unit sidewall with various unit width

单元宽度 W/mm	0.5	2	3	4
倾角/ $^\circ$				
$H=2\text{ mm}$	77.08	47.47	36.00	28.56
$H=4\text{ mm}$	87.37	79.60	74.61	69.85

图 10 为最大二次电子发射系数及对应的总的二次电子发射系数随孔径宽度 W 变化的曲线。随着孔径宽度 W 的增大,总的二次电子发射系数逐渐增大,且相比微孔单元深度 $H=1\text{ mm}$,微孔单元深度 $H=5\text{ mm}$ 的表面结构随着孔径宽度 W 的增大,总的二次电子发射系数增大的更为显著。当微孔单元深度 $H=1\text{ mm}$ 时,最大二次电子发射系数随着孔径宽度 W 的增大而逐渐减小,而微孔单元深度 $H=5\text{ mm}$ 时,最大二次电子发射系数随着孔径宽度的增大而呈现相反的趋势。

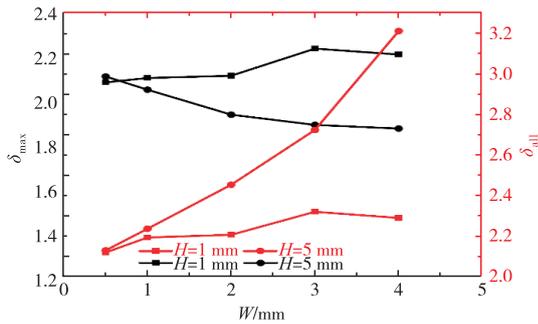


图 10 不同微孔单元深度 H 下孔径宽度 W 改变微孔阵列结构 δ_{\max} 和 δ_{all}

Fig. 10 δ_{\max} , δ_{all} with various unit width

一次电子和二次电子平均碰撞次数随微孔孔径宽度 W 变化的曲线如图 11 所示。当微孔单元深度 $H=1\text{ mm}$ 时,其一次电子和二次电子的平均碰撞次数随着孔径宽度的增大而大致保持不变,因此二次电子发射系数的下降主要是由于微孔单元侧壁倾斜角度的下降导致的。当微孔单元深度 $H=5\text{ mm}$ 时,随着孔径宽度的增大,一次电子和二次电子的平均碰撞次数逐渐增大,且二次电子平均碰撞次数增大的更为显著。

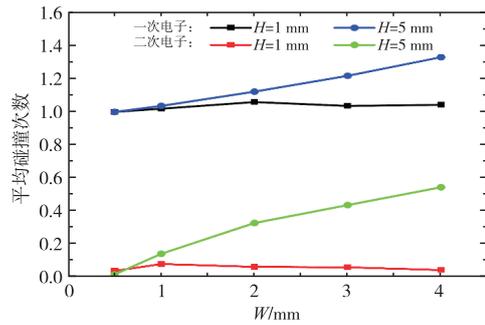


图 11 一次电子和二次电子平均碰撞次数随微孔单元宽度 W 变化的曲线

Fig. 11 Average collisions numbers of primary electrons and secondary electrons with various unit width

2.3 微孔单元数目的影响

研究微孔单元的数目对二次电子发射系数的影响,保持微孔单元孔径宽度 $W=2\text{ mm}$ 和深度 $H=5\text{ mm}$ 不变,通过增大微孔单元之间的距离,使得单位样片上的微孔单元数目分别为 9、16、25、36、64 时,得到如图 12 所示的三维表面形貌。

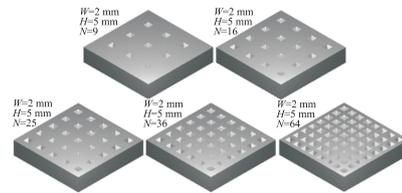


图 12 微孔单元数目 N 改变微孔阵列结构表面图

Fig. 12 3D model of microporous array surface with various unit number

随着单位样片上的微孔单元数目 N 的增大,微孔单元的轮廓保持不变,微孔单元之间水平形貌距离逐渐减小,即微孔阵列结构占材料表面面积的比例逐渐增大。计算微孔单元数目 N 改变时,微孔阵列结构占表面面积的比例如表 3 所列。

表 3 微孔单元数目 N 改变时微孔结构占表面面积比例

Tab. 3 The proportion of microporous to surface area with various unit number

微孔数目	9	16	25	36	64	169
占比/ $\%$	5.26	10.24	16	23.04	40.96	98.16

图 13 为最大二次电子发射系数及对应的总的二次电子发射系数随微孔单元数目 N 变化的曲线。总的二次电子发射系数曲线随着微孔单元数目 N 增大逐渐增大,二次电子发射系数随着微孔单元数目 N 的增大逐渐减小,且均为近似线性的变化趋势。

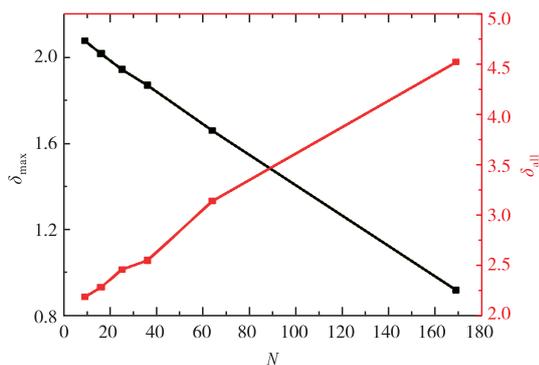


图 13 微孔单元数目 N 改变微孔阵列结构表面 δ_{\max} 和 δ_{all}

Fig. 13 δ_{\max} , δ_{all} with various unit number

统计一次电子和二次电子平均碰撞次数,如图 14 所示,随着微孔单元数目的增加,一次电子和二次电子的平均碰撞次数逐渐增加。这是因为微孔单元微孔阵列结构逐渐增加,由表 3 可知,微孔单元结构占材料表面面积的比例逐渐增大,因此一次电子更容易进入微孔结构发生多次碰撞结构。

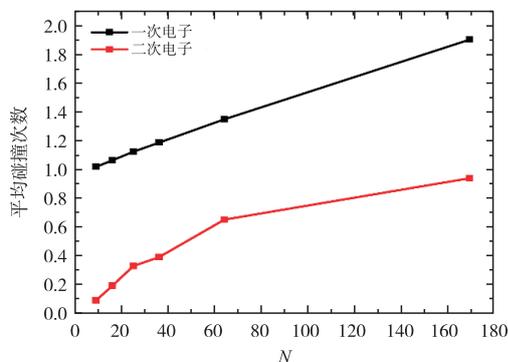


图 14 一次电子和二次电子平均碰撞次数随微孔单元数目 N 改变的曲线

Fig. 14 Average collisions numbers of primary electrons and secondary electrons with various unit number

3 结论

文章分析了微孔阵列结构表面单元参数对二次电子发射系数的影响,研究结果如下:

1) 微孔单元的深度和宽度通过侧壁倾角和平均碰撞次数影响二次电子发射。为了调节二次电子发射系数,有必要选择适当的深度和宽度参数。根据文章提出的路径追踪算法,可以通过仿真得到。

2) 微孔单元通过影响每个单元中电子捕获和逃逸的概率来影响二次电子发射系数。当微孔单元的深度和宽度确定时,单元数的变化对二次电子发射系数有线性的影响。

参考文献:

- [1] 谢爱根. 二次电子发射的研究和二次电子发射系数的测量[D]. 合肥:中国科学技术大学,2005.
- [2] 张娜,崔万照,王瑞,等. Vaughan 模型二次电子能谱对空间微波部件微放电效应的影响分析[J]. 空间电子技术,2021,18(2):23-26.
- [3] 冯娜,杨生胜,陈益峰,等. 空间材料二次电子发射过程的理论研究[J]. 真空与低温,2013,19(3):145-149.
- [4] 张娜,崔万照,胡天存,等. 微放电效应研究进展[J]. 空间电子技术,2011,8(1):38-43.
- [5] SAZONTOV A, BUYANOVA M, SEMENOV V, et al. Effect of emission velocity spread of secondary electrons in two-sided multipactor [J]. Physics of Plasmas, 2005, 12(5):053102.
- [6] BRONCHALO E, COVES Á, MATA R, et al. Secondary electron emission of Pt; Experimental study and comparison with models in the multipactor energy range [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(8):3270-3277.
- [7] 王瑞雪,海彬,田思理,等. 绝缘材料表面电荷测量优化及等离子体处理对其表面电特性的影响[J]. 高电压技术,2017,43(6):1808-1815.
- [8] 唐炬,潘成,王邸博,等. 高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展[J]. 电工技术学报,2017,32(8):10-21.
- [9] HENRIST B, HILLERET N, SCHEUERLEIN C, et al. The secondary electron yield of TiZr and TiZrV non-evaporable getter thin film coatings [J]. Applied Surface Science, 2001,172(1/2):95-102.
- [10] LE PIMPEC F, KIRBY R E, KING F K, et al. The effect of gas ion bombardment on the secondary electron yield of TiN, TiCN and TiZrV coatings for suppressing collective electron effects in storage rings [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, 564(1):44-50.
- [11] WOOD B, LEE J, WILSON G, et al. Secondary electron yield measurements of carbon nanotube forests: Dependence on morphology and substrate [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019,47(8):3801-3809.
- [12] YANG N, SONG B P, YANG X, et al. A method to numerically determine the secondary electron yield considering effects of the surface morphology [J]. Journal of Applied Physics, 2021,130(6):063302.
- [13] 王丹,叶鸣,冯鹏,等. 激光刻蚀对镀金表面二次电子发射的有效抑制[J]. 物理学报,2019,68(6):067901.
- [14] 王丹,贺永宁,叶鸣,等. 金纳米结构表面二次电子发射特性[J]. 物理学报,2018,67(8):233-242.

- [15] YE M, HE Y N, HU S G, et al. Suppression of secondary electron yield by micro-porous array structure[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(7):074904.
- [16] CAO M, ZHANG N, HU T C, et al. Secondary electron emission from rough metal surfaces: A multi-generation model[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(5):055501.
- [17] NISHIWAKI M, KATO S. Influence of electron irradiation and heating on secondary electron yields from non-evaporable getter films observed within situ x-ray photoelectron spectroscopy[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2007, 25(4):675-679.
- [18] JIN C G, OTTAVIANO A, RAITSES Y. Secondary electron emission yield from high aspect ratio carbon velvet surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(17):173301.
- [19] PIVI M, KING F K, KIRBY R E, et al. Sharp reduction of the secondary electron emission yield from grooved surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(10):104904.
- [20] 张娜, 崔万照, 曹猛, 等. 三维规则形貌影响下的二次电子发射特性研究[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(3):1-7.
- [21] 张娜, 崔万照, 胡天存, 等. 矩形槽二次电子产额的解析模型[J]. 空间电子技术, 2016, 13(1):35-37+72.
- [22] FURMAN M, PIVI M. Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2002, 5(12):124404.
- [23] SUHARYANTO, YAMANO Y, KOBAYASHI S, et al. Effect of mechanical finishes on secondary electron emission of alumina ceramics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3):620-626.
- [24] MEMOS G, LIDORIKIS E, KOKKORIS G. Roughness evolution and charging in plasma-based surface engineering of polymeric substrates; The effects of ion reflection and secondary electron emission[J]. Micromachines, 2018, 9(8):415.

作者简介:黄昆(1999 -),江西萍乡人,硕士研究生。主要研究方向为二次电子发射与介质表面带电。E-mail:huangkun0207@foxmail.com

通讯作者:张冠军(1970 -),山东潍坊人,博士,教授。国家杰出青年科学基金和全国百篇优博论文获得者。主要研究方向为高电压绝缘放电与劣化特性、电力设备状态检测与诊断、放电等离子体技术及多学科应用。E-mail:gjzhang@xjtu.edu.cn